

АСТ

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

АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛЬСТВО ТРАНСПОРТ

ARCHITECTURE • CONSTRUCTION • TRANSPORT



№ 2 (108)
2024

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)
- 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" ("Arkhitectura, 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)
- 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 Т. В., д. ф.-м. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень – **главный редактор**

Абдикаримов Р. А., д. ф.-м. н., профессор, Ташкентский архитектурно-строительный университет, Ташкент (Республика Узбекистан)

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

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

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

Асенов А. Ц., PhD, доцент, Русенский университет имени Ангела Кынчева, Русе (Болгария)

Барсуков В. Г., д. т. н., профессор, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно (Республика Беларусь)

Бартоломей Л. А., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Бородинцев А. В., д. т. н., профессор, Рижский технический университет, Рига (Латвия)

Ватин Н. И., д. т. н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Власов В. М., д. т. н., профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва

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

Джозеф О. О., PhD, доцент, Университет Ковенанта, Ота (Нигерия)

Захаров Н. С., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Ковенский И. М., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Кудрявцев С. А., д. т. н., профессор, член-корреспондент РААСН, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

Мамян З. Г., кандидат архитектуры, профессор, Национальный университет архитектуры и строительства Армении, Ереван (Республика Армения)

Миронов В. В., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Менендес Пидаль И., PhD, профессор, Политехнический университет Мадрида, Мадрид (Испания)

Мерданов Ш. М., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Мурали Г., PhD, доцент, Университет SASTRA, Танджавур (Индия)

Овчинников Е. В., д. т. н., профессор, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно (Республика Беларусь)

Овчинников И. Г., д. т. н., профессор, действительный член Академии транспорта РФ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Панфилов А. В., кандидат архитектуры, доцент, Департамент строительства, архитектуры и земельных отношений Администрации города Салехарда, Салехард

Попов А. Ю., д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, Омск

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

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

Саксена А., PhD, профессор, Уттаракхандский университет Дев Бхуми, Дехрадун (Индия)

Сепехри М., PhD, доцент, Технологический университет имени Шарифа, Тегеран (Иран)

Сладковски А. В., д. т. н., профессор, Силезский технический университет, Катовице (Польша)

Соколов В. Г., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Султанова Д. Н., доктор архитектуры, профессор, Самаркандский архитектурно-строительный институт, Самарканд (Республика Узбекистан)

Тарасенко А. А., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Уляшева В. М., д. т. н., профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

Федюк Р. С., д. т. н., доцент, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

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

Чекардовский М. Н., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Чжао В., PhD, профессор, Северо-Восточный университет, Шэньян (Китай)

Якунин Н. Н., д. т. н., профессор, Оренбургский государственный университет, Оренбург

Редакционный совет

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

Перевалов П. А., начальник Главного управления строительства Тюменской области

Арбузова З. Г., заместитель генерального директора СРО Союз «Организация изыскателей Западносибирского региона»

Катаева Е. С., директор Союза «Саморегулируемая организация строителей Тюменской области»

Никитин А. Ю., президент Союза строителей (работодателей) Тюменской области

Скоробогатова Ю. Л., генеральный директор Союза «Саморегулируемая организация проектировщиков «Западная Сибирь»

Табанакоев А. В., председатель Тюменского отделения Союза архитекторов России

Фролов А. В., директор ГАУ ТО «Управление государственной экспертизы проектной документации»

Редакция

Маслова Е. А. – редактор
Вахрушева Н. В. – редактор
Николюк С. А. – дизайнер

Адрес редакции

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

Адрес издателя

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

Дата выхода: 02.07.2024
Цена свободная

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

Journal Founders

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

Editorial Board

Maltseva T. V., D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen – **editor-in-chief**
Abdikarimov R. A., D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent (Republic of Uzbekistan)
Abduramanov A. A., D. Sc. in Engineering, Professor, M. Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz (Republic of Kazakhstan)
Amirzoda O. Kh., 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)
Arynov K. K., D. Sc. in Architecture, Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana (Republic of Kazakhstan)
Asenov A. Ts., PhD, Associate Professor, "Angel Kanchev" University of Ruse, Ruse (Bulgaria)
Barsukov V. G., D. Sc. in Engineering, Professor, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno (Republic of Belarus)
Bartolomey L. A., D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen
Borodinecs A. V., D. Sc. in Engineering, Professor, Riga Technical University, Riga (Latvia)
Vatin N. I., D. Sc. in Engineering, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
Vlasov V. M., D. Sc. in Engineering, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow
Grđić Z., D. Sc. in Engineering, Professor, University of Niš, Niš (Serbia)
Joseph, O. O., PhD, Associate Professor, Covenant University, Ota, (Nigeria)
Zakharov N. S., D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen
Kovenskiy I. M., D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen
Kudryavtsev S. A., D. Sc. in Engineering, Professor, Corresponding Member of RAACS, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
Mamyan Z. G., C. Sc. in Architecture, Professor, National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan (Republic of Armenia)
Mironov V. V., D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen
Menendez Pidal I., PhD, Professor, Madrid Polytechnic University, Madrid (Spain)

Merdanov Sh. M., D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen
Murali G., PhD, SASTRA Deemed to be University, Thanjavur (India)
Ovchinnikov E. V., D. Sc. in Engineering, Professor, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno (Republic of Belarus)
Ovchinnikov I. G., D. Sc. in Engineering, Professor, Full Member of the Academy of Transport of Russian Federation, Perm National Research Polytechnic University, Perm
Panfilov A. V., C. Sc. in Architecture, Associate Professor, Department of Construction, Architecture and Land Relations of the Administration of Salekhard, Salekhard
Popov A. Yu., D. Sc. in Engineering, Professor, Omsk State Technical University, Omsk
Popok N. N., D. Sc. in Engineering, Professor, Euphrosyne Polotskaya State University of Novopolotsk, Polotsk (Republic of Belarus)
Rajchik M., D. Sc. in Engineering, Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa (Poland)
Saxena A., PhD, Professor, Dev Bhoomi Uttarakhand University, Dehradun (India)
Sepehri M., PhD, Associate Professor, Sharif University of Technology, Tehran (Iran)
Sladkovski A. V., D. Sc. in Engineering, Professor, Silesian University of Technology, Katowice (Poland)
Sokolov V. G., D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen
Sultanova D. N., D. Sc. in Architecture, Professor, Samarkand State Architectural and Civil Engineering Institute, Samarkand (Republic of Uzbekistan)
Tarassenko A. A., D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen
Ulyasheva V. M., D. Sc. in Engineering, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg
Fediuk R. S., D. Sc. in Engineering, Associate Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok
Qi Ch., D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing (China)
Chekardovskiy M. N., D. Sc. in Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen
Zhao W., PhD, Professor, Northeastern University, Shenyang (China)
Yakunin N. N., D. Sc. in Engineering, Professor, Orenburg State University, Orenburg

Editorial Council

Nabokov A. V., C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Director of the Construction Institute, Industrial University of Tyumen – **Chairman**
Perevalov P. A., Head of the General Administration of Construction of the Tyumen region
Arbuzova Z. G., Deputy General Director of SRO Soyuz "Organizatsiya izyskateley Zapadnosibirskogo regiona"
Kataeva E. S., Director of the Union "Samoreguliruemaya organizatsiya stroiteley Tyumenskoy oblasti"

Nikitin A. Yu., President of the Soyuz stroiteley (rabotodateley) Tyumenskoy oblasti
Skorobogatova Y. L., General Director of the Union "Samoreguliruemaya organizatsiya proektirovshchikov "Zapadnaya Sibir"
Tabanakov A. V., Chairman of the Tyumen Branch of the Union of Architects of Russia
Frolov A. V., Director of the state autonomous institution of the Tyumen region "Upravlenie gosudarstvennoy ekspertizy proektnoy dokumentatsii"

Edition

Maslova E. A. – editor
Vakhrusheva N. V. – editor
Nikolyuk S. A. – 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

М. А. Огнева, В. Н. Кулачковский

Модель архитектурно-пространственных принципов
для обеспечения адаптации людей с аутизмом 6

А. С. Гульбинас, Л. В. Белова

Разработка концептуальной основы интеллектуального здания
на основе метода триадической дешифровки: эволюционный подход 17

Строительство

М. Ю. Трошин, А. В. Турков, А. В. Заев

Влияние толщины поперечного и продольных слоев на деформации
и напряжения в 3-слойной плите ДПК (CLT), смоделированной как составная пластина 30

А. П. Малышкин, А. В. Есипов, М. А. Есипов

Повышение надежности железобетонных каркасов многоэтажных зданий 42

Т. С. Жилина, М. Н. Сабукевич, Дан Ву Дин, Джанака Видесундара

Применение повысительных насосных станций для модернизации систем теплоснабжения 56

В. А. Митрошин

Сейсмическая защита зданий и сооружений с применением метаматериалов:
текущее состояние и перспективы развития 67

А. Г. Жулин, Л. В. Белова, П. А. Семенов

Влияние содержания железа в речной воде на технологию очистки 84

Машиностроение

И. Н. Дроздов, А. Ю. Попов

Эффективность применения кривошипно-ползунного привода
для фрезерования вафельного фона 96

В. Е. Овсянников, Е. М. Кузнецова, Р. Ю. Некрасов, С. Ю. Тицкая

Разработка математической модели колебательных процессов
при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости 105

Информация для авторов

Правила подготовки рукописи (на русском языке) 114

Правила подготовки рукописи (на английском языке) 116

Люди, события, факты

«Архитектурное наследие» по-тюменски:

фоторепортаж с одного из самых значимых событий 2024 года 118

Contents

Architecture

M. A. Ogneva, V. N. Kulachkovskiy

Model of architectural and spatial guidelines
for the adaptation of people with autism 6

A. S. Gulbinas, L. V. Belova

Effect of transverse and longitudinal layer thickness on deformations
and stresses in a three-layer CLT panel modeled as a composite plate 17

Construction

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

Effect of transverse and longitudinal layer thickness on deformations
and stresses in a three-layer CLT panel modeled as a composite plate 30

A. P. Malyshkin, A. V. Esipov, M. A. Esipov

Increasing the reliability of reinforced concrete frames of multistorey buildings 42

T. S. Zhilina, M. N. Sabukevich, Dang Vu Dinh, Janaka Wijesundara

Using the booster pumping stations for modernization of heat supply system 56

V. A. Mitroshin

Seismic protection of buildings and structures using metamaterials:
current status and development prospects 67

A. G. Zhulin, L. V. Belova, P. A. Semyonov

Influence of iron concentration in river water on treatment technology 84

Mechanical engineering

I. N. Drozdov, A. Yu. Popov

Effectiveness of using a slider-crank mechanism for waffle background milling 96

V. E. Ovsyannikov, E. M. Kuznetsova, R. Yu. Nekrasov, S. Yu. Titskaya

Development of mathematical model of oscillatory processes at turning of materials
with reverse hardness distribution 105

Instructions for authors

Manuscript preparation guidelines (In Russian) 114

Manuscript preparation guidelines (In English) 116

People, events, facts

"Architecture Heritage" in the Tyumen way:

photo from one of the most significant events in 2024 118

УДК 159.937.523

2.1.12 Архитектура зданий и сооружений.
Творческие концепции архитектурной деятельности
(архитектура, технические науки)

МОДЕЛЬ АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРИНЦИПОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АДАПТАЦИИ ЛЮДЕЙ С АУТИЗМОМ

М. А. Огнева, В. Н. Кулачковский
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

MODEL OF ARCHITECTURAL AND SPATIAL GUIDELINES FOR THE ADAPTATION OF PEOPLE WITH AUTISM

Mariia A. Ogneva, Valeriy N. Kulachkovskiy
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. В основу проектируемой архитектурной среды в большинстве случаев закладывают интересы нейротипичных пользователей, которые не соответствуют потребностям людей с ментальными особенностями. Актуальность использования определенных архитектурных решений для аутичных людей обоснована их чувствительностью к внешним раздражителям, а также статистикой с возросшими показателями диагностики аутизма. В результате анализа теоретических трудов зарубежных исследователей и архитекторов, а также с учетом современной архитектуры для людей с расстройствами аутистического спектра была разработана модель архитектурно-пространственных принципов. В ее основе – пять видов взаимодействия аутичного человека и пространства: ощущение себя в личном пространстве; ощущение себя в общественном пространстве; восприятие пространства вокруг себя; сенсорное ощущение пространства; сенсорная перегрузка. Модель учитывает степень взаимодействия человека и пространства, а также выявляет основные рекомендуемые направления в проектировании для людей с аутизмом: дифференциация, зонирование, последовательность, связь внутренней среды и внешней, конкретные архитектурные решения.

Abstract. Current architectural environment mostly accounts for the interests of its neurotypical users, which do not correspond with the needs of people with neurodiversity. The relevance of using certain architectural solutions for autistic people is based on their sensitivity to external stimuli, as well as statistics with increased rates of autism diagnoses. After analyzing theoretical works of foreign researchers and architects, and taking into account modern architectural solutions for people with autism spectrum disorder, we developed a model of architectural and spatial guidelines. It was based on five types of interaction between the autistic person and space: sense of self in personal space; sense of self in public space; perception of space around self; sensory sense of space; and sensory overload. The model considers the relationship between the person and the space, and prioritizes approaches to autism-friendly design such as differentiation, zoning, gradation, linking the external and internal environment, and specific architectural solutions. This design approach will adapt autistic people to interact with the environment in future, and may have a positive impact on the other user groups through "the curb-cut effect" (a phenomenon when solutions aimed at transforming the living conditions of a specific vulnerable user group help

Описанный в модели подход к проектированию позволит адаптировать аутичных людей к потенциальному взаимодействию с окружающей средой, а также может оказать благоприятное воздействие на остальные группы пользователей по принципу «эффекта бордюра» (явление, при котором решения, направленные на преобразование условий жизни конкретной уязвимой группы пользователей, помогают обществу в целом). Модель может быть применена в качестве руководства при архитектурном проектировании, а также быть использована для будущих теоретических исследований в данной области.

Ключевые слова: аутизм, расстройства аутистического спектра, дружелюбная к аутизму среда, сенсорный подход, сенсорная архитектура

society as a whole). The model can be applied as a guide in architectural design and can also be used for future theoretical research.

Key words: autism, autism spectrum disorders, autism-friendly design, sensory approach, sensory architecture

Для цитирования: Огнева, М. А. Модель архитектурно-пространственных принципов для обеспечения адаптации людей с аутизмом // М. А. Огнева, В. Н. Кулачковский. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-6-16. – Текст: непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 6–16.

For citation: Ogneva, M. A., & Kulachkovskiy, V. N. (2024). Model of architectural and spatial guidelines for the adaptation of people with autism. *Architecture, Construction, Transport*, (2(108)), pp. 6-16. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-6-16.

1. Введение

Архитектурное проектирование сопровождается анализом запросов потенциальных пользователей разрабатываемой среды. Группы пользователей разнообразны, однако специфика потребностей некоторых из них может быть не столь очевидна, как, например, внешние признаки (возрастные, гендерные и т. д.). К таким сообществам относятся люди с ментальными особенностями, в том числе люди с аутизмом. Расстройства аутистического спектра (РАС) – группа неврологических расстройств, основными критериями которой, согласно медицинским классификациям DSM-V и МКБ-11, являются нарушение социальной коммуникации и социального взаимодействия и ограниченные и повторяющиеся типы поведения. Обязательным условием для постановки диагноза является наличие данных

критериев с детского возраста [1, 2]. Всемирная организация здравоохранения заявляет о диагностировании аутизма у каждого сотого человека в мире [3], при этом в связи с ограниченной информированностью общества и существующей стигматизацией РАС можно предположить, что действительная картина может отличаться от задокументированных данных.

Повышенная чувствительность к средовым раздражителям (звуковым, визуальным, тактильным и др.) является одной из распространенных особенностей аутичных людей [4]. Однако архитектурная среда в большей степени ориентирована на нейротипичных пользователей и оказывается чрезмерно насыщена стимулами, вызывающими повышенную сенсорную нагрузку у людей с аутизмом. Следовательно, возникает необходимость создания дружелюбной к аутизму архитектурной

среды, проектирование которой осуществлялось бы в соответствии с потребностями людей с РАС. Обширное исследование на данную тему было проведено архитектором Магдой Мостафой, которая разработала систему принципов ASPECTSS и ее итерацию ASPECTSS 2.0. Суммарно принципами являются 14 аспектов по организации архитектурного пространства, его оформления, а также рекомендации в области администрирования, экономики и безопасности [5, 6]. Система ASPECTSS упоминается в работе итальянских архитекторов (А. Гайани, Д. Фантони, С. Катамадзе) о значимости градационной смены пространств и взаимодействия приватного и общественного, интерьера и экстерьера, низко- и высокостимулирующих пространств [7]. Перечисленные теоретические труды служат основой для данного исследования, целью которого является разработка архитектурно-пространственных принципов формирования архитектурной среды для людей с аутизмом. Исследование сконцентрировано на выявлении особенностей планирования архитектурного пространства, его взаимодействия с аутичным пользователем, будь то его восприятие человеком или ощущение человека в нем, а приоритет отдан не визуальным считываемым факторам или вниманию к иным отдельным группам стимулов, а общим пространственным характеристикам в зависимости от их влияния на человека.

2. Материалы и методы

Исследование посвящено изучению архитектурной среды как совокупности стимулов, которые могут оказывать значительное воздействие на внутреннее состояние аутичных людей. Был проведен анализ современной архитектуры, ориентированной на потребности людей с аутизмом, а также изучены теоретические разработки и рекомендации в области архитектуры для людей с РАС. Научные методы, примененные в работе: анализ, синтез, абстрагирование, индукция, моделирование, классификация.

3. Результаты и обсуждение

Модель архитектурно-пространственных принципов (рис. 1) включает перечень рекомен-

дованных приемов для создания архитектурной среды, направленной на потребности аутичных людей. Потенциально она может быть использована для обеспечения адаптации человека с аутизмом к пребыванию в окружающей среде. Основу модели составляют пять видов взаимодействия аутичного человека и пространства:

- ощущение себя в личном пространстве;
- ощущение себя в общественном пространстве;
- восприятие пространства вокруг себя;
- сенсорное ощущение пространства;
- сенсорная перегрузка.

Каждое из описанных взаимодействий представляет набор архитектурно-пространственных принципов, распределенных на пять направляющих уровней. Такими уровнями являются: «дифференциация», «зонирование», «последовательность», «изнутри – наружу», «решения».

Представленные в модели принципы обладают непосредственными двухсторонними связями внутри своего сектора, обозначающего вид взаимодействия человека и пространства, и уровня, отражающего направление проектирования. Модель функционирует как система, что проявляется в дополнительных связях между разными секторами и уровнями.

Серый центральный сектор на рис. 1 отражает уровни модели, сплошные линии – прямые связи элементов модели, пунктиром обозначены связи элементов в разных уровнях и секторах.

Ощущение себя в личном пространстве – это процесс, который отражает внутреннее состояние человека, характеристики себя, своей собственности и пространства в непосредственной близости к нему.

Одной из сенсорных проблем, с которой сталкиваются люди с аутизмом, являются трудности с проприоцепцией. Проприоцепция – это сигналы, передаваемые проприоцепторами (внутренними нервными окончаниями, <...> обеспечивающими [нервную систему] информацией о сокращении и растяжении мышц [8]), а также соответствующие им ощущения [9]. Благодаря проприоцепции люди ощущают собственное положение в пространстве, движения. Проблемы с

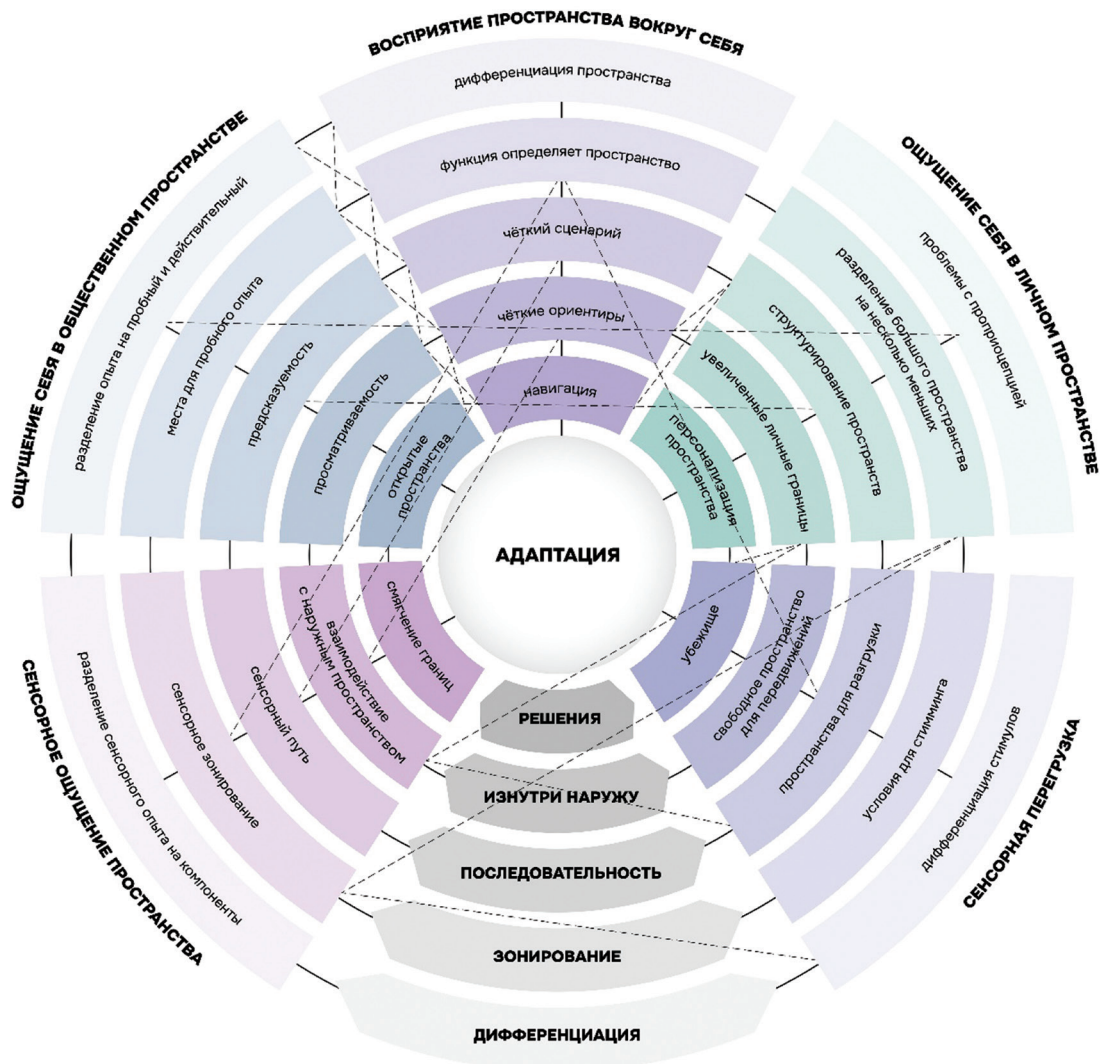


Рис. 1. Модель архитектурно-пространственных принципов для обеспечения адаптации людей с аутизмом
 Fig. 1. Model of architectural and spatial principles for the adaptation of people with autism

проприоцепцией могут привести к нарушению координации тела или тактильного восприятия. Требуется обустройство пространства вспомогательным оборудованием, которое могло бы сопровождать маршрут человека и обеспечивать удобное и безопасное передвижение [10]. При этом соответствующие меры могут быть направлены не только на адаптацию аутичного человека, но и помочь людям с ограниченными возможностями мобильности.

Для того чтобы человек ощущал себя комфортно, а его личные границы были соблюдены, необходимо разделять большое пространство на несколько меньших и структурировать их в за-

висимости от назначения, наполнения или иных факторов [11]. Организация числа небольших помещений вместо одного просторного, характеризующегося свободной планировкой, приведет к ряду положительных эффектов. Среди них: ослабление потенциальной сенсорной нагрузки за счет уменьшения числа людей, пребывающих в одном помещении, и, как следствие, снижение необходимости в чрезмерном социальном взаимодействии. При условии, что речь идет об образовательном процессе, работа в маленьких группах приведет к индивидуализированному взаимодействию с преподавателем и позволит сделать процесс обучения более эффективным.

Другими следствиями являются: сокращение отвлекающих факторов, стабильность обстановки, ее структура и предсказуемость [12, 13].

Необходимость в структурировании пространств связана с несколькими распространенными среди аутичных людей чертами: предпочтением стабильности, системности, предсказуемости, а также потребностью в увеличенных границах личного пространства. Следовательно, при проектировании необходимо обеспечить просторные индивидуальные места для посадки или работы, а также задействовать элементы персонализации пространства. Это проще реализовать в помещениях с небольшими габаритами, так как пространства таких размеров способствуют признанию пользователями границ друг друга и при систематическом времяпрепровождении в них – формируют привязанность к месту.

Восприятие пространства вокруг себя связано с отражением пространства в совокупности всех его характеристик и их воздействием на человека. Люди с аутизмом обычно обладают потребностью в более упорядоченной планировочной структуре, чем нейротипичные пользователи. Это вызвано высоким риском сенсорной перегрузки, который характерен для шумных, ярких и людных общественных пространств, часто при отсутствии убедительной навигации.

Для снижения стресса от пребывания в пространстве необходимо осуществлять его дифференциацию, зонирование и продумать сценарий его использования, обозначив последний через функции, ориентиры и навигацию. Дифференциация пространства подразумевает разделение и обособление групп помещений или площадок по тем или иным ключевым признакам: функциональному назначению, интенсивности стимулов, техническим требованиям и нормам, взаимодействию с экстерьером и т. п. Систематизированное разведение помещений/площадок вносит логику в планировочное решение и помогает аутичному человеку *понять* пространство, в котором он пребывает. Следствием разделения пространств является назначение каждому из них соответствующей функции, которая должна служить его опреде-

лителем. Речь идет не только о примерах из категории «столовая = питание» или «спортзал = физические упражнения», но и о помещениях универсального характера, за которыми рекомендуется закрепить главенствующую функцию в качестве маркера. Следующим шагом является разработка сценария использования пространства, что в совокупности с вышеизложенными принципами определит схему расположения составляющих проекта между собой, их взаимосвязь и последовательность. Материальным сопровождением заключенного в планировке сценария служат ориентиры. Ими могут быть высотные доминанты, цветовые или световые акценты, материалы, малые архитектурные формы и другие архитектурные средства. Иным вспомогательным элементом, обладающим весомым (а в сложных, многоуровневых объектах – решающим) значением, является навигация. Подвесные табло, стеновые панели, стенды, гравировка, наклейки и иные дизайнерские элементы служат необходимыми направляющими, особенно в свете исследований, указывающих на эффективное считывание графической информации аутичным человеком вместо обращения к информации вербальной [14]. При этом стоит обратить внимание на особенности зрительного восприятия данных у людей с РАС. Если некоторые аутичные люди обладают высоким уровнем способности обрабатывать визуальную информацию, то другие могут быть «визуально оборонительны» [15]. Графический дизайн должен характеризоваться чистотой изложения, простотой и деликатным исполнением, тогда элементы навигации позволят без труда считать пространство и избавить человека от вынужденного социального контакта или информационного перегруза [16].

Ощущение себя в общественном пространстве – это процесс, при котором человек, пребывающий в пространстве, считывает свойства окружающих предметов. Дифференциация и структурированность, о которых шла речь выше, в данном случае реализуются через характеристики составляющих пространства.

Принцип дифференциации здесь связан с разделением опыта на пробный и действительный. Аутичным людям с самого рождения приходится

прикладывать усилия для адаптации в обществе путем считывания особенностей функционирования людей или явлений не в силу исследовательского любопытства (присутствие которого не отрицается), но с целью выработки знания, как действовать им самим. «Чтение» окружающих людей и подражание их мимике, жестикуляции и общему поведению, скрывание собственных побуждений (так называемый «маскинг») необходимы аутичным людям для интеграции в общество. Однако многие поведенческие особенности могут касаться вполне конкретных обыденных сценариев: покупка товаров в школьном буфете или плавание в общественном бассейне. Подобные ситуации сопровождается целый ряд сенсорных впечатлений, к которому аутичный человек может быть не готов. Таким образом, опыт следует дифференцировать на действительный и «репетиционный», его предваряющий, а в пространствах, при возможности, необходимо предусматривать места для пробного опыта [17]. В продолжение приведенных выше примеров можно предложить симуляцию кассы в общеобразовательном учреждении для репетиции приобретения товара или оборудовать дополнительный отдельный спуск в общий бассейн, где человек мог бы постепенно и обособленно войти в воду, адаптируясь к своим ощущениям и не задерживая остальных пользователей. Данные решения, как и целый ряд принципов в других группах взаимодействий, обеспечивают предсказуемость – столь важный элемент для снижения стрессового воздействия в среде.

Дополнительным способом создания легкого для прочтения пространства является обеспечение его просматриваемости, что достигается посредством планировки и использования соответствующих материалов. Создание небольших закрытых пространств, как было установлено ранее, рекомендовано, особенно в помещениях для деятельности, требующей повышенной концентрации внимания или уединения. Однако внедрение прозрачных материалов в перегородки, создание проемов не только наружу, но и во внутренних стенах и дверях («стратегические окошки» [17]), организация просматриваемых коммуникаций позволяют обеспечить (в сово-

купности с остальными принципами) интуитивное передвижение из одной точки в другую. Также прозрачность позволяет заранее определить функциональное назначение помещений или площадок, пропускает естественное освещение, поощряет к взаимодействию с зелеными благоустроенными зонами в теплое время года, а главное – благоприятно влияет на психоэмоциональное состояние пользователя.

Сенсорное ощущение пространства – это процесс познания пространства вокруг себя через органы чувств. В отличие от взаимодействия «ощущение себя в общественном пространстве» принципы данной группы базируются не на конкретных свойствах предметов, а на сенсорных впечатлениях в целом, вызванных стимулами окружающей среды.

В первую очередь, приступая к проектированию, необходимо разделить сенсорный опыт на компоненты в зависимости от того, на какой из органов чувств оказывает воздействие раздражитель [11]. Следовательно, выделяются зрение, слух, обоняние, осязание, вкус. После определения состава сенсорного опыта, которому подвергаются пользователи пространства, рекомендуется предусмотреть сенсорное зонирование для группировки однотипных стимулов в одной зоне. Затем необходимо распределить их таким образом, чтобы перемещение через пространство по запрограммированному сценарию обеспечивало последовательное усиление воздействия того или иного стимула. Хаотичное расположение раздражителей по интенсивности воздействия приведет к нестабильному, непредсказуемому, а следовательно, некомфортному пребыванию в пространстве. Отсутствие логики построения противоречит стремлению адаптации аутичного пользователя к окружающему пространству.

Воздействие одного вида раздражителей можно постепенно совмещать с пространствами следующей группы стимулов, последовательно подключая разные органы чувств и обогащая опыт, но не перегружая его. Таким образом, формируется сенсорный путь, который работает в тесной взаимосвязи со сценарием использования пространства. Одной из особенностей такого под-

хода может стать взаимодействие интерьера и экстерьера. Оно может осуществляться без непосредственной проницаемости (через проемы, фонари и пр.), например, путем освещения помещения, создания особой атмосферы и упомянутой выше прозрачности и просматриваемости, а может обеспечивать более глубокую связь и приглашать пользователя к перемещению из одной среды в другую. В данном случае логично задействовать способы смягчения границы между внутренним и внешним пространством, т. е. вновь обеспечить градацию, выраженную в постепенной смене стимулов. Такими способами могут стать: крыльцо с козырьком, дополнительный вход и другие меры.

Сенсорная перегрузка – это состояние, вызванное чрезмерным количеством сенсорной информации, поступающей в мозг и нервную систему человека, которые не справляются с ее обработкой. Для предотвращения сенсорной перегрузки и смягчения эффектов от пребывания в пространстве возможно предпринять ряд мер.

Дифференциация стимулов и их постепенное градиционное распределение являются первым шагом к снижению риска сенсорной перегрузки. Одним из стимулов может являться шум. Формирование блока шумных помещений и их обособление от блока тихих с нейтральной зоной между ними, отличающейся средним уровнем воздействия стимула, поможет адаптировать человека с аутизмом к потенциальному стрессовому воздействию. Пребывание в шумных пространствах может быть утомительным опытом и для нейротипичного человека. Если аутичный человек обладает особой чувствительностью к шуму, непредсказуемое появление сверхстимулирующего пространства может привести к неблагоприятным последствиям. Подход аналогичен для остальных видов стимулов.

При условии перегрузки или чрезмерной реакции на раздражитель аутичный человек прибегает к стиммингу – повторяющемуся моторному поведению с целью снижения эмоционального возбуждения [18]. Стимминг может представлять собой различные действия от жестикуляции до раскачивания и прыжков, так как каждый аутичный человек индивидуально вос-

принимает стимулирующие факторы и отлично от других реагирует на них в целях их нейтрализации. Эти реакции не всегда поддаются контролю, а их подавление не несет положительных последствий для психического здоровья. Следовательно, необходимо обеспечивать условия для стимминга, например, создавать небольшие закрытые комнаты-убежища для уединения и разгрузки [19]. Иными пространствами для разгрузки, необязательно с целью осуществления стимминга, могут являться патио, зимние сады, помещения для игры с домашними животными и другие в зависимости от потребностей пользователей. Однако, возвращаясь к вопросу стимминга, иногда выделение отдельного помещения под разгрузку нецелесообразно, например, когда речь идет о жилом доме или квартире. В таком случае стиммить возможно в любой комнате, но для этого необходимо выделить свободное пространство для передвижений, т. е. осуществить планировку мебели таким образом, чтобы в комнате оставалось достаточно площади для проявляемых аутичным человеком реакций, даже если они выразительно подвижные.

В качестве обобщения представленной модели можно выделить несколько основных ориентиров в проектировании архитектурного пространства для людей с аутизмом, которые проявляются одновременно в нескольких секторах и уровнях модели: градация, повышенные требования к личным границам и снижение воздействия раздражителей.

Градация выражается в последовательном переходе из одной среды в другую, из интерьера в экстерьер, от менее интенсивного воздействия стимулов к насыщенному пространству, проявляется при прохождении сенсорного пути и определена в функциональном зонировании [7]. Пространство должно последовательно подготавливать аутичного пользователя к потенциальному содержанию объекта. Так, каждая составляющая архитектурной среды должна быть выстроена в соответствии с общей логикой и легка в прочтении, предсказуема, просматриваема, должна сопровождаться навигацией. Непредсказуемая и резкая смена обстановки, проявляемая

в освещении, цвете, материалах, насыщении помещения, противоречит градационному переходу и может вызвать сенсорную перегрузку у человека с РАС.

Повышенные требования к личным границам должны учитываться проектировщиком и удовлетворять потребность индивидуума в увеличенном пространстве и его персонализации. Создание небольших пространств для малочисленных групп пользователей способствует закреплению за человеком того или иного места в аудитории в случае систематического использования. Возвращение в привычную обстановку на прежнюю позицию формирует в человеке чувство стабильности и привязанности к месту, и, как следствие, обеспечивает комфортное пользование. Также, несмотря на приверженность к неизменной обстановке и четким закреплению функции за пространством, следует обеспечить возможность его трансформации. Из трансформации необязательно должно следовать перепределение назначения пространства. Использование модульной мебели в качестве одного из инструментов может в желаемое время создать зону для отдыха или уединения, обустроить материальный барьер между пользователями или, наоборот, подтолкнуть их к социальной коммуникации.

Снижение воздействия раздражителей особенно актуально для помещений, требующих концентрации внимания и уединения, однако рекомендовано вне зависимости от наличия такой потребности. Сокращение избытка информации необходимо по нескольким причинам. Во-первых, для обеспечения разгрузки. Так, места-убежища для уединения и отдыха могут быть вынесены в зону с низкостимулирующими активностями, оборудованы рассеивающим светом с пониженной интенсивностью, оформлены в сдержанной палитре цветов и материалов. Во-вторых, сокращение отвлекающих факторов повышает концентрацию внимания, что необходимо в пространствах для работы и творчества. Учебные аудитории и офисы требуют естественного освещения, при этом возможно использование матового стекла, навесов или завышенного

уровня подоконника для исключения излишних факторов внешней среды.

Описанные в модели принципы, уровни и виды взаимодействия со средой находятся в тесной взаимосвязи друг с другом и являются комплементарными. Применение одного из принципов влечет активацию другого. Однако в заключение необходимо отметить такое понятие, как «тепличный эффект». При разработке системы ASPECTSS Магда Мостафа подчеркивала, что непреклонное следование всем принципам дружелюбной к аутизму среды в проектируемом пространстве может привести к созданию так называемой «теплицы» – безопасного оплота для людей с РАС, который, наоборот, препятствует адаптации к окружающему миру [20]. Таким образом, частичное отклонение от представленных в модели методов проектирования возможно, а в некоторых случаях даже необходимо.

4. Заключение

Модель представляет систему общих рекомендаций к организации архитектурного пространства для аутичных людей. Данная система была разработана на основе пяти видов взаимодействия человека и пространства: ощущение себя в личном пространстве; ощущение себя в общественном пространстве; восприятие пространства вокруг себя; сенсорное ощущение пространства; сенсорная перегрузка. Составляющие модели подразделяются на пять уровней, отражающих различные направления проектирования: дифференциация; зонирование; последовательность; изнутри наружу, т.е. взаимодействие внутреннего и внешнего пространств; конкретные архитектурные решения. В результате можно выделить три основных проектировочных ориентира, объединяющих сразу несколько секторов или уровней модели: повышенные требования к личным границам, градация и снижение воздействия средовых раздражителей.

Для практического применения модели необходимо дальнейшее исследование в области архитектуры для людей с РАС, работа с аутичными пользователями разных возрастов и разработка уточняющей матрицы решений для описанных в

модели принципов. Стоит отметить, что опыт каждого аутичного человека уникален, поэтому создание универсального пространства, которое в полной мере удовлетворяло бы потребности всех людей с аутизмом, невозможно, так же как нельзя сформировать аналогичное пространство для

нейротипичных пользователей. Однако соблюдение данных принципов позволит существенно увеличить уровень комфорта от пребывания в архитектурной среде, что поощрит человека к исследованиям внутри нее и, как следствие, потенциальной адаптации к миру за ее пределами.

Библиографический список

1. Lobar, S. L. DSM-V Changes for Autism Spectrum Disorder (ASD): Implications for Diagnosis, Management, and Care Coordination for Children with ASDs / S. L. Lobar. – DOI 10.1016/j.pedhc.2015.09.005. – Текст : непосредственный // Journal of Pediatric Health Care. – 2015. – Vol. 30, No. 4. – P. 359–365.
2. 6A02 Расстройство аутистического спектра. – Текст : электронный // Международная классификация болезней 11 пересмотра : официальный сайт. – 2024. – URL: <https://icd.who.int/browse/2024-01/mms/ru#437815624> (дата обращения: 28.12.23).
3. Аутизм. – Текст : электронный // Всемирная организация здравоохранения : официальный сайт. – 2023. – 15 ноября. – URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/autism-spectrum-disorders> (дата обращения: 16.11.2023).
4. Аппе, Ф. Введение в психологическую теорию аутизма / Ф. Аппе ; пер. с англ. Д. В. Ермолаева. – Москва : Теревинф, 2016. – URL: https://www.osoboepravo.ru/files/book/file/vvedenie_v_psih_teoriyu_autizma.pdf (дата обращения: 17.12.2023). – Текст : электронный.
5. Mostafa, M. Autism design and architecture for all: architecture for a differently abled world / M. Mostafa. – Текст : непосредственный // Inside Quality Design. – 2021. – № 4. – P. 64–71. – URL: <https://www.autism.archi/single-post/autism-design-and-an-architecture-for-all-designing-for-a-differently-abled-world> (date of the application: 28.12.2023).
6. Mostafa, M. The autism friendly university design guide / M. Mostafa. – Ireland : Dublin City University, 2021. – 116 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/351936605_THE_AUTISM_FRIENDLY_UNIVERSITY_DESIGN_GUIDE (date of the application: 17.12.2023). – Текст : электронный.
7. Gaiani, A. Autism and architecture: the importance of a gradual spatial transition / A. Gaiani, D. Fantoni, S. Katamadze. – DOI 10.30958/aja.8-2-5. – Текст : непосредственный // Athens Journal of Architecture. – 2022. – Vol. 8, No. 2. – P. 175–194. – URL: <https://www.athensjournals.gr/architecture/2022-8-2-5-Gaiani.pdf> (date of the application: 10.01.2024).
8. Проприоцептор. – Текст : электронный // Научно-технический словарь (НТС) : сайт. – URL: <http://nts.sci-lib.com/article0003808.html> (дата обращения: 08.02.24).
9. Проприоцепция. – Текст : непосредственный // Мещеряков, Б. Г. Большой психологический словарь / Б.Г. Мещеряков, В.П. Зинченко. – АСТ-Москва, 2009. – 811 с.
10. Healy, L. Sensory spaces: an architect's guide to designing for children with autism / L. Healy. – Текст : электронный // Architizer : сайт. – URL: <https://architizer.com/blog/inspiration/stories/sensory-design/> (date of application: 29.08.2023).
11. Афонина, М. А. Познание мира людей с аутизмом через ландшафтную архитектуру / М. А. Афонина. – DOI 10.24411/2346-8408-2018-10022. – Текст : непосредственный // Социально-гуманитарное обозрение. – 2018. – Т. 3, № 3. – С. 103–105.
12. Multi-sensory wayfinding: lessons from the margins towards the design of equitable and healthy public space / E. Friedlaender, H. Bauman, Q. Arroyo [et al.]. – DOI 10.1007/978-3-031-36302-3_54. – Текст : непосредственный // Design for Inclusivity. – Cham : Springer International Publishing, 2023. – P. 731–741.
13. Roberts B. Restorative Ground / B. Roberts. – Текст : непосредственный // Inside Quality Design. – 2021. – No. 4. – P. 88–93.
14. Klin, A. Defining and quantifying the social phenotype in autism / A. Klin, W. Jones, R. T. Schultz, F. Volkmar. – DOI 10.1176/appi.ajp.159.6.895. – Текст : непосредственный // American Journal of Psychiatry. – 2002. – No. 159:6. – P. 895–908. – URL: <https://ajp.psychiatryonline.org/doi/full/10.1176/appi.ajp.159.6.895> (date of the application: 28.12.2023).
15. Быстрова, Т. Ю. Графический дизайн для лиц с расстройствами аутистического спектра (РАС) / Т. Ю. Быстрова, Л. В. Токарская, В. А. Грозина. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2016. – № 2 (29). – С. 95–99.

16. Болдырева, В. В. Архитектурные пространства для детей с ограниченными возможностями здоровья / В. В. Болдырева. – Текст : непосредственный // Инновационная наука. – 2021. – № 5. – С. 184–186.
17. Дружелюбная к аутизму среда с точки зрения дизайна помещений. – Текст : электронный // АУТИЗМ – ЭТО. – 2020. – 18 февраля. – URL: <https://autismjournal.help/articles/druzhelyubnaya-k-autizmu-sreda-s-tochki-zreniya-dizayna-pomescheniy> (дата обращения: 11.10.2023).
18. Стимминг. – Текст : электронный // Аутизм.Энциклопедия : сайт. – URL: <https://encyclopedia.autism.help/terms/stimming> (дата обращения: 23.02.2024).
19. Скотт Лав, Дж. Дизайн помещений для аутичных людей / Джоан Скотт Лав. – Текст : электронный // АУТИЗМ – ЭТО. – 2023. – 28 июня. – URL: <https://autismjournal.help/articles/dizayn-pomescheniy-dlya-autichnyh-lyudey> (дата обращения: 11.10.2023).
20. Quirk, V. An Interview with Magda Mostafa: Pioneer in Autism Design / V. Quirk. – Текст : электронный // Arch Daily : сайт. – 2013. – 09 October. – URL: https://www.archdaily.com/435982/an-interview-with-magda-mostafa-pioneer-in-autism-design?ad_campaign=normal-tag (date of application: 30.08.23).

References

1. Lobar, S. L. (2015). DSM-V changes for autism spectrum disorder (ASD): implications for diagnosis, management, and care coordination for children with ASDs. *Journal of Pediatric Health Care*, 30(4), pp. 359-365. (In English). DOI 10.1016/j.pedhc.2015.09.005.
2. 6A02 Autism spectrum disorder. (In Russian). Available at: <https://icd.who.int/browse/2024-01/mms/en#437815624> (accessed 28.12.23).
3. Autism. (In Russian). Available at: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/autism-spectrum-disorders> (accessed 16.11.2023).
4. Happé, F. (1994). *Autism: an introduction to psychological theory*. London, Publ. UCL Press, 152 p. (In English). Available at: https://archive.org/details/autismintroduction000happ_v4n7/page/n167/mode/2up (accessed 17.12.2023).
5. Mostafa, M. (2021). Autism design and architecture for all: architecture for a differently abled world. *Inside Quality Design*, (4), pp. 64-71. (In Italian). Available at: <https://www.autism.archi/single-post/autism-design-and-an-architecture-for-all-designing-for-a-differently-abled-world> (accessed 28.12.2023).
6. Mostafa, M. (2021). *The autism friendly university design guide*. Ireland, Publ. Dublin City University, 116 p. (In English). Available at: https://www.researchgate.net/publication/351936605_THE_AUTISM_FRIENDLY_UNIVERSITY_DESIGN_GUIDE (accessed 17.12.2023).
7. Gaiani, A., Fantoni, D., & Katamadze, S. (2022). Autism and architecture: the importance of a gradual spatial transition. *Athens Journal of Architecture*, 8(2), pp. 175-194. (In English). DOI 10.30958/aja.8-2-5.
8. Proprioceptor. (In Russian). Available at: <http://nts.sci-lib.com/article0003808.html> (accessed 08.02.24).
9. Propriocepciya. From: Meshcheryakov, B. G., & Zinchenko, V. P. (2009). *Bol'shoy psikhologicheskij slovar'*. Moscow, AST Publ., 811 p. (In Russian).
10. Healy, L. Sensory spaces: an architect's guide to designing for children with autism. (In English). Available at: <https://architizer.com/blog/inspiration/stories/sensory-design/> (accessed 29.08.2023).
11. Afonina, M. A. (2018). Knowing the world of people with autism through landscape architecture. *Social-Humanitarian Review*, 3(3), pp. 103-105. (In Russian). DOI 10.24411/2346-8408-2018-10022
12. Friedlaender, E., Bauman, H., Arroyo, Q., Sanders, J. & Mostafa, M. (2023). Multi-sensory wayfinding: lessons from the margins towards the design of equitable and healthy public space. *Design for Inclusivity*. Cham, Publ. Springer International Publishing, pp. 731-741. (In English). DOI 10.1007/978-3-031-36302-3_54.
13. Roberts B. (2021). Restorative Ground. *Inside Quality Design*, (4), pp. 88-93. (In English).
14. Klin, A., Jones, W., Schultz, R. T., & Volkmar, F. (2002). Defining and quantifying the social phenotype in autism. *American Journal of Psychiatry*, (159:6), pp. 895-908. (In English). DOI 10.1176/appi.ajp.159.6.895.
15. Bystrova, T. Y., Tokarskaj, L. V., & Grozina, V. A. (2016). Graphic design for individuals with autism spectrum disorders. *Akademicheskij Vestnik Uralniiproekt RAASN*, (2(29)), pp. 95-99. (In Russian).
16. Boldyreva, V. V. (2021). Arhitekturnye prostranstva dlja detej s ogranichennymi vozmozhnostjami zdorov'ja. *Innovation Science*, (5), pp. 184-186. (In Russian).
17. Druzhelyubnaja k autizmu sreda s tochki zrenija dizajna pomeshhenij. (2020). (In Russian). Available at: <https://autismjournal.help/articles/druzhelyubnaya-k-autizmu-sreda-s-tochki-zreniya-dizajna-pomescheniy> (accessed 11.10.2023).

18. Stimming. (In Russian). Available at: <https://encyclopedia.autism.help/terms/stimming> (accessed 23.02.2024).
19. Scott Love, J. (2023). How to create better homes for autistic people with significant additional needs. (In English). Available at: <https://autismjournal.help/articles/dizayn-pomescheniy-dlya-autichnyh-lyudey> (accessed 11.10.2023).
20. Quirk, V. (2013). An Interview with Magda Mostafa: Pioneer in Autism Design. (In English). Available at: https://www.archdaily.com/435982/an-interview-with-magda-mostafa-pioneer-in-autism-design?ad_campaign=normal-tag (accessed 30.08.23).

Сведения об авторах

Огнева Мария Александровна, ассистент-стажер кафедры архитектуры и градостроительства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: mariogneva09@yandex.ru

Кулачковский Валерий Николаевич, доцент кафедры архитектуры и градостроительства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: vnktyumen@list.ru

Information about the authors

Mariia A. Ogneva, Intern-Assistant at the Department of Architecture and Urban Planning, Industrial University of Tyumen, e-mail: mariogneva09@yandex.ru

Valeriy N. Kulachkovskiy, Associate Professor at the Department of Architecture and Urban Planning, Industrial University of Tyumen, e-mail: vnktyumen@list.ru

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ ОСНОВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТРИАДИЧЕСКОЙ ДЕШИФРОВКИ: ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД

А. С. Гульбинас, Л. В. Белова

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

DEVELOPING A SMART BUILDING CONCEPT BASED ON THE TRIADIC DECODING METHOD: AN EVOLUTIONARY APPROACH

Alexandra S. Gulbinas, Larisa V. Belova

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Настоящее исследование посвящено разработке концептуальных основ архитектурно-строительного проектирования интеллектуальных (умных) зданий, которые в последние годы представляют все больший научно-исследовательский интерес. Гипотезой исследования послужило предположение, что интеллектуальное здание является эволюционным продолжением экологичного здания. Посредством эволюционного подхода, одноуровневой и двухуровневой триадической дешифровки системно-категориальной методологии, общенаучных и графических методов были решены следующие задачи: выявлены компоненты, определяющие содержание дефиниции «интеллектуальное здание» и отражающие ее существенные признаки; основные компоненты структурированы в последовательности их формирования в объекте, а именно – инженерно-техническое оснащение, персонификация пространства, экологичность и ресурсосбережение. Определение и структурирование основных компонентов интеллектуального здания методом триадической дешифровки позволило расширить представление о его сущности, дало более глубокое понимание концептуальных

Abstract. The study focuses on the concept development of the architectural and structural design of intelligent (smart) buildings, which have been of increasing research interest in recent years. The hypothesis of the study was the assumption that smart building was an evolution of green building. Evolutionary approach, single-level and two-level triadic decoding of system-categorical methodology, general scientific and graphic methods helped us to solve the following tasks: 1) to identify the components of the "intellectual building" definition content and reflecting its essential features; 2) to structure the main components (engineering and technical equipment, personification of space, environmental friendliness and resource saving) in the sequence of their formation in the object. The definition and structuring of the main components of an intelligent building by the method of triadic decoding allowed us to expand the idea of its essence, gave a better insight into the conceptual foundations of architectural and construction design of intelligent buildings and outlined the preconditions for its further development.

основ архитектурно-строительного проектирования интеллектуальных зданий и обозначило предпосылки для его дальнейшего развития.

Ключевые слова: умный дом, интеллектуальное здание, автоматизированная система управления зданиями, зеленая архитектура, экологичное здание, системно-категориальная методология, дешифровка категорий

Key words: smart home, intelligent building, automated building management system, green architecture, green building, system-categorical methodology, category decoding

Для цитирования: Гульбинас, А. С. Разработка концептуальной основы интеллектуального здания на основе метода триадической дешифровки: эволюционный подход / А. С. Гульбинас, Л. В. Белова. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-17-28. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 17–28.

For citation: Gulbinas, A. S., & Belova, L. V. (2024). Developing a smart building concept based on the triadic decoding method: an evolutionary approach. Architecture, Construction, Transport, (2(108)), pp. 17-28. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-17-28.

1. Введение

Формирование комфортной жилой среды здания, отвечающей экологическим требованиям, является одной из важнейших задач архитектурно-строительного проектирования. Такое проектирование осуществляется с учетом факторов взаимодействия здания с внешней средой, отвечает экологическим требованиям сохранения окружающей среды и представляет собой экологическую модель. Экологическая модель,

предложенная Б. М. Полуй [1, 2], включает в себя климатические, природные ресурсы и антропогенные факторы, и с этой позиции здание является «комплексной системой взаимодействия жилой среды и природной» [2]. С целью сохранения окружающей среды и повышения экологических качеств зданий были сформулированы нормативные документы, базирующиеся преимущественно на принципах энергосбережения и использовании методов энергетического анализа^{1 2 3 4} [3–5].

¹ ГОСТ Р 54964-2012. Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости. ISO 15392:2008 Sustainability in building construction – General principles (NEQ), ISO/TS 21929-1:2006 Sustainability in building construction – Sustainability indicators – Part 1: Framework for development of indicators for buildings (NEQ), ISO 21930:2007 Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products (NEQ), ISO/TS 21931-1:2010 Sustainability in building construction – Framework for methods of assessment for environmental performance of construction works – Part 1: Buildings (NEQ) : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 августа 2012 г. № 257-ст : введен впервые : дата введения 2013-03-01 / разработан НП «Центр экологической сертификации – зеленые стандарты», ФГБУ «Центральное бюро информации Минприроды России», НОС «НОСТРОЙ», НП «АВОК». – Текст : электронный // База ГОСТ, ГОСТ Р – национальные стандарты России : сайт. – URL: https://rosstandarts.ru/file/gost/13/020/gost_r_54964-2012.pdf (дата обращения: 12.03.2024).

² «Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания = Green building. Buildings and civil construction. Rating estimation of Sustainability in building construction : СТО НОСТРОЙ 2.35-4-2011 : издание официальное : утвержден и введен в действие Решением Совета Национального объединения строителей, протокол от 14 октября 2011 г. № 20 : введен впервые : дата введения 2011-11-11 / разработан НП «АВОК», ОАО «ЦНИИ-Промзданий» и ООО «НПО ТЕРМЭК». – Текст : электронный // Некоммерческое партнерство инженеров : сайт. – URL: www.abok.ru/for_spec/norm_doc/norm/sto-nostroy-2-35-4.pdf (дата обращения: 10.03.2024).

На необходимость применения новых подходов к проектированию жилых зданий также указывают авторы в работе [6] и предлагают рассматривать современное здание как системный объект, «включающий в себя подсистемы микроклимата жилища, архитектурной формы, микроклимата открытых пространств». Разрабатываемая ими модель носит название «Технологическая модель энергосистемы жилища» и базируется на оценке каждого жизненного цикла экологичного здания начиная с технологий производства материалов методами энергетического анализа [6].

Оснащение зданий на всех жизненных циклах объекта строительства современными инженерно-техническими системами, управление которыми возможно без участия человека, позволяет не только вывести на качественно новый уровень эксплуатацию здания, но и сделать его умным (или интеллектуальным). Таким образом, архитектурно-строительное проектирование интеллектуального здания должно учитывать не только экологические требования [7, 8], но и объединять отдельные инженерные системы и подсистемы управления объектами различного назначения в единый управляемый комплекс [8].

Не стоит забывать и о том, что в настоящее время архитектурные решения часто рассматриваются сквозь призму эргоцентризма, когда проектирование внутренней среды учитывает

биоэргономику и эргономику пространства, а также психофизиологические, социокультурные и художественно-эстетические особенности и запросы человека [9] и тем самым персонифицирует жилую среду. Это связано с современной тенденцией проектирования внутренней жилой среды с учетом потребностей конкретного человека и «установкой на индивидуальную целесообразную среду» [10] и возможностью реализации благодаря умным технологиям. Однако многочисленные публикации подчеркивают необходимость обеспечения устойчивости архитектурных решений, в частности, в [11, 12] отмечается, что проект должен удовлетворять потребности сегодняшнего поколения, не ограничивая возможность будущих поколений удовлетворять свои.

Таким образом, целесообразность внедрения концепции интеллектуального здания продиктована современными запросами общества и необходимостью соблюдения определенных требований, в числе которых создание оптимальных параметров внутреннего микроклимата и повышение комфортности внутренней среды здания с учетом эстетических и эксплуатационных составляющих, повышение надежности и долговечности функционирования инженерно-технических систем; обеспечение безопасности протекающих в здании процессов; снижение и эффективное использование потребляемых

³ «Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Учет региональных особенностей в рейтинговой системе оценки устойчивости среды обитания = Green building. Buildings and civil construction. Consideration of regional characteristics in the rating estimation of sustainability in building construction : СТО НОСТРОЙ 2.35.68-2012 : издание официальное : утвержден и введен в действие решением Совета Национального объединения строителей, протокол от 22 июня 2012 г. № 30 : введен впервые / разработан НП «АВОК», ОАО «ЦНИИПромзданий» и ООО «НПО ТЕРМЭК». – Текст : электронный // Некоммерческое партнерство инженеров : сайт. – URL: https://www.abok.ru/for_spec/norm_doc/norm/sto-nostroy-2-35-68.pdf (дата обращения: 12.03.2024).

⁴ Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» : Федеральный закон РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ : принят Государственной Думой 11 ноября 2009 года : одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 года. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения: 11.02.2024).

зданием ресурсов [13–15]. Иными словами, при проектировании и формировании внутренней жилой среды здания должны рассматриваться аспекты охраны окружающей среды и повышения качества жизни человека во взаимодействии с инженерно-техническими системами [16].

Несмотря на широкий интерес к данному вопросу и признание его важности, анализ исследований позволил сделать вывод о недостаточности раскрытия темы в части компонентов, позволяющих запроектировать интеллектуальное здание. В связи с этим *гипотезой исследования* стало предположение, что интеллектуальное здание является эволюционным продолжением экологичного здания, а внедряемые интеллектуальные технологии должны интегрироваться с ресурсосберегающими технологиями экологичного здания. *Целью исследования* стала разработка концептуальной основы интеллектуального здания, представленная в виде дефиниции понятия и структуры компонентов жилой среды здания во взаимодействии с интеллектуальными инженерно-техническими системами в рамках эволюционного подхода. Это позволит проанализировать исследуемый объект в новом аспекте и сформировать структуру компонентов, которые смогут уточнить объект исследования и связать концепции проектирования и эксплуатации интеллектуального здания с экологичным.

Были определены следующие ограничения. Во-первых, предметом исследования являлось некоторое абстрактное здание, обладающее совокупностью свойств зданий разных форм собственности и способов управления и проектируемое с учетом потребностей нынешнего и будущих поколений [11, 12]. Во-вторых, рассматривались не все возможные инженерно-технические системы объекта, а только системы, формирующие микроклиматические параметры в помещениях зданий.

2. Материалы и методы

Исходной методологической установкой исследования являлся системный подход. Интеллектуальное здание рассматривалось как системный объект, каждый элемент которого

может эволюционировать и тем самым переопределить назначение всего объекта. Методологической основой исследования послужили системно-категориальная методология и общенаучные методы (контент-анализ, сравнение, обобщение, систематизация), которые позволили рассмотреть объект в рамках эволюционного подхода.

Метод триадической дешифровки категорий, а именно одноуровневая и двухуровневая дешифровка, в рамках системно-категориальной методологии теории динамических информационных систем [17], разрабатываемой В. И. Разумовым, Г. Д. Боуш, является междисциплинарным и показывает свою продуктивность. В соответствии с категориально-системной методологией главное понятие (исследуемый объект) представляется в виде главной категории. Основная операция, которая проводится с категориями, – дешифровка. Это такая детализация главного понятия, для пояснения которого подбирают категории, наиболее полно его отражающие. При необходимости каждая новая категория подвергается последующей дешифровке.

Данный метод позволил выделить структуру компонентов объекта исследования в виде ключевых категорий, из которых были сформированы триады категорий в последовательности, «отражающей закономерность их формирования в объекте» [17].

Настоящее исследование по методу триадической дешифровки категорий проводилось по следующему алгоритму:

1. Анализ понятия «интеллектуальное здание», являющегося исследуемым объектом, и определение аспектов понятия (таблица 1).
2. Определение набора компонентов и ключевых слов, описывающих исследуемый объект с помощью общенаучных методов.
3. Выделение трех основных блоков категорий **[0], [1], [2]** для первого уровня триадической дешифровки, которые графически отображаются в последовательности формирования в объекте, отвечают на вопросы *что? как? зачем?* [18] и позволяют выявить суть, природу и смысл исследуемого объекта. При этом

метод триадической дешифровки использовался в рамках эволюционного подхода: «интеллектуальное здание» (далее «ИЗ») рассматривалось от «жилища древнего че-

ловека» (далее «жилище») через «экологичное здание» (далее «ЭЗ»). При этом блоки категории определены триадической системой «Природа – Жилище – Человек» [3].

Таблица 1/Table 1

*Анализ понятий «интеллектуальное здание» и «умное здание»
An analysis of the "intelligent building" and "smart building" concepts*

Определение понятия	Аспекты объекта
«Интеллектуальное здание»	
Современная технология управления информационными и инженерными системами здания, обеспечивающая его эффективную эксплуатацию путем оптимизации работы систем и бизнес-процессов [13]	Технология управления; оптимизация работы систем и бизнес-процессов
Здание, обеспечивающее эффективное использование рабочего пространства [15]	Эффективное использование пространства
Система, которая должна уметь распознавать конкретные ситуации, происходящие в здании, и соответствующим образом на них реагировать ⁵	Система, распознающая ситуации и реагирующая на них
Удобный, безопасный, экономичный и престижный тип жилища, интегрирующий современную коммунальную инфраструктуру и передовые технологии в быту [19]	Тип жилища; интеграция инфраструктуры и технологий
Здание, в котором существует свободно программируемый механизм задания взаимодействия между системами жизнеобеспечения [20]	Свободно программируемый механизм задания; взаимодействие между системами жизнеобеспечения
«Умное здание»	
Структурный элемент цифровой экономики, выполняющий собственную уникальную роль для повышения качества жизни [21]	Элемент цифровой экономики; повышение качества жизни
Любая система домашних устройств, способных общаться через сеть с владельцем и между собой, выполнять действия и решать определенные повседневные задачи без участия человека ⁶	Система устройств; общение устройств через сеть; решение задач и выполнение действий без участия человека
Система, которая обеспечивает безопасность, ресурсосбережение и комфорт в здании для всех пользователей ⁷	Система безопасности, ресурсосбережения и комфорта пользователей
Жилой дом современного типа, организованный для удобства проживания людей при помощи высокотехнологичных устройств ⁸	Высокотехнологичные устройства; удобство проживания людей
Здание, сооружение, жилой дом или жилой комплекс, оснащенное(-й) системами умного дома, предназначенными для эффективной, безопасной и комфортной эксплуатации, а также для предоставления сервисов резидентам, посетителям и/или другим заинтересованным сторонам ⁸	Система устройств умного дома
Это сочетание систем управления бытовой аудио-, видеотехникой и системы управления освещением [20]	Системы управления

⁵ Интеллектуальное здание. – Текст : электронный // Академик : словари и энциклопедии на Академике : сайт. – URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/940820> (дата обращения: 23.02.2024).

⁶ Умный дом. – Текст : электронный // TADviser : Государство. Бизнес. Технологии : сайт. – URL : <https://clck.ru/3BPVgN> (дата обращения: 23.02.2024).

⁷ Умное здание. – Текст : электронный // Википедия. Свободная энциклопедия : сайт. – URL : <https://clck.ru/3BPXup> (дата обращения: 23.02.2024).

⁸ ГОСТ Р 71199-2023. Системы киберфизические. Умный дом. Термины и определения = Cyberphysical systems. Smart home. Terms and definition : национальный стандарт РФ : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2023 г. № 1766-ст : введен впервые : дата введения 2024-09-01 / разработан АНО «Умный многоквартирный дом». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1304634007> (дата обращения: 23.02.2024).

4. Формирование и графическое отображение блоков дешифрующих категорий второго уровня [00], [01], [02]; [10], [11], [12] и [20], [21], [22] для определения развернутой структуры категорий второго уровня триадической дешифровки для базовых категорий «ЭЗ» и «ИЗ».
5. Интерпретация, осмысление и описание выявленных категорий для получения структуры компонентов.

Аналитический обзор

С целью определения значимых аспектов исследуемого объекта, а также определения набора ключевых слов и компонентов на предварительном этапе были проанализированы литературные источники. Рассмотрены два основных термина: «интеллектуальное здание» и «умное здание». В общем понимании данные словосочетания являются синонимами. От обычных интеллектуальные здания отличаются особыми инженерно-техническими системами и оборудованием.

Анализ показал, что термин «интеллектуальное здание» чаще используется в научной литературе для обозначения технических систем в общественных зданиях и коммерческих объектах, а термин «умное здание» преимущественно употребляется в публицистической литературе производителями оборудования для жилых зданий и квартир.

Были выделены основные направления активного развития концепций интеллектуального здания с целью персонификации пространства, а именно повышение качества жизни человека во взаимодействии с инженерно-техническими системами:

- инженерно-технические решения, определяющие микроклиматические параметры помещений. Показатели одной из систем могут управлять поведением других по заранее выработанным алгоритмам (например, управление уровнем искусственного освещения в зависимости от уровня естественного, кондиционирование или отопление помещений в зависимости от присутствия людей в помещении или от температуры на-

ружного воздуха, управление вентиляцией в зависимости от содержания углекислого газа в воздухе помещения и т. д.);

- системы безопасности и мониторинга: видеонаблюдение, распознавание лиц и номеров транспорта, определение оставленных предметов, контроль и управление доступом к объекту (квартире или помещению), зональное определение движения, защита от протечек и пр.;
- системы управления и связи: управление программным обеспечением, обслуживание систем глобального позиционирования и информационных систем, систем управления эксплуатацией и бесперебойного энергоснабжения, расход потребления ресурсов. К элементам инженерно-технического оборудования интеллектуального здания относятся:
- центральный контроллер: средство визуализации компонентов сети, контроля и организации удаленного доступа, например, логический контроллер с функциями IP шлюза, и пр.;
- системы и устройства визуализации: панель, программа для смартфона или ПК, с помощью которой настраиваются параметры, запускаются сценарии;
- сенсоры и датчики: фиксируют внешние события и отправляют заданные команды на оборудование;
- исполнительные устройства (акторы, актуаторы): реле различного типа с внешним управлением, способные в автоматическом режиме включать и/или выключать приборы;
- системные устройства: источники питания, соединители, репитеры, шинные соединители, логические модули и т. д.;
- бытовые приборы, оборудование.

В свою очередь, работа инженерно-технического оборудования невозможна без продуманной системы функционирования (прокладки и соединения всех приборов и оборудования в единую интеллектуальную сеть в соответствии с алгоритмом и посредством беспроводной и/или проводной среды передачи данных и определяющих технологию организации подключения) и программно-технического обеспечения (программно-

го обеспечения и сервера, протоколов передачи данных, платформы, облачных хранилищ данных).

3. Результаты и обсуждение

Принципиальная схема «Природа – Жилище – Человек» в качестве исходных понятий включает человека и внешнюю среду с комплексом природно-климатических и антропогенных факторов, «воздействующую на человека через микроклимат зданий и застройки» [3]. С. В. Зоколей отмечал, что в экосистеме здания могут быть выделены: «подсистема внутренней среды, обеспечивающая динамическое равновесие всей экосистемы здания; подсистема здания, включающая материально пространственную структуру системы эксплуатационного оборудования и наполнения здания, т. е. все то, что обеспечивает функционирование здания и возможность пользования им. Наиболее важное значение для формирования искусственной среды обитания человека имеет грамотное строительство "неживой" части общей экосистемы здания, которая включает в себя собственно **подсистему здания** (ограждающие конструкции, инженерные системы) и **подсистему внутренней среды** (внутренний микроклимат)» (ссылка по [3]).

Таким образом, для исследования структуры «интеллектуального здания» были выделены три основных блока категорий (рис. 1а, таблица 2):

[0] «Человек: подсистема здания» – категория, отвечающая на вопрос *что?* и определяющая некоторый физический (материальный) объект;

[1] «Жилище: подсистема внутренней среды» – категория, отвечающая на вопрос *как?* и определяющая методы или технологии;

[2] «Природа: подсистема внешней среды» – категория, отвечающая на вопрос *зачем?* и определяющая некоторые цели и/или масштабируемость объекта исследования.

В рамках эволюционного подхода развитие исследуемого объекта в виде базовой категории «ИЗ» связано с организацией жилища в древности. Допустим, что простое жилище (например, первобытного человека) является прообразом современного здания. При рассмотрении объекта «**жилище**» с помощью метода триадической

дешифровки определяются триады категорий первого уровня: **[0]** «место сна и отдыха», **[1]** «место защиты от окружающей среды» и **[2]** «место приготовления, обработки и хранения пищи» (таблица 2, рис. 1б).

Следующим этапом эволюционного развития определена базовая категория «ЭЗ» [3]. Данная категория дешифруется с учетом эволюции потребностей человека и его возможностей. Категория **[0]** «место сна и отдыха», отвечающая за организацию пространства жилища, трансформируется в категорию первого уровня **[0]** «организация пространства» и разбивается на категории второго уровня, такие как объемно-планировочные решения [00], ограждающие конструкции [01] и инженерно-техническое оснащение [02]. Категория **[1]** «защита от окружающей среды», отображающая защиту от климатических условий, трансформируется в категорию первого уровня **[1]** «микроклиматические условия», а именно – тепловлажностный [10], световой и акустический [11], воздушный режимы [12] (категории второго уровня). Категория первого уровня **[2]** «место для приготовления, обработки и хранения пищи» заменяется категорией **[2]** «материалы и ресурсы» и дешифруется категориями второго уровня: вода и пища (питьевая вода, продукты питания и пр.) [20], ресурсы и энергия (электричество, горячая вода, отопление, газ и т. д.) [21], материалы и отходы (строительные материалы, одежда, мусор, канализация и пр.) [22] (рис. 1с, рис. 2а, таблицы 2 и 3).

В рамках эволюционного подхода исследуемый объект «ИЗ» дешифруется аналогично «ЭЗ». На основании аналитического обзора формируется категория первого уровня **[0]** «инженерно-техническое оснащение». Категория, относящаяся изначально к подсистеме здания и отвечающая за его формообразование, в данном случае определяет создание физической или материальной архитектуры и дешифруется категориями второго уровня: инженерно-техническое оборудование (приборы, сенсоры, датчики и прочее) [00], система функционирования (прокладка или соединение всех приборов, оборудования в единую интеллектуальную сеть) [01], программно-техни-

Таблица 2/Table 2

Дешифровка категорий первого уровня
Decoding of first level categories

Код	Система «Природа – Жилище – Человек»	«Жилище»	«Экологичное здание»	«Интеллектуальное здание»
[0]	Человек: подсистема здания	Место сна и отдыха	Организация пространства	Инженерно-техническое оснащение
[1]	Жилище: подсистема внутренней среды	Защита от окружающей среды	Микроклимат помещений	Персонализация пространства
[2]	Природа: подсистема внешней среды	Пища и хобби	Материалы и ресурсы	Экологичность и ресурсосбережение

Таблица 3/Table 3

Дешифровка категорий второго уровня
Decoding of second level categories

Код	«Экологичное здание»	«Интеллектуальное здание»
[0]	[00] объемно-планировочные решения	[00] инженерно-техническое оборудование
	[01] ограждающие конструкции	[01] система функционирования
	[02] инженерно-техническое оснащение	[02] программно-техническое обеспечение
[1]	[10] тепловлажностный режим	[10] системы управления и связи
	[11] световой и акустический режимы	[11] система безопасности и мониторинга
	[12] воздушный режим	[12] управление инженерно-техническими решениями
[2]	[20] вода и пища	[20] наличие ресурсов и возобновляемых источников энергии
	[21] ресурсы и энергия	[21] ресурсосбережение и энергоэффективность
	[22] материалы и отходы	[22] переработка материалов и отходов

ческое обеспечение (включающее программное обеспечение, наличие связи, протоколы передачи) [02]. Категория первого уровня [1] «персонализация пространства», относящаяся к подсистеме внутренней среды, определяет комфорт обитания человека в помещении и возможности управления системами и включает категории второго уровня: системы управления и связи [10], системы безопасности и мониторинга [11], управление инженерно-техническими решениями [12]. Категория первого уровня [2] «экологичность и ресурсосбережение» дешифруется как наличие ресурсов и возобновляемых источников энергии [20], ресурсосбережение, энергоэффективность [21] и переработка материалов и отходов [22]. На рис. 1d, 2b, в таблицах 2 и 3 представлена структура категорий «ИЗ».

В качестве примера можно назвать здание с экранирующим фасадом, состоящим из подвиж-

ных элементов, которые раскрываются и закрываются в зависимости от инсоляции в течение дня посредством автоматических систем, определяющих изменение положения солнца, и подвижных элементов фасада [22]. Персонализация пространства также позволяет выполнять самостоятельные настройки управления микроклиматическими параметрами (например, теплый пол или кондиционирование воздуха, зональные настройки уровня освещения или использование динамического освещения). Использование природных материалов и ресурсов, их возможная дальнейшая утилизация, как и применение возобновляемых источников энергии, соответствует единой концепции интеллектуального здания и имеет большие перспективы использования.

Представленные в статье основные и поясняющие (дешифрующие) категории позволяют заложить концептуальную основу исследуемого

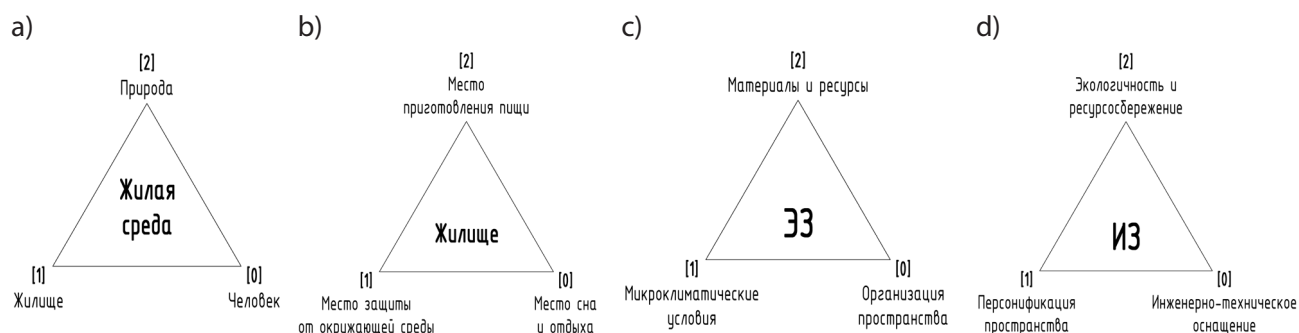


Рис. 1. Одноуровневая триадическая дешифровка категорий: а) начальные категории;

б) категории объекта «жилище»; в) категории объекта «экологичное здание»;

д) категории объекта «интеллектуальное здание» (составлено авторами)

Fig. 1. Single-level triadic decoding of categories: a) initial categories; b) categories of "housing" object;

c) categories of "green building" object; d) categories of "intelligent building" object (proposed by the authors)

объекта. Так, используя результаты одноуровневой дешифровки, можно репрезентировать дефиницию, а именно: интеллектуальное здание – это инженерно-техническое оснащение здания, отвечающее за персонализацию пространства и определяющее экологичность и ресурсосбережение проектных решений. По результатам двухуровневой дешифровки с использованием поясняющих категорий, дефиниция, являющаяся непосредственной концептуальной основой, принимает следующий вид: интеллектуальное здание – это концепция инженерно-технического оснащения (состоящая из инженерно-технического оборудования, системы функционирования и программно-технического обеспечения),

инженерно-технические решения, системы безопасности и мониторинга, а также системы управления и связи, которые отвечают за персонализацию пространства и определяют энергетически эффективное и ресурсосберегающее использование ресурсов (в том числе и возобновляемых источников энергии), а также возможность переработки материалов и отходов.

Разработанная концептуальная основа базируется на компонентах, обеспечивающих современный уровень развития инженерно-технических систем, учитывает экологические и аксиологические требования проектирования и позволяет достичь архитектурной устойчивости проектных решений.

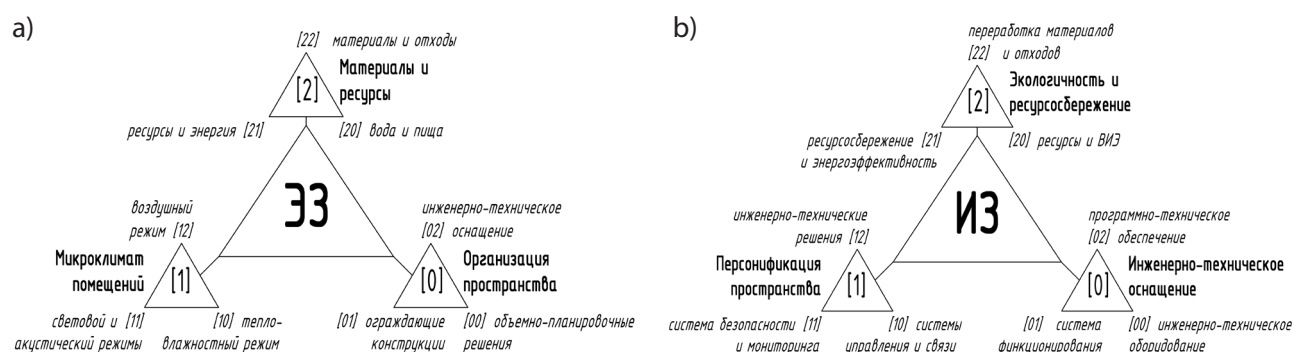


Рис. 2. Двухуровневая триадическая дешифровка категорий: а) категории объекта «экологичное здание»

б) категории объекта «интеллектуальное здание» (составлено авторами)

Fig. 2. Two-level triadic decoding of categories: a) categories of "green building" object;

б) categories of "intelligent building" object (proposed by the authors)

4. Заключение

Развитие интеллектуальных зданий посредством современных технологий инженерно-технического оснащения с учетом аксиологических аспектов формирования среды обитания и индивидуальных потребностей человека в комфорте выходит на новый уровень и имеет большие перспективы. С целью определения структуры основных компонентов, отражающих сущность исследуемого объекта, был использован метод триадической дешифровки системно-категориальной методологии. Новизна исследования заключается в применении эволюционного подхода, который позволил рассмотреть этапы развития здания от «жилища» через «экологичное здание» к «интеллектуальному зданию» и учесть развитие и изменение потребностей человека. Таким образом, с помощью триадической

дешифровки раскрыто содержание дефиниции «интеллектуальное здание» и определена триада категорий, представляющих концептуальную основу компонентов интеллектуального здания, а именно «инженерно-техническое оснащение», «персонификация пространства», «экологичность решений и ресурсосбережение». Разработанная концептуальная основа компонентов дает представление о роли и месте исследуемого объекта в современном мире со стремительно развивающимися технологиями, и позволит в дальнейшем выделить, описать, ограничить, а также разработать критерии выбора вариантов существенных количественных и качественных характеристик интеллектуальных зданий, что сможет повысить практическую значимость результатов исследования и усовершенствовать процесс архитектурно-строительного проектирования зданий.

Библиографический список

1. Полуй, Б. М. Архитектура и градостроительство в суровом климате (экологические аспекты) : учебное пособие / Б. М. Полуй. – Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отделение, 1989. – 300 с. – Текст : непосредственный.
2. Черешнев, И. В. Экологические аспекты формирования малоэтажных жилых зданий для городской застройки повышенной плотности / И. В. Черешнев. – 2-е изд., доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 256 с. – Текст : непосредственный.
3. «Зеленые» решения жилищного строительства на этапах жизненного цикла объекта / И. Л. Владимирова, А. Н. Дмитриев, Г. Ю. Каллаур, А. А. Цыганкова. – DOI 10.33622/0869-7019.2023.05.45-51. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 5. – С. 45–51.
4. Кушнин, А. В. Современные тенденции в сфере малоэтажного энергоэффективного строительства / А. В. Кушнин, Р. И. Шенкман. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-2-58-65. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 2. – С. 58–65.
5. Павлова, С. А. Теория и практика формирования и развития рынка экожиля / С. А. Павлова, А. Н. Ларионов, И. В. Малышев ; под редакцией С. А. Павловой. – Москва : Издательство Современного гуманитарного университета, 2009. – 162 с. – Текст : непосредственный.
6. Черешнев, И. В. Оценка жизненного цикла здания как основа для создания модели технологической энергосистемы жилища / И. В. Черешнев, Н. В. Черешнева, Л. И. Черешнев. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – № 3–4 (92). – С. 252–262.
7. Губа, О. Е. Формирование инженерных систем в современной архитектуре / О. Е. Губа. – DOI 10.36698/2304-5957-2021-20-1-168-174. – Текст : непосредственный // Астраханский вестник экологического образования. – 2021. – № 1 (61). – С. 168–174.
8. Пахомова, М. А. Малоэтажное строительство в России и за рубежом: обзор практик / М. А. Пахомова, А. Б. Храмцов. – DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-20-31. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 3. – С. 20–31.
9. Михайлов, С. М. Принцип эргоцентризма и индуктивный подход в организации предметно-пространственной среды города / С. М. Михайлов, А. С. Михайлова. – DOI 10.17673/IP.2016.1.04.6. – Текст : непосредственный // Innovative Project. – 2016. – Т. 1. – № 4 (4). – С. 43–50.
10. Барсукова, Н. И. Аксиологические основы теории и методологии средового дизайна / Н. И. Барсукова. – Текст : непосредственный // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 9 (128). – С. 21–26.

11. Sandelewski, A. Новый век ОБК: проблемы и перспективы / A. Sandelewski – Текст : непосредственный // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика: АВОК. – 2014. – № 4. – С. 4–14.
12. Есаулов, Г. В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития / Г. В. Есаулов. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 6 (47). – С. 9–24.
13. Кавецкая, Е. А. Автоматизированная система управления как современная технология управления информационными и инженерными системами здания / Е. А. Кавецкая, Е. В. Толкачева. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т. 3, № 4 (14). – С. 836–838.
14. Автоматизированная система управления зданиями как инструмент повышения их энергоэффективности и уровня комфортности / С. Г. Шеина, Е. Н. Миненко, М. Д. Арцишевский, Е. С. Питык. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2 (53). – С. 36.
15. Комаров, Н. М. Управление инженерными системами интеллектуального здания с использованием технологий информационного и инфографического моделирования / Н. М. Комаров, В. Г. Жаров. – Текст : непосредственный // Сервис plus. – 2013. – № 2. – С. 74–81.
16. Режи, Ж. Интеллектуальные, экологичные и энергоэффективные здания / Ж. Режи, Х. Мерби, Х. Туре // Стандарты и качество : международный журнал для профессионалов стандартизации и управления качеством / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 2008. – № 10. – С. 2.
17. Боуш, Г. Д. Методология научного исследования (в кандидатских и докторских диссертациях) / Г. Д. Боуш, В. И. Разумов. – Москва : Инфра-М, 2023. – 227 с. – Текст : непосредственный.
18. Инсейфинг как новая интеллектуальная коммуникация в управлении / Ю. П. Дусь, В. И. Разумов, Л. И. Рыженко, В. П. Сизиков. – Текст : непосредственный // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. – 2014. – № 4. – С. 4–12.
19. Родионов, Р. Б. Интеллектуальное здание: комфорт, безопасность, экономия и престиж / Р. Б. Родионов. – Текст : непосредственный // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2009. – № 2 (121). – С. 81–83.
20. Латышев, Г. Методология построения интеллектуального здания / Г. Латышев. – Текст : непосредственный // Алгоритм безопасности. – 2007. – № 6. – С. 66–68.
21. Китаев, А. Е. Маркетинговое исследование рынка умных домов в цифровой экономике / А. Е. Китаев, И. И. Миронова. – Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5, № 10. – С. 34–46.
22. Башня Аль-Бахар: новый потрясающий фасад в стиле Машрабия. – Текст : электронный // В3АВТРА.NET: инновации в строительстве : сайт. – URL: <https://goo.su/ATLSa8T> (дата обращения: 09.10.2023).

References

1. Poluy, B. M. (1989). *Arkhitktura i gradostroitel'stvo v surovom klimate (ekologicheskie aspekty)*. Leningrad, Sroyzdat Publ., 300 p. (In Russian).
2. Chereshnev, I. V. (2022). *Ekologicheskie aspekty formirovaniya maloetazhnykh zhilykh zdaniy dlya gorodskoy zastroyki povyshennoy plotnosti*. 2nd edition, revised. Saint Petersburg, Lan' Publ., 256 p. (In Russian).
3. Vladimirova, I. L., Dmitriev, A. N., Kallaur, G. Y., & Tsygankova, A. A. (2023). "Green" solutions for housing construction at the stages of the life cycle of an object. *Industrial and Civil Engineering*, (5), pp. 45-51. (In Russian). DOI 10.33622/0869-7019.2023.05.45-51.
4. Kushnin, A. V., & Shenkman, R. I. (2022). Current trends in low-rise energy-efficient construction. *Architecture, Construction, Transport*, (2(100)), pp. 58-65. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2022-2-58-65.
5. Pavlova, S. A., Larionov, A. N., & Malyshev, I. V. (2009). *Teoriya i praktika formirovaniya i razvitiya rynka ekozhil'ya*. Moscow, Modern University for the Humanities Publ., 162 p. (In Russian).
6. Chereshnev, I. V., Chereshneva, N. V., & Chereshnev, L. I. (2023). Building life cycle assessment as the basis for creating a model of the technological energy system of the dwelling. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, (3-4(92)), pp. 252-262. (In Russian).
7. Guba, O. E. (2021). The engineering systems in the modern architecture. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, (1(61)), pp. 168-174. (In Russian). DOI 10.36698/2304-5957-2021-20-1-168-174.

8. Pakhomova, M. A., & Khramtsov, A. B. (2022). Low-rise construction in Russia and abroad: a review of practices. *Architecture, Construction, Transport*, (3(101)), pp. 20-31. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-20-31.
9. Mikhaylov, S. M., & Mikhaylova, A. S. (2016). The principle of ergocentrism and inductive approach in the organization of the subject and spatial environment of the city. *Innovative project*, 1(4), pp. 43-50. (In Russian). DOI 10.17673/IP.2016.1.04.6.
10. Barsukova, N. I. (2011). *Aksiologicheskie osnovy teorii i metodologii sredovogo dizayna*. Vestnik of the Orenburg State University, (9(128)), pp. 21-26. (In Russian).
11. Sandelewski, A. (2014). Novyy vek OVK: problemy i perspektivy. *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika: AVOK*, (4), pp. 4-14. (In Russian).
12. Esaulov, G. V. (2014). Sustainable architecture: from approaches to strategy of development. *Journal of Construction and Architecture*, (6(47)), 9-24. (In Russian).
13. Kaveckaya, E. A., & Tolkasheva, E. V. (2018). Automated control system as a modern technology of information management and engineering systems of the building. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 3(4(14)), pp. 836-838. (In Russian).
14. Sheina, S. G., Minenko, E. N., Artsishevsky, M. D., & Pityk, E. S. (2019). Automated building management system as a tool to improve their energy efficiency and comfort level. *Engineering Journal of Don*, (2(53)), P. 36. (In Russian).
15. Komarov, N. M., & Zharov, V. G. (2013). Upravlenie inzhenernymi sistemami intellektual'nogo zdaniya s ispol'zovaniem tekhnologiy informatsionnogo i infograficheskogo modelirovaniya. *Service Plus*, (2), pp. 74-81. (In Russian).
16. Rezh, Zh., Merbi, Kh., & Ture, Kh. (2008). Intellektual'nye, ekologichnye i energoэффективnye zdaniya. *Standarty i kachestvo: mezhdunarodnyy zhurnal dlya professionalov standartizatsii i upravleniya kachestvom*, (10), p. 2. (In Russian).
17. Boush, G. D., & Razumov, V. I. (2023). *Metodologiya nauchnogo issledovaniya (v kandidatskikh i doktorskikh dissertatsiyakh)*. Moscow, Infra-M Publ., 227 p. (In Russian).
18. Dus, Yu. P., Razumov, V. I., Ryzenko, L. I., & Sizikov, V. P. (2014). Insafing as a new intellectual communication in management. *Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management*, (4), pp. 4-12. (In Russian).
19. Rodionov, R. B. (2009). An intellectual building: comfort, safety, economy and fashion. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*, (2(121)), pp. 81-83. (In Russian).
20. Latyshev, G. (2007). Metodologiya postroeniya intellektual'nogo zdaniya. *Algoritm bezopasnosti*, (6), pp. 66-68. (In Russian).
21. Kitaev, A., & Mironova, I. (2017). Market research of smart houses industry in the digital economy. *International Journal of Open Information Technologies*, (5(10)), pp. 34-46. (In Russian).
22. Bashnya Al'-Bakhar: novyy potryasayushchiy fasad v stile Mashrabiya. VZAVTRA.NET: innovatsii v stroitel'stve. (In Russian). Available at: <https://goo.su/ATLSa8T> (accessed 09.10.2023).

Сведения об авторах

Гульбинас Александра Сергеевна, старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и графики, Тюменский индустриальный университет, e-mail: gulbinasas@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-6258-2833

Белова Лариса Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, заведующая кафедрой начертательной геометрии и графики, Тюменский индустриальный университет, e-mail: belovalv@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7279-3618

Information about the authors

Alexandra S. Gulbinas, Senior Lecturer at the Department of Descriptive Geometry and Graphics, Industrial University of Tyumen, e-mail: gulbinasas@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-6258-2833

Larisa V. Belova, Cand. Sc. 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: belovalv@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7279-3618

АСТ

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

Уважаемые авторы и читатели!

Вы можете оформить подписку на журнал
«Архитектура, строительство, транспорт»
любым удобным для Вас способом:

- через электронный каталог «Пресса России» на сайте **www.pressa-rf.ru**
- через интернет-магазин «Пресса по подписке» на сайте **www.akc.ru**



Адрес редакции:
625001, г. Тюмень,
ул. Луначарского, 2,
каб. 117
Тел.: (3452) 28-37-50
e-mail: ast@tyuiu.ru

Подписной индекс
журнала 79619

УДК 624.074.1

2.1.1 Строительные конструкции, здания
и сооружения (технические науки)

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОПЕРЕЧНОГО И ПРОДОЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В 3-СЛОЙНОЙ ПЛИТЕ ДПК (CLT), СМОДЕЛИРОВАННОЙ КАК СОСТАВНАЯ ПЛАСТИНА

М. Ю. Трошин, А. В. Турков, А. В. Заев

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

EFFECT OF TRANSVERSE AND LONGITUDINAL LAYER THICKNESS ON DEFORMATIONS AND STRESSES IN A THREE-LAYER CLT PANEL MODELED AS A COMPOSITE PLATE

Mikhail Yu. Troshin, Andrei V. Turkov, Alexey V. Zaev

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

Аннотация. В исследовании рассмотрено влияние толщины поперечного и продольных слоев трехслойной плиты из древесины перекрестно-клееной на деформации и распределение возникающих растягивающих и сжимающих нормальных напряжений в слоях. В связи с тем, что в настоящее время нет единой методики расчета многослойных материалов с ортотропными свойствами в слоях, исследование проведено с использованием вычислительного комплекса SCAD+ с помощью метода конечных элементов. Исследуемая модель представляла собой составную ортотропную пластину. Были получены, систематизированы и наглядно показаны зависимости значений максимального прогиба и нормальных напряжений от изменения толщины поперечного и продольных ламелей в трехслойной плите из древесины перекрестно-клееной при различных граничных условиях. В результате исследования определено, что наибольшее влияние на величину прогиба и нормальных напряжений вдоль пролета оказывают продольные

Abstract. The study examines the effect of the transverse and longitudinal layers thickness of a three-layer CLT panel on the deformations and distribution of the resulting tensile and compressive normal stresses in the layers. Due to the current lack of a unified methodology for the calculation of multilayer materials with orthotropic properties in layers at present, we carried out the study with the SCAD+ computing complex using the finite element method. The studied model was a composite orthotropic plate. The authors obtained, systematized and clearly showed the dependences of the values of the maximum deflection and normal stresses on the thickness variation of transverse and longitudinal lamellae in a three-layer CLT panel under different boundary conditions. As a result of the study, we found that the greatest influence on the deflection and normal stresses along the span was caused by the longitudinal slab layers. The results provide a better insight into the relationship between deformability and stress distributions and the variation of transverse and longitudinal layer

слои плиты. Полученные результаты дают более глубокое понимание взаимосвязи деформативности и распределений напряжений и изменения толщины поперечного и продольного слоев, а полученные закономерности могут быть использованы при проектировании строительных конструкций с применением ДПК.

Ключевые слова: деревянные конструкции, древесина перекрестноклееная, CLT-панели, распределение напряжений, прогиб, составные пластины, многослойные конструкции

thicknesses. The obtained patterns can be used in the design of building structures using CLT panel.

Key words: timber structures, cross-laminated timber, CLT panel, stress distribution, deflection, composite plates, multilayer structures

Для цитирования: Трошин, М. Ю. Влияние толщины поперечного и продольных слоев на деформации и напряжения в 3-слойной плите ДПК (CLT), смоделированной как составная пластина / М. Ю. Трошин, А. В. Турков, А. В. Заев. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-30-41. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 30–41.

For citation: Troshin, M. Yu., Turkov, A. V., & Zaev, A. V. (2024). Effect of transverse and longitudinal layer thickness on deformations and stresses in a three-layer CLT panel modeled as a composite plate. Architecture, Construction, Transport, (2(108)), pp. 30-41. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-30-41.

1. Введение

В последние десятилетия древесина перекрестноклееная (ДПК), или CLT-панель, широко используется как в малоэтажном, так и в среднеэтажном строительстве. Данный материал получил распространение в странах Западной Европы и России благодаря своей экологичности, технологичности, эстетичному внешнему виду, малому весу, а также высоким показателям несущей способности. Перспективы развития деревянного домостроения с применением плит из ДПК отражены в работе [1].

Характерной особенностью древесины всех пород является анизотропия, поэтому перекрестная склейка способствует не только увеличению сдвиговой жесткости конструкции за счет клеевого слоя между слоями досок, но и увеличению жесткости при поперечном изгибе за счет перекрестного расположения досок [2]. Ввиду того, что вариаций конструктивных решений плит на основе древесины существует большое количество, актуальным остается вопрос исследования несущей способности и деформативности плит из ДПК при изменении толщины слоев конструкции.

Кроме того, важным является изучение данного влияния при различных видах опирания конструкции, так как они могут оказывать значительное воздействие на максимальные прогибы и распределение нормальных напряжений.

Ранее авторами проводились исследования плит из древесины перекрестноклееной на деформативность и несущую способность. Вычисления производились в SCAD+ с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Конструкция была смоделирована из объемных конечных элементов с шарнирным опиранием с двух сторон плиты [3–4]. В настоящей статье на основании [5] была смоделирована расчетная схема в виде ортотропной составной пластины. Исследование данной схемы при других геометрических изменениях описано в работе [6]. Научный интерес к плитам из ДПК подтверждается большим пластом работ, посвященным различным аспектам: соединениям [7], поведению при нагрузках [8, 9], способам расчета [10–13] и т. д. Исследованию

несущей способности посвящены в частности работы [14, 15], в которых представлен большой объем данных для установления нормативных и расчетных значений упругих характеристик ДПК. Отличительной особенностью настоящего исследования является рассмотрение влияния изменения геометрических параметров слоев плиты при различных видах опирания плиты и применение расчетной схемы в виде составной ортотропной пластины.

Целью данного исследования являлось определение влияния толщины поперечного и продольных слоев трехслойной плиты из ДПК на распределение напряжений и деформативность в слоях при различных условиях опирания. Результаты исследования позволяют выделить общие закономерности изменения максимальных прогибов и напряжений при вариации толщины поперечного и продольных слоев ламелей.

2. Материалы и методы

Исследования были проведены численным методом в вычислительном комплексе SCAD+. Расчетная схема определена как составная пластина с ортотропными свойствами в перекрестных слоях. Была смоделирована трехслойная плита из ДПК с продольными наружными и поперечным внутренним слоями. Для обеспечения высокой точности вычислений были выбраны пластинчатые КЭ размером 50×50 мм. Связи между слоями представляли собой стержни с очень высокой жесткостью $EA = 5 \cdot 10^4$ кН во избежание их влияния на прогиб плиты и были разделены на два вида: связи сдвига, препятствующие сдвигающим деформациям слоев, и поперечные связи, не позволяющие сближаться или отдаляться слоям друг от друга. Общий вид КЭ в слоях составной пластины представлен на рис. 1.

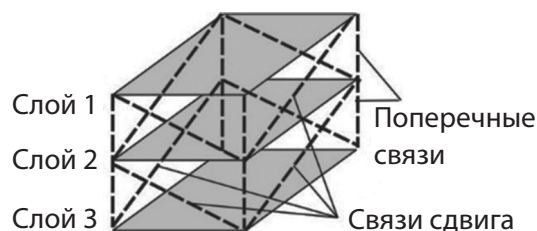


Рис. 1. Конечные элементы в слоях составной пластины в трехслойной плите из ДПК

Fig. 1. Finite elements in composite plate layers in a three-layer CLT panel

Для расчета были смоделированы три вида граничных условий: шарнирно-подвижная опора с одной стороны и шарнирно-неподвижная с другой (шарнирное опирание); жесткое защемление с двух сторон; жесткое защемление с одной стороны и шарнирно-подвижная опора с другой (жесткое защемление с шарниром). Нагружение плиты задавалось равномерно распределенной нагрузкой на верхний слой составной пластины равной 0.285 кН/м. Конструкция имела пролет 5890 мм и ширину 1140 мм. Ширина ламелей в слоях – 190 мм, толщина – 42 мм. Расчетные схемы конструкции изображены на рис. 2.

Плита из ДПК является конструкцией с ортотропными свойствами слоев, поэтому слоям составной пластинки назначены жесткости с различным значением модулей упругости вдоль осей OX и OY , модуля сдвига и коэффициентов Пуассона, числовые значения которых приняты в соответствии с нормативной документацией СП 64.13330.2017¹:

- в продольном направлении: $E_x = 4 \cdot 10^5$ кН/м², $E_y = 1 \cdot 10^7$ кН/м², $G_{xy} = 5 \cdot 10^5$ кН/м², $\nu_{xy} = 0.45$, $\nu_{yx} = 0.018$.
- в поперечном направлении: $E_{x90} = 1 \cdot 10^7$ кН/м², $E_{y90} = 4 \cdot 10^5$ кН/м², $G_{xy90} = 5 \cdot 10^5$ кН/м², $\nu_{xy90} = 0.018$, $\nu_{yx90} = 0.45$.

¹ 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).

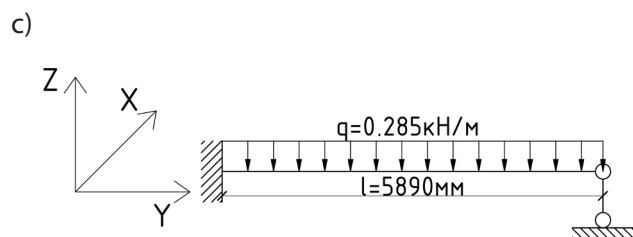
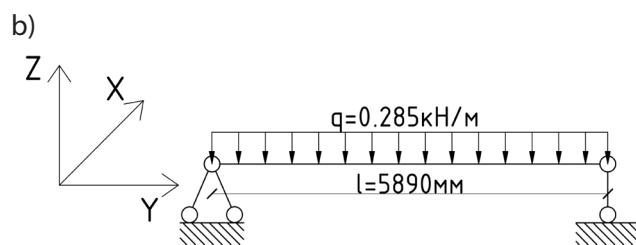
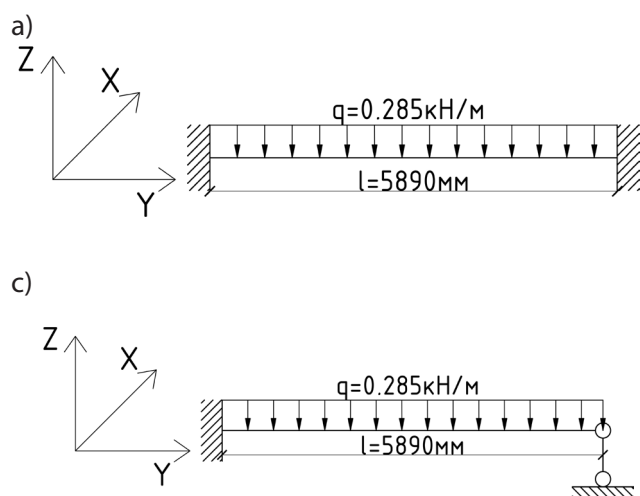


Рис. 2. Расчетные схемы трехслойной плиты из ДПК с граничными условиями: а) жесткое защемление; б) шарнирное опирание; в) жесткое защемление с шарниром

Fig. 2. Calculation diagrams of a three-layer CLT panel with boundary conditions: a) rigid restraint; b) hinged bearing; c) rigid restraint with a hinge

3. Результаты

Для изучения основных зависимостей деформаций и напряжений от изменения толщины поперечных и продольных слоев были рассмотрены конструкции плиты из ДПК при постоянной толщине продольных слоев с варьируемой толщиной поперечного слоя, составляющей 9, 12, 18, 25, 32 и 42 мм. Также были рассмотрены конструкции с постоянной толщиной поперечного слоя и варьируемой толщиной продольных слоев, составляющей 9, 12, 18, 25, 32 и 42 мм.

Для подробного изучения распределения нормальных напряжений конечные элементы были организованы по группам в соответствии со слоем, которому принадлежит данный КЭ. На-

ружным продольным слоям присвоены номера 1 и 3, внутреннему поперечному – 2.

Был произведен линейный расчет многофронтальным методом в SCAD+, в результате которого получены данные с результатами вычислений при изменяемой толщине поперечного слоя (таблица 1). Для получения более полной картины были отобраны выборки максимальных растягивающих (со знаком +) и максимальных сжимающих (со знаком –) нормальных напряжений. Для наглядности построены графики влияния толщины поперечного слоя плиты из ДПК на максимальный прогиб и напряжения σ_y (вдоль пролета) и σ_x (поперек пролета) в плите при различных видах опирания конструкции (рис. 3–5).

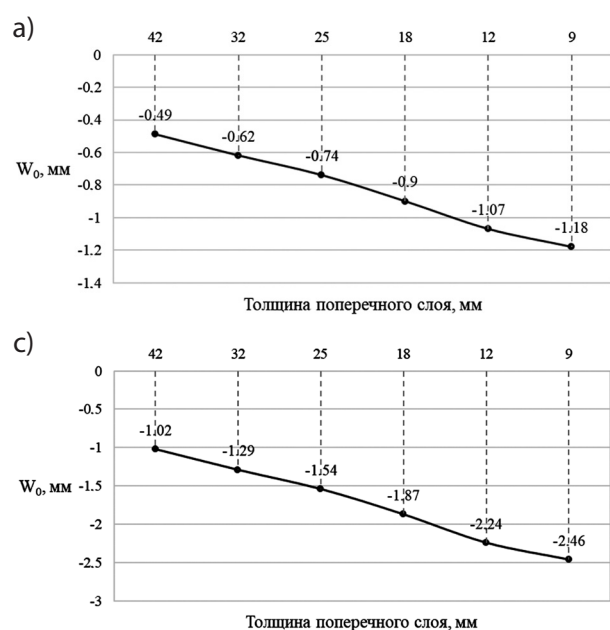
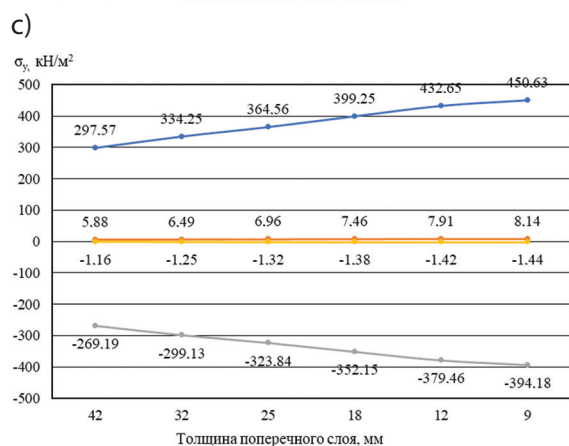
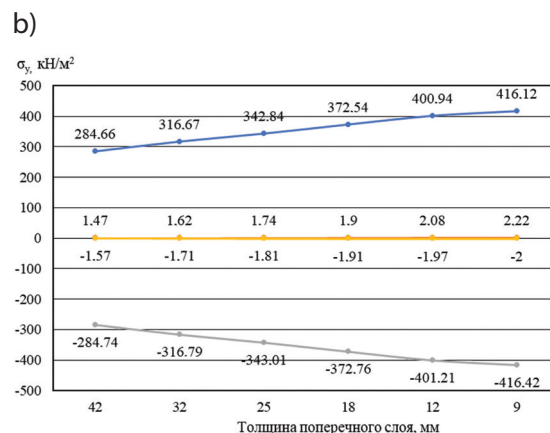
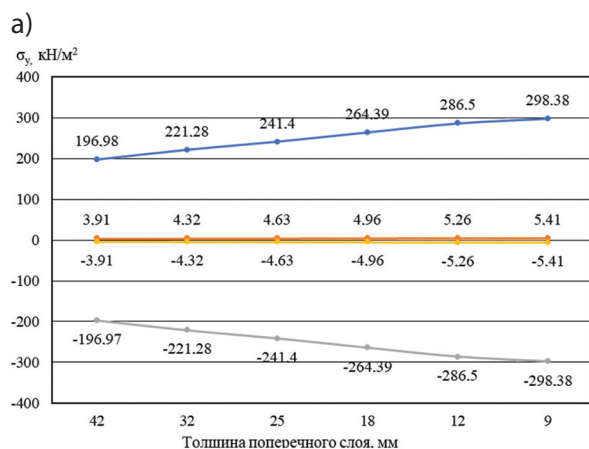


Рис. 3. Зависимость максимального прогиба от толщины поперечного слоя: а) жесткое защемление на обеих опорах; б) шарнирное опирание на обеих опорах; в) жесткое защемление с шарниром

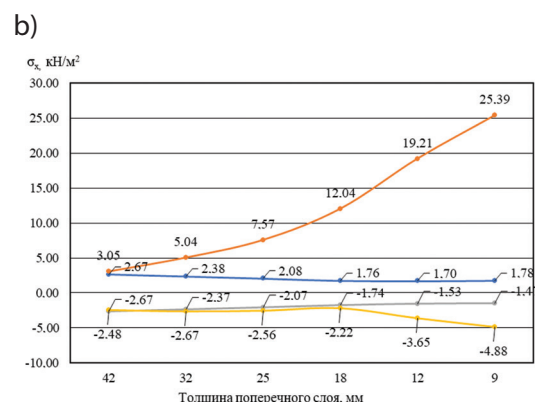
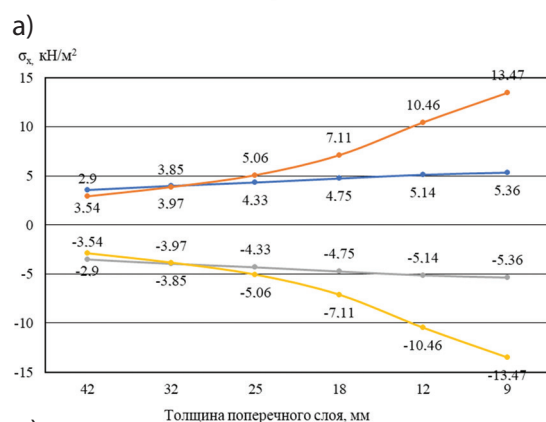
Fig. 3. Dependence of maximum deflection on the transverse layer thickness: a) rigid restraint on both supports; b) hinged bearing on both supports; c) rigid restraint with a hinge



— 1,3 слой (растяжение) — 1,3 слой (сжатие)
— 2 слой (растяжение) — 2 слой (сжатие)

Рис. 4. Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y от толщины поперечного слоя: а) жесткое защемление на обеих опорах; б) шарнирное опирание на обеих опорах; в) жесткое защемление с шарниром

Fig. 4. Dependence of tensile and compressive normal stresses σ_y on the transverse layer thickness: a) rigid restraint on both supports; b) hinged bearing on both supports; c) rigid restraint with a hinge



— 1,3 слой (растяжение) — 1,3 слой (сжатие)
— 2 слой (растяжение) — 2 слой (сжатие)

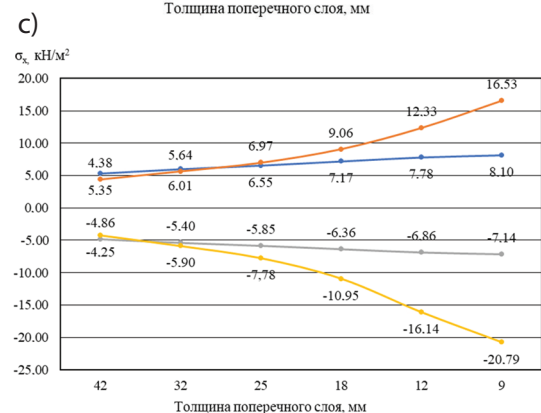


Рис. 5. Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_x от толщины поперечного слоя: а) жесткое защемление на обеих опорах; б) шарнирное опирание на обеих опорах; в) жесткое защемление с шарниром

Fig. 5. Dependence of tensile and compressive normal stresses σ_x on the transverse layer thickness: a) rigid restraint on both supports; b) hinged bearing on both supports; c) rigid restraint with a hinge

Таблица 1/ Table 1
Зависимость деформаций и нормальных напряжений трехслойной плиты ДПК от толщины поперечного слоя при различных граничных условиях
Dependence of deformations and normal stresses of a three-layer CLT panel on the transverse layer thickness under different boundary conditions

Исследуемые слои	Толщина поперечного слоя, мм	Максимальный прогиб W_0 , мм, при условии опирания:			Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{уст}$, кН/м ² , при условии опирания:			Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{сжат}$, кН/м ² , при условии опирания:			Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{хрст}$, кН/м ² , при условии опирания:			Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{хсжат}$, кН/м ² , при условии опирания:		
		жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром	жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром	жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром	жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром	жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром
1, 3	42	-0.49	-2.45	-1.02	196.98	284.66	297.57	-196.97	-284.74	-269.19	3.54	2.67	5.35	-3.54	-2.67	-4.86
	32	-0.62	-3.09	-1.29	221.28	316.67	334.25	-221.28	-316.79	-299.13	3.97	2.38	6.01	-3.97	-2.37	-5.40
	25	-0.74	-3.70	-1.54	241.40	342.84	364.56	-241.40	-343.01	-323.84	4.33	2.08	6.55	-4.33	-2.07	-5.85
	18	-0.90	-4.50	-1.87	264.39	372.54	399.25	-264.39	-372.76	-352.15	4.75	1.76	7.17	-4.75	-1.74	-6.36
	12	-1.07	-5.38	-2.24	286.50	400.94	432.65	-286.50	-401.21	-379.46	5.14	1.70	7.78	-5.14	-1.53	-6.86
2	9	-1.18	-5.91	-2.46	298.38	416.12	450.63	-298.38	-416.42	-394.18	5.36	1.78	8.10	-5.36	-1.47	-7.14
	42	-0.49	-2.45	-1.02	3.91	1.47	5.88	-3.91	-1.57	-1.16	2.90	3.05	4.38	-2.90	-2.48	-4.25
	32	-0.62	-3.09	-1.29	4.32	1.62	6.49	-4.32	-1.71	-1.25	3.85	5.04	5.64	-3.85	-2.67	-5.90
	25	-0.74	-3.70	-1.54	4.63	1.74	6.96	-4.63	-1.81	-1.32	5.06	7.57	6.97	-5.06	-2.56	-7.78
	18	-0.90	-4.50	-1.87	4.96	1.90	7.46	-4.96	-1.91	-1.38	7.11	12.04	9.06	-7.11	-2.22	-10.95
	12	-1.07	-5.38	-2.24	5.26	2.08	7.91	-5.26	-1.97	-1.42	10.46	19.21	12.33	-10.46	-3.65	-16.14
	9	-1.18	-5.91	-2.46	5.41	2.22	8.14	-5.41	-2.00	-1.44	13.47	25.39	16.53	-13.47	-4.88	-20.79

Как видно на рис. 3, наибольшее значение прогиба при изменении толщины поперечного слоя – 5.91 мм – достигается при шарнирном опирании плиты. При этом наибольшее нормальное напряжение вдоль пролета плиты σ_y , как следует из рис. 4, возникает в растянутом слое плиты при жестком закреплении с шарниром и составляет 450.63 кН/м². Значения нормальных напряжений

σ_x значительно ниже, чем значения σ_y . Данный факт свидетельствует о том, что при расчете плит подобных конструкций особое внимание следует уделять именно напряжениям σ_y . Подобным образом были проведены исследования трехслойных плит из ДПК с изменяемой толщиной продольных слоев. Результаты вычислений сведены в таблицу 2, построены аналогичные графики (рис. 6–8).

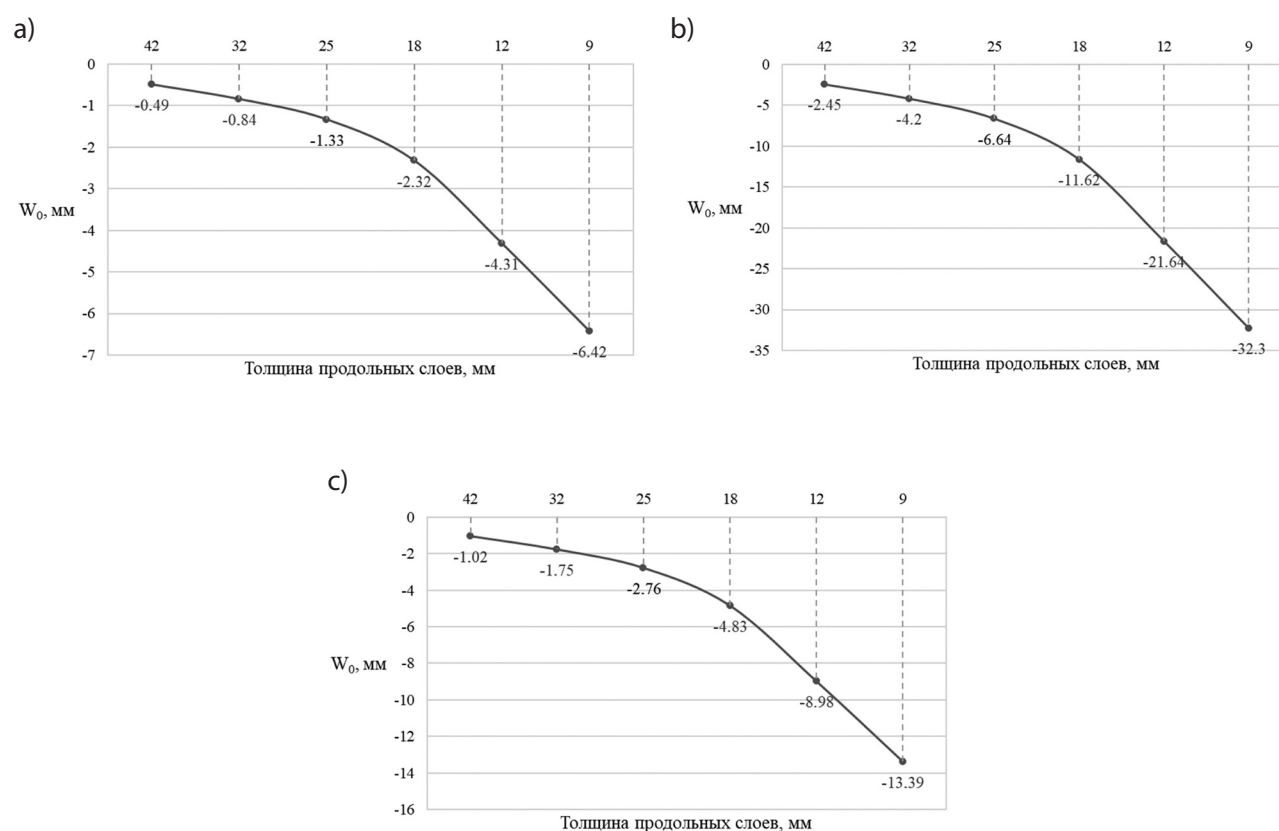


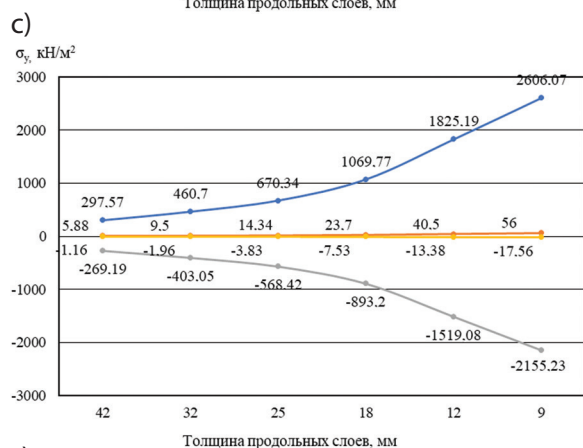
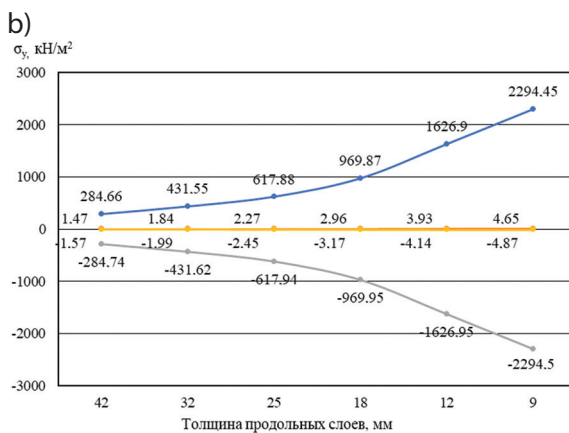
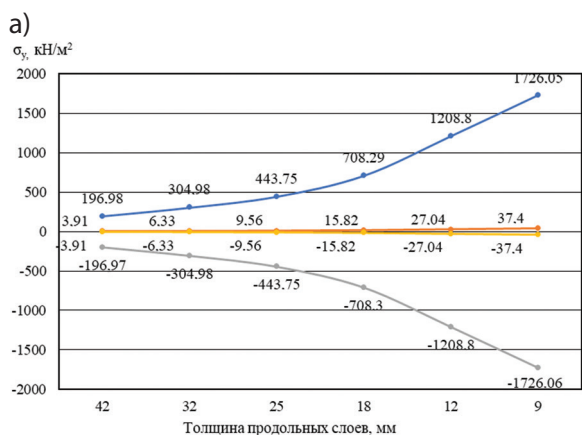
Рис. 6. Зависимость максимального прогиба от толщины продольных слоев:
а) жесткое защемление на обеих опорах; б) шарнирное опирание на обеих опорах;
в) жесткое защемление с шарниром

Fig. 6. Dependence of maximum deflection on the longitudinal layers thickness:
а) rigid restraint on both supports; б) hinged bearing on both supports;
в) rigid restraint with a hinge

Рис. 6–8 свидетельствуют о том, что при изменении толщины продольных слоев сохраняются те же тенденции, что и при изменении толщины поперечного слоя, однако влияние на деформации и напряжения значительно выше. Это связано с тем, что значение модуля упругости

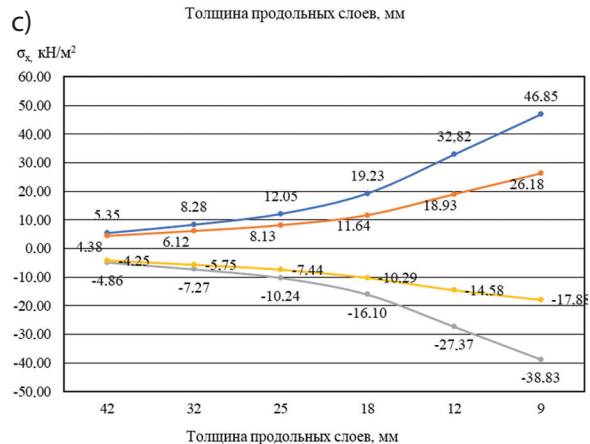
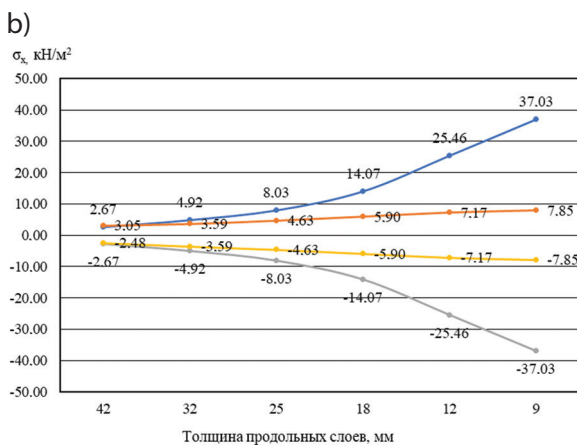
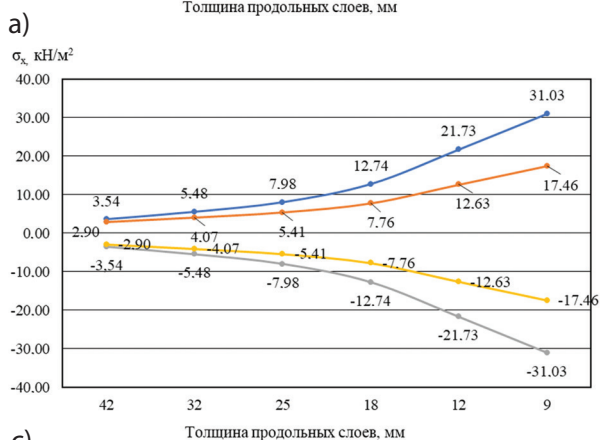
древесины вдоль волокон значительно выше, чем поперек.

Кроме того, при уменьшении толщины продольных слоев площадь поперечного сечения плиты уменьшается сильнее, чем при уменьшении толщины поперечного слоя.



— 1,3 слой (растяжение) — 1,3 слой (сжатие)
— 2 слой (растяжение) — 2 слой (сжатие)

Рис. 7. Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y от толщины продольных слоев: а) жесткое защемление на обеих опорах; б) шарнирное опирание на обеих опорах; в) жесткое защемление с шарниром
Fig. 7. Dependence of tensile and compressive normal stresses σ_y on the longitudinal layers thickness: a) rigid restraint on both supports; b) hinged bearing on both supports; c) rigid restraint with a hinge



— 1,3 слой (растяжение) — 1,3 слой (сжатие)
— 2 слой (растяжение) — 2 слой (сжатие)

Рис. 8. Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_x от толщины продольных слоев: а) жесткое защемление на обеих опорах; б) шарнирное опирание на обеих опорах; в) жесткое защемление с шарниром
Fig. 8. Dependence of tensile and compressive normal stresses σ_x on the longitudinal layers thickness: a) rigid restraint on both supports; b) hinged bearing on both supports; c) rigid restraint with a hinge

Таблица 2/ Table 2
Зависимость деформаций и нормальных напряжений трехслойной плиты ДПК от толщины продольных слоев при различных граничных условиях
Dependence of deformations and normal stresses of a three-layer CLT panel on the longitudinal layers thickness under different boundary conditions

Исследуемые слои	Толщина продольных слоев, мм	Максимальный прогиб W_0 , мм, при условии опирания:			Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{\text{раст}}^{\text{н}} \text{ кН/м}^2$, при условии опирания:			Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{\text{сжат}}^{\text{н}} \text{ кН/м}^2$ при условии опирания:			Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{\text{раст}}^{\text{н}} \text{ кН/м}^2$ при условии опирания:			Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{\text{сжат}}^{\text{н}} \text{ кН/м}^2$ при условии опирания:		
		жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром	жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром	жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром	жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром	жесткое защемление	шарнирное	жесткое защемление с шарниром
1, 3	42	-0.49	-2.45	-1.02	196.98	284.66	297.57	-196.97	-284.74	-269.19	3.54	2.67	5.35	-3.54	-2.67	-4.86
	32	-0.84	-4.20	-1.75	304.98	431.55	460.70	-304.98	-431.62	-403.05	5.48	4.92	8.28	-5.48	-4.92	-7.27
	25	-1.33	-6.64	-2.76	443.75	617.88	670.34	-443.75	-617.94	-568.42	7.98	8.03	12.05	-7.98	-8.03	-10.24
	18	-2.32	-11.62	-4.83	708.29	969.87	1069.77	-708.30	-969.95	-893.20	12.74	14.07	19.23	-12.74	-14.07	-16.10
	12	-4.31	-21.64	-8.98	1208.80	1626.90	1825.19	-1208.80	-1626.95	-1519.08	21.73	25.46	32.82	-21.73	-25.46	-27.37
2	9	-6.42	-32.30	-13.39	1726.05	2294.45	2606.07	-1726.06	-2294.50	-2155.23	31.03	37.03	46.85	-31.03	-37.03	-38.83
	42	-0.49	-2.45	-1.02	3.91	1.47	5.88	-3.91	-1.57	-1.16	2.90	3.05	4.38	-2.90	-2.48	-4.25
	32	-0.84	-4.20	-1.75	6.33	1.84	9.50	-6.33	-1.99	-1.96	4.07	3.59	6.12	-4.07	-3.59	-5.75
	25	-1.33	-6.64	-2.76	9.56	2.27	14.34	-9.56	-2.45	-3.83	5.41	4.63	8.13	-5.41	-4.63	-7.44
	18	-2.32	-11.62	-4.83	15.82	2.96	23.70	-15.82	-3.17	-7.53	7.76	5.90	11.64	-7.76	-5.90	-10.29
	12	-4.31	-21.64	-8.98	27.04	3.93	40.50	-27.04	-4.14	-13.38	12.63	7.17	18.93	-12.63	-7.17	-14.58
	9	-6.42	-32.30	-13.39	37.40	4.65	56.00	-37.40	-4.87	-17.56	17.46	7.85	26.18	-17.46	-7.85	-17.88

4. Заключение

По результатам исследований влияния толщины поперечного и продольных слоев на деформативность и распределение нормальных напряжений в трехслойной плите из древесины перекрестноклееной, смоделированной как составная пластина, при действии статической равномерно-распределенной нагрузки и различных граничных условиях было выявлено следующее:

- наибольшее значение максимального прогиба в плите достигается при шарнирном опирании. При этом влияние толщины продольных слоев больше, чем влияние толщины поперечных. Так, при минимальной толщине поперечного слоя прогиб равняется –5.31 мм, а при минимальной толщине продольных слоев составляет –32.3 мм. Это связано с тем, что модуль упругости вдоль волокон у древесины значительно выше, чем поперек волокон;
- при уменьшении толщины поперечного и продольных слоев наибольшие нормальные напряжения σ_y регистрируются в наружных слоях плиты. При этом при уменьшении толщины продольных слоев это значение в несколько раз выше, чем при уменьшении толщины поперечного слоя. Для шарнирного опирания при толщине продольных слоев 9 мм нормальные напряжения в наружных слоях плиты $\sigma_y = 2\,294.5$ кН/м², а при толщине поперечного слоя 9 мм нормальные напряжения в наружных слоях плиты $\sigma_y = 416.12$ кН/м² (разница > 5 раз);
- нормальные напряжения σ_x в наружных слоях значительно ниже, чем нормальные напряжения σ_y независимо от вида опирания и от того, толщина каких слоев изменяется. Так, при жестком защемлении плиты с толщиной продольных слоев 25 мм нормальные растягивающие напряжения $\sigma_y = 443.75$ кН/м², а $\sigma_x = 7.98$ кН/м² (разница > 55 раз). Ввиду малого значения данные напряжения можно не учитывать при расчете на несущую способность плит при подобной нагрузке;
- разница между растягивающими и сжимающими напряжениями при различных видах опирания не существенна, кроме случаев жесткого защемления с одной стороны и шарнирного опирания с другой. Так, превышение значений растягивающих напряжений относительно сжимающих в наружных продольных слоях колеблется от 12 до 20 %;
- по форме графиков можно сказать, что напряжения в целом меняются по одной закономерности при изменении толщины как поперечного, так и продольных слоев трехслойной плиты из ДПК;
- наибольшие значения нормальных напряжений σ_y фиксируются при жестком защемлении с одной стороны и шарнирном опирании с другой. Для установления точной локализации данных напряжений необходима выгрузка дополнительных данных из SCAD+ (например, изополя напряжений), что не являлось целью настоящего исследования.

Библиографический список

1. Есауленко, И. В. Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта / И. В. Есауленко. – DOI 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 4. – С. 17–25.
2. Ашкенази, Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – Москва : Лесная промышленность, 1978. – 224 с. – Текст : непосредственный.
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. 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.
 7. Failure modes and mechanical properties of bracket anchor connections for cross-laminated-timber / Y. Shen, J. Schneider, S. F. Stierner, X. Ren. – DOI 10.1051/mateconf/201927501011. – Текст : электронный // MATEC Web of Conferences – 2019. – № 275(11):01011. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331709903_Failure_Modes_and_Mechanical_Properties_of_Bracket_Anchor_Connections_for_Cross-Laminated-Timber (дата обращения: 07.09.2023).
 8. 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. – № 122:202–213. – URL: https://www.researchgate.net/publication/304355276_Evaluation_of_the_Mechanical_Properties_of_Cross_Laminated_Timber_with_Elementary_Beam_Theories (дата обращения: 07.09.2023).
 9. 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.
 10. Рогожина, А. В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия / А. В. Рогожина. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6 (90). – С. 329–339.
 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. 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.
 14. 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.
 15. 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. Esaulenko, I. V. (2021). Prospects for the development of high-rise wooden housing construction in Russia on foreign experience. *Architecture, construction, transport*, (4(98)), pp. 17–25. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25.
2. Ashkenazi, E. K. (1978). *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 224 p. (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. 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.
7. Shen, Y., Schneider, J., Stierner, 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 (accessed 07.08.2023). DOI 10.1051/mateconf/201927501011.
8. Christovasilis, I. P., Brunetti, M., Follesa, 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 (accessed 07.08.2023). DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082.
9. Bubis, A. A., Giziattullin, 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.
10. Rogozhina, A. V. (2022). Calculation of the deformability of the CLT overlap panel. *Engineering journal of Don*, (6(90)), pp. 329-339. (In Russian).
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. 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.
14. 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).
15. 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. ORCID 0009-0008-2890-2571

Андрей Викторович Турков, докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, e-mail: aturkov@bk.ru. ORCID 0000-0003-1944-8529

Заев Алексей Владимирович, аспирант кафедры строительных конструкций и материалов, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, e-mail: alexvzj@yandex.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. ORCID 0009-0008-2890-2571

Andrei V. Turkov, D. Sc. 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. ORCID 0000-0003-1944-8529

Aleksey V. Zaev, Postgraduate at the Department of Building Structures and Materials, Orel State University named after I. S. Turgenev, e-mail: alexvzj@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

А. П. Малышкин, А. В. Есипов, М. А. Есипов
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

INCREASING THE RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE FRAMES OF MULTISTOREY BUILDINGS

Aleksandr P. Malyshkin, Andrei V. Esipov, Mixail A. Esipov
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Целью численных исследований являлась разработка метода повышения надежности многоэтажных зданий с монолитными железобетонными каркасами, основанного на анализе суммарной площади возможного разрушения перекрытий вследствие возникновения аварийных ситуаций и отказа отдельных элементов зданий, расположенных в разных местах в плане и по высоте. Для анализа надежности пространственных железобетонных каркасов на основании принципа единичного отказа отдельной несущей конструкции было введено понятие коэффициента площади разрушения, позволяющего оценить влияние отказа несущего ключевого элемента здания на суммарную площадь разрушения перекрытий здания. В пространственных рамных конструкциях многоэтажных зданий с железобетонным каркасом ключевыми элементами конструктивной системы являются колонны, пилоны, ригели, балки, прочие элементы, участвующие в обеспечении общей устойчивости здания. Повышение надежности каркасного здания в целом предполагается путем введения дополнительного коэффициента надежности по живучести, зависящего от коэффициента площади разрушения. Кроме того, предложен алгоритм анализа и отбраковывания неудачных конструктивных систем каркасных зданий из мо-

Abstract. The aim of the numerical research was to develop a method to improve the reliability of multistorey buildings with monolithic reinforced concrete frames. The method was based on the analysis of the total area of possible slab destruction due to emergencies and failure of individual building elements located in different places in the plan and in height. To analyze the reliability of spatial reinforced concrete frames according to the principle of single failure of a separate load-bearing structure, we introduced the concept of failure area coefficient. It allowed us to estimate the failure effect of a load-bearing key element of the building on the total failure area of the building slabs. In spatial frame structures of multistorey buildings with reinforced concrete frame, the key elements of the structural system are columns, pylons, collars, beams and other elements that ensure the overall stability of the building. Increasing the overall reliability of the frame building suggest the introducing an additional reliability coefficient of survivability depending on the failure area factor. In addition, we proposed an algorithm for analyzing and rejection of unsuccessful structural systems of monolithic reinforced concrete frame buildings based on the evaluation of excessively high ratios of building failure area. We analyzed the structural

нолитного железобетона, основанный на оценке излишне высоких коэффициентов площади разрушения здания. На примере двух построенных многоэтажных зданий жилого и общественного назначения с монолитными железобетонными каркасами проведен анализ их конструктивных систем.

Ключевые слова: коэффициент площади разрушения, монолитный железобетон, каркасное здание, надежность здания, безопасность, живучесть, прогрессирующее обрушение

systems on the example of two constructed multistorey residential and public buildings with monolithic reinforced concrete frames.

Key words: failure area coefficient, monolithic reinforced concrete, frame building, building reliability, safety, survivability, progressive collapse

Для цитирования: Малышкин, А. П. Повышение надежности железобетонных каркасов многоэтажных зданий / А. П. Малышкин, А. В. Есипов, М. А. Есипов. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-42-55. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 42–55.

For citation: Malyshkin, A. P., Esipov, A. V., & Esipov, M. A. (2024). Increasing the reliability of reinforced concrete frames of multistorey buildings. *Architecture, Construction, Transport*, (2(108)), pp. 42-55. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-42-55.

1. Введение

При проектировании многоэтажных зданий с монолитными железобетонными каркасами особое внимание следует уделять надежности конструктивных систем. Физический износ конструкций, повреждения отдельных ее элементов, возникающие в процессе эксплуатации, при различных физических воздействиях, снижают несущую способность зданий. Наиболее важным условием обеспечения безопасности граждан является живучесть конструктивной системы при различных, в том числе непроектных, воздействиях. Живучесть – это способность сохранять воз-

можность функционирования системы при наличии повреждений отдельных элементов [1–3]. При проектировании конструктивной системы живучесть может оцениваться как свойство сохранять несущую способность конструкций и работоспособность объекта в целом при возникновении аварийных ситуаций, разрушении одного или нескольких несущих элементов [4–12]. При этом разрушение отдельных элементов может моделироваться путем создания вторичной расчетной схемы с удалением вышедшего из строя элемента.

В соответствии с ГОСТ 27751-2014¹ и СП 296.1325800.2017², к аварийной ситуации вслед-

¹ ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (EN 1990:2002, NEQ. ISO 2394:1998 NEQ) = Reliability for constructions and foundations. General principles : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст в качестве национального стандарта РФ с 1 июля 2015 г. : введен впервые : дата введения 2015-07-01 / разработан ОАО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115736> (дата обращения: 07.10.2023).

² Здания и сооружения. Особые воздействия = Buildings and structures. Accidental actions : СП 296.1325800.2017 : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 3 августа 2017 г. № 1105/пр и введен в действие с 4 февраля 2018 г. : введен впервые : дата введения 2018-02-04 / исполнители – АО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко при участии АО МНИИТЭП, ФГБУ «ГГО им. А. И. Воейкова». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (дата обращения: 07.10.2023).

ствие отказа несущего элемента здания приводят особые воздействия, подразделяемые на нормируемые (сейсмические или в результате пожара) и аварийные (при взрыве или столкновении с транспортными средствами, аварии оборудования и отказе работы несущего элемента конструкции). Для сохранения живучести здания в соответствии с федеральным законом № 384-ФЗ³ необходимо на стадии проектирования прогнозировать возможные последствия отказов несущих элементов и учитывать различные варианты наиболее опасных расчетных ситуаций. Каждый расчетный сценарий, согласно СП 20.13330.2016⁴, должен соответствовать отдельному сочетанию нагрузок и включать в себя одно из нормируемых (проектных) особых воздействий или один вариант локальных разрушений несущих конструкций для аварийных особых воздействий согласно СП 296.1325800.2017.

В связи с отсутствием требований к отказоустойчивости сооружений оценить и сопоставить живучесть различных конструктивных систем весьма затруднительно, так как для этого необходимо провести анализ большого количества сценариев отказа несущих элементов каждого варианта конструктивной схемы здания, что при ограниченных сроках и ресурсах, отведенных на проектные работы в гражданском строительстве, является неосуществимым.

Непредвиденные разрушения отдельных элементов несущих конструкций способны привести к непригодности здания и сооружения к эксплуатации [1], чего можно было бы избежать при наличии четкого алгоритма создания оптимальной конструктивной системы сооружения,

максимально отвечающего требованиям надежности и живучести, или хотя бы метода оценки и сопоставления надежности и живучести для различных вариантов конструктивных систем.

В этой связи актуальной задачей является создание детерминированного инженерного подхода для анализа живучести многоэтажных зданий с монолитным железобетонным каркасом и выявление наиболее важных ключевых элементов каркаса.

При этом требования к снижению себестоимости строительства и одновременно с этим повышению безопасности и живучести зданий весьма противоречивы. Учащение аварийных ситуаций, связанных с ошибками проектирования, строительства и эксплуатации зданий [13], ставит вопрос о необходимости решения проблемы живучести многоэтажных зданий.

Настоящее исследование направлено на решение проблемы оценки живучести каркасных зданий на стадии проектирования путем создания четкого алгоритма анализа конструктивных систем и применения дополнительных коэффициентов надежности.

2. Материалы и методы

На сегодняшний день метода анализа и оценки каркаса здания на живучесть не существует. Основопологающим может стать принцип единичного отказа отдельной конструкции. В то же время отказ одного несущего элемента не должен повлиять на работоспособность здания в целом.

В конструктивной схеме важность отдельных несущих элементов каркаса различна. На-

³Технический регламент о безопасности зданий и сооружений (с изменениями на 2 июля 2013 года) : Федеральный закон № 384-ФЗ : принят Государственной Думой 23 декабря 2009 года : одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 года. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902192610> (дата обращения: 10.11.2023).

⁴ Нагрузки и воздействия = Loads and actions : СП 20.13330.2016 : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г. / исполнители – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 07.03.2023).

пример, при отказе колонны подвала происходит разрушение всех вышележащих этажей в рамках ее грузовой площади, при отказе балки покрытия площадь обрушения будет намного меньше и в рамках одного этажа, следовательно, последствия отказа отдельного конструктивного элемента тоже различны.

Для оценки важности отдельных элементов каркаса здания необходимо выделить в конструктивной системе ключевые элементы аналогично рекомендациям МДС 20-2.2008⁵. В пространственных рамных конструкциях многоэтажных зданий с железобетонным каркасом это колонны, пилоны, ригели, балки, а также прочие элементы, участвующие в обеспечении общей устойчивости здания. Недопустимым будем считать отказ конструктивной системы в целом вследствие отказа отдельных ключевых элементов. При этом обеспечение надежности ключевых элементов конструктивной системы повышает вероятность безотказной работы здания, его безопасность и надежность в целом.

Прогрессирующее обрушение каркасных многоэтажных зданий с железобетонными каркасами в данном подходе учитывать не будем, принимая во внимание тот факт, что здание неустойчиво к прогрессирующему обрушению и к конструктивной системе данные требования не предъявлялись. Согласно большому пласту исследований, наиболее сложной и затратной с точки зрения расхода материалов задачей является обеспечение устойчивости к прогрессирующему обрушению большепролетных зданий [14–25], в то время как для монолитных пространственных каркасов большой сложности в этом нет.

В отечественных нормах реализован метод расчета по предельным состояниям (ПС) с целью недопущения перехода конструкции в предельное состояние в течение всего срока эксплуата-

ции. Система коэффициентов, используемая в методе ПС, гарантирует, что ПС конструкции не наступит при самых неблагоприятных нагрузках, значениях прочностных характеристик материалов и условиях работы конструкции. Коэффициенты надежности, применяемые в расчетах по методу ПС ($\gamma_n, \gamma_f, \gamma_m, \gamma_c$), пришли на замену единому коэффициенту запаса и отвечают всем возможным вариантам конструкций, материалов и условий эксплуатации.

Однако система коэффициентов не учитывает особенность ключевых элементов каркаса, место их расположения и степень важности.

Для оценки влияния отказа несущего ключевого элемента на суммарную площадь обрушения перекрытий здания введем новое понятие коэффициента площади разрушения, оценивающего социальные последствия возможной аварии:

$$K_p = \frac{1}{\left(1 - \frac{A_p}{A_{3\partial}}\right)}, \quad (1)$$

где A_p – возможная суммарная площадь разрушения перекрытий всех этажей здания при отказе одного из ключевых элементов, м²;

$A_{3\partial}$ – суммарная площадь всех перекрытий здания, м².

Коэффициент разрушения зависит от суммарной площади разрушения перекрытий A_p и суммарной площади всех перекрытий здания $A_{3\partial}$. Чем больше A_p , тем выше степень важности при отказе ключевого элемента (рис. 1).

Для анализа конструктивных систем каркасных зданий необходимо определить допустимые граничные значения коэффициента площади разрушения K_p , при которых не потребуются менять расчетную схему сооружения. Согласно графикам зависимости коэффициента площади раз-

⁵ Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях : МДС 20-2.2008 : утверждены приказом ФГУП «НИЦ «Строительство» от 5 мая 2008 г. № 107 : введены впервые / разработаны лабораторией металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко – филиалом ФГУП «НИЦ «Строительство». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200064583> (дата обращения: 07.03.2023).

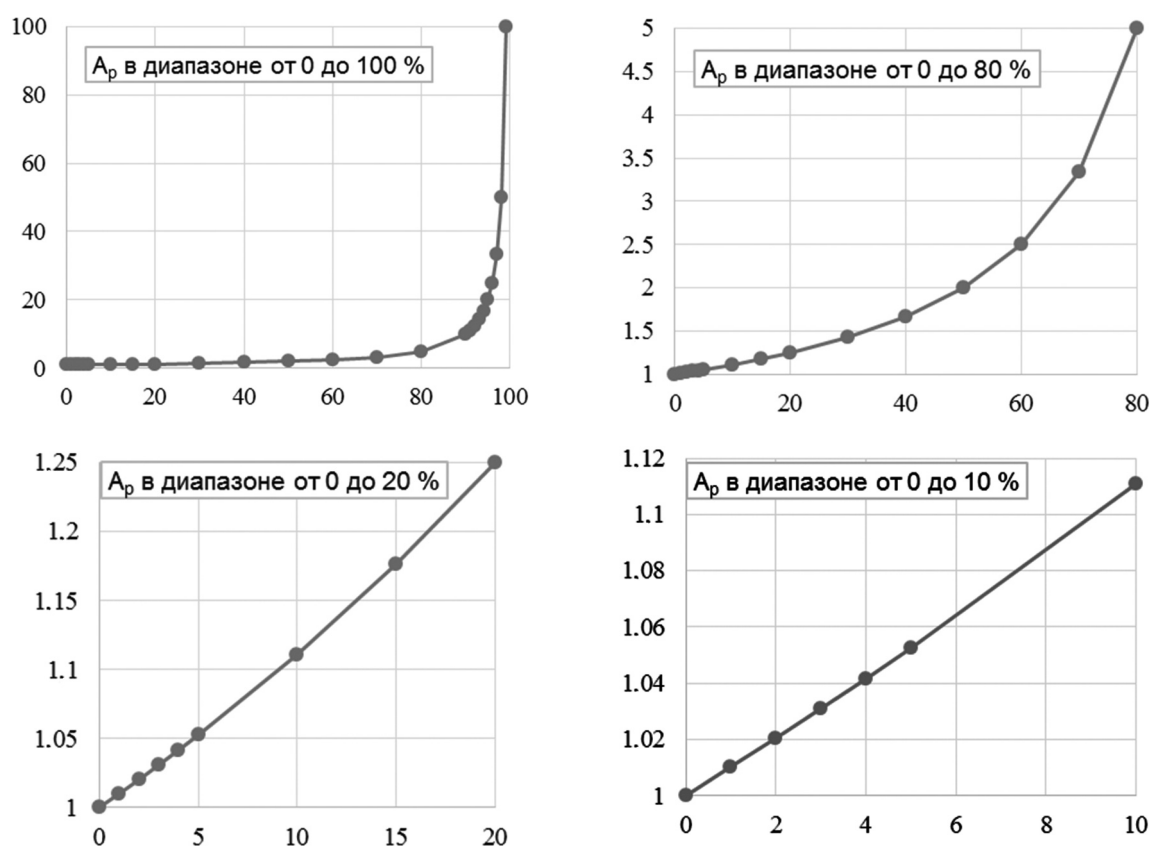


Рис. 1. Зависимость коэффициента разрушения K_p от процента площади разрушения A_p
 Fig. 1. Dependence of failure coefficient K_p on the percent of failure area A_p

рушения K_p от процента площади разрушения перекрытий здания A_p (рис. 1), до 20 % от суммарной площади обрушения перекрытий A_p графики имеют практически линейную зависимость. При проценте площади разрушения перекрытий здания A_p более 20 % зависимость коэффициента площади разрушения K_p от площади разрушения перекрытий здания A_p становится нелинейной, т. е. возникает нарастающее лавинообразное обрушение конструкций, сходное по своей сути с прогрессирующим обрушением. Поэтому для недопущения лавинообразного обрушения конструкций граничным значением коэффициента площади разрушения будем считать $K_p = 1.25$, соответствующее суммарной площади обрушения перекрытий A_p в размере 20 % от суммарной площади всех перекрытий здания $A_{зд}$.

Рассмотрим элементарную ячейку каркасного 9-этажного здания (рис. 2). Площадь всех перекрытий здания составляет 864 м². Суммар-

ная площадь разрушения перекрытий при возможном отказе одного из ключевых элементов здания и коэффициенты площади разрушения K_p представлены в таблице 1.

Коэффициенты разрушения K_p для балок равны 1.03 (для Б1) и 1.01 (для Б2).

Разброс значений коэффициента площади разрушения K_p для колонн варьируется в широких пределах от 1.01 до 9, что свидетельствует о различном влиянии на суммарную площадь разрушения перекрытий при возможном отказе отдельной колонны и, как следствие, различных социальных последствиях для находящихся в здании граждан. Разброс значений коэффициента K_p для балок перекрытий, как и следовало ожидать, ввиду близких значений грузовых площадей отличается незначительно.

Таким образом, на этапе проектирования и расчетов необходимо детально анализировать конструктивную систему здания, не допуская ко-

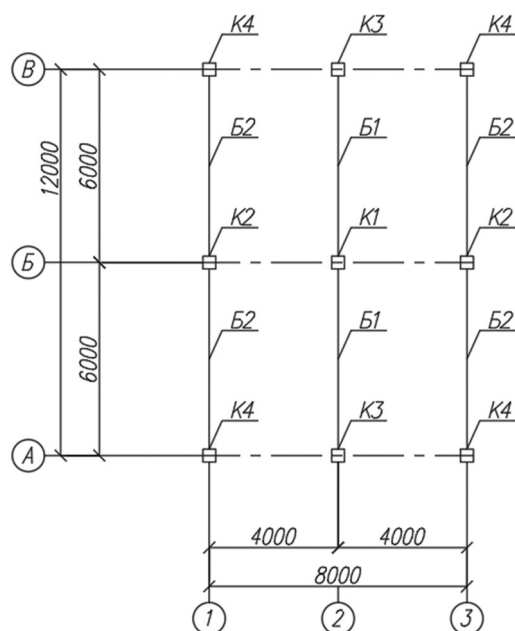


Рис. 2. Схема расположения элементов каркаса
Fig. 2. Scheme of frame elements

Таблица 1/Table 1

Суммарные площади обрушения перекрытий A_p и коэффициенты разрушения K_p при отказе колонн
Total slab collapse areas A_p and failure coefficients K_p at column failure

Этаж	Колонны							
	K1		K2		K3		K4	
	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p	A_p, m^2	K_p
1	864	–	432	2	432	2	216	1.33
2	768	9	384	1.8	384	1.8	192	1.29
3	672	4.5	336	1.64	336	1.64	168	1.24
4	576	3	288	1.5	288	1.5	144	1.2
5	480	2.25	240	1.38	240	1.38	120	1.16
6	384	1.8	192	1.29	192	1.29	96	1.13
7	288	1.5	144	1.2	144	1.2	72	1.09
8	192	1.29	96	1.13	96	1.13	48	1.06
9	96	1.13	48	1.06	48	1.06	24	1.03

коэффициента площади разрушения $K_p > 1.25$, и при необходимости закладывать в ключевые элементы каркаса с высокими значениями коэффициента площади разрушения K_p дополнительный запас по несущей способности.

Дополнительный коэффициент надежности по живучести конструкции γ_l для ключевых элементов каркаса предлагается вводить при значениях коэффициента площади разрушения $K_p > 1.1$, соответствующего суммарной площади обрушения перекрытий A_p в размере 9 % от суммарной площади всех перекрытий здания $A_{зд}$. Значения коэффициента надежности по живучести конструкции γ_l при $K_p > 1.1$ зависят от уровня ответственности здания и класса сооружения (таблица 2).

Таблица 2/Table 2

Значение коэффициента надежности по живучести γ_l
Value of reliability coefficient of survivability γ_l

Уровень ответственности здания	Класс сооружения	Коэффициент надежности по живучести γ_l
Повышенный	КС-3	1.2
Нормальный	КС-2	1.1
Пониженный	КС-1	1.0

При коэффициенте площади разрушения $K_p > 1.25$ необходимо выполнить корректировку конструктивной схемы сооружения для исключения больших суммарных площадей разрушения перекрытий при отказе отдельного ключевого элемента конструкции.

3. Результаты и обсуждение

Согласно предложенному принципу, были проанализированы конструктивные системы двух спроектированных и возведенных зданий жилого и общественного назначения, определены коэффициенты площади разрушения K_p для колонн всех этажей.

Анализ конструктивной системы жилого здания

Здание точечной компоновки 14-этажное с максимальными размерами по осям крайних колонн 26.1×26.1 м. Общая устойчивость и неизменяемость каркаса, а также восприятие горизонтальных нагрузок обеспечиваются диафрагмами лестнично-лифтового блока. Колонны квадратные сечением 0.5×0.5 м и 0.6×0.6 м. Плиты пе-

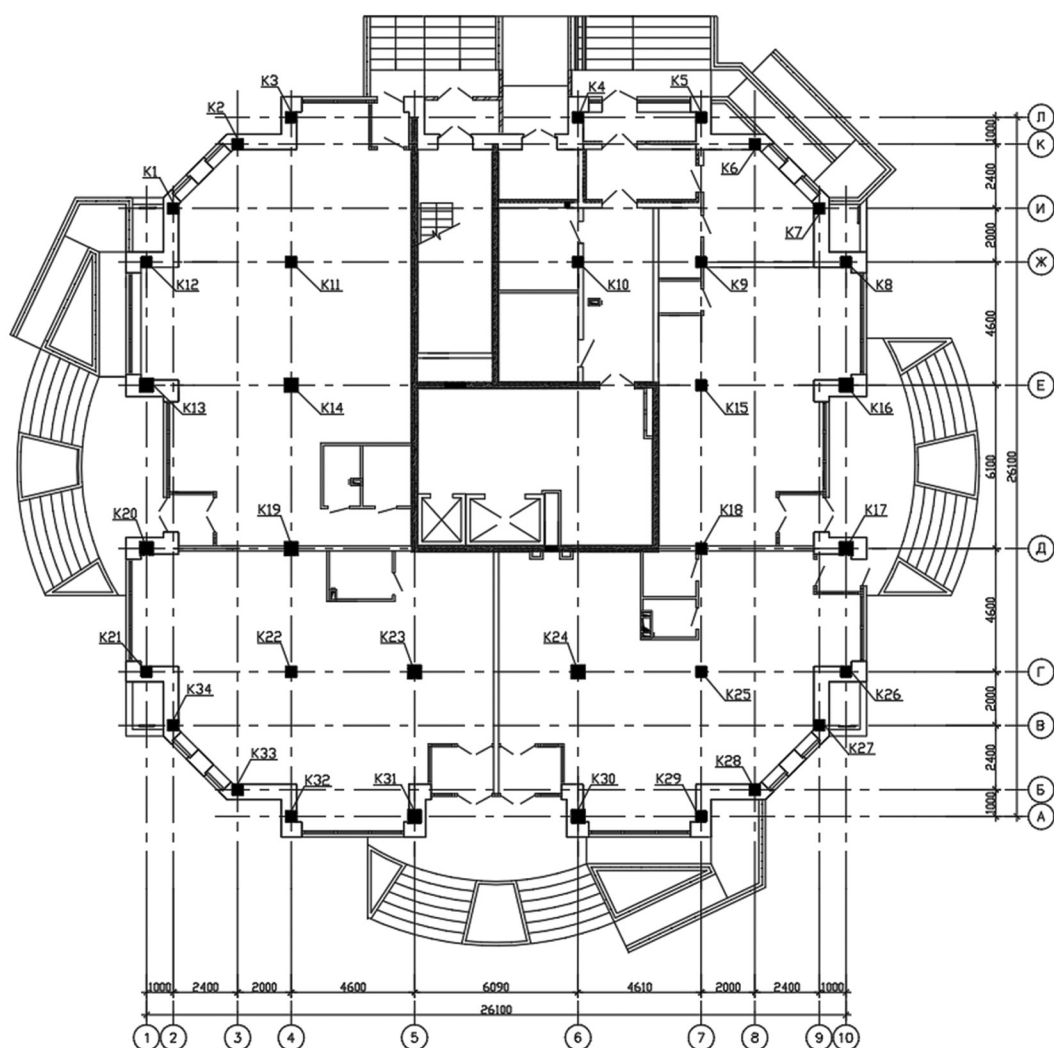


Рис. 3. Схема расположения элементов каркаса жилого здания
Fig. 3. Scheme of frame elements in a residential building

рекрытия толщиной 180 мм. Бетон вертикальных несущих конструкций В30, плит перекрытий В25. Арматура элементов каркаса А400. Конструктивная схема здания и обозначение ключевых элементов – колонн – приведены на рис. 3.

Площадь всех перекрытий эксплуатируемых этажей здания составляет 7 560 м². Суммарная площадь разрушения перекрытий при возможном отказе одного из ключевых элементов здания и коэффициенты площади разрушения K_p были рассчитаны по предложенной формуле (1), результаты представлены в таблице 3. Колоннам с коэффициентами разрушения, значения

которых находятся в диапазоне $1.1 < K_p \leq 1.25$, необходимо уделить особое внимание и при проведении расчета армирования присвоить дополнительный коэффициент надежности по живучести конструкции $\gamma_l = 1.1$. Коэффициент разрушения $K_p > 1.25$ выявлен у четырех колонн первого этажа, имеющих ключевое значение (K14, K19, K23 и K24).

Анализ несущих конструкций здания, согласно полученным в ходе проектирования коэффициентам разрушения, позволил сделать вывод о необходимости корректировки конструктивной схемы здания.

Таблица 3/Table 3

Суммарные площади разрушения перекрытий A_p и коэффициенты разрушения K_p при отказе колонн жилого здания
 Total slab collapse areas A_p and failure coefficients K_p at column failure in a residential building

Этаж	Колонны							
	K1, K2, K6, K7, K27, K28, K33, K34		K3, K5, K8, K12, K21, K26, K29, K32		K4		K9, K11, K22, K25	
	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p
1	280	1.04	630	1.09	574	1.08	1274	1.20
2	260	1.04	585	1.08	533	1.08	1183	1.19
3	240	1.03	540	1.08	492	1.07	1092	1.17
4	220	1.03	495	1.07	451	1.06	1001	1.15
5	200	1.03	450	1.06	410	1.06	910	1.14
6	180	1.02	405	1.06	369	1.05	819	1.12
7	160	1.02	360	1.05	328	1.05	728	1.11
8	140	1.02	315	1.04	287	1.04	637	1.09
9	120	1.02	270	1.04	246	1.03	546	1.08
10	100	1.01	225	1.03	205	1.03	455	1.06
11	80	1.01	180	1.02	164	1.02	364	1.05
14	20	1.00	45	1.01	41	1.01	91	1.01

Этаж	Колонны							
	K10		K13, K16, K17, K20, K30, K31		K14, K19, K23, K24		K15, K18	
	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p	$A_p, \text{м}^2$	K_p
1	1064	1.16	812	1.12	1498	1.25	1232	1.19
2	988	1.15	754	1.11	1391	1.23	1144	1.18
3	912	1.14	696	1.10	1284	1.20	1056	1.16
4	836	1.12	638	1.09	1177	1.18	968	1.15
5	760	1.11	580	1.08	1070	1.16	880	1.13
6	684	1.10	522	1.07	963	1.15	792	1.12
7	608	1.09	464	1.07	856	1.13	704	1.10
8	532	1.08	406	1.06	749	1.11	616	1.09
9	456	1.06	348	1.05	642	1.09	528	1.08
10	380	1.05	290	1.04	535	1.08	440	1.06
11	304	1.04	232	1.03	428	1.06	352	1.05
14	76	1.01	58	1.01	107	1.01	88	1.01

Анализ конструктивной системы общественного здания

Здание прямоугольное в плане 12-этажное с максимальными размерами по осям крайних колонн 51.2 × 38.4 м. Общая устойчивость и неиз-

меняемость каркаса, а также восприятие горизонтальных нагрузок обеспечиваются отдельными диафрагмами жесткости. Колонны квадратного сечения 0.4 × 0.4 м, 0.5 × 0.5 м и 0.6 × 0.6 м в зависимости от места расположения в плане и

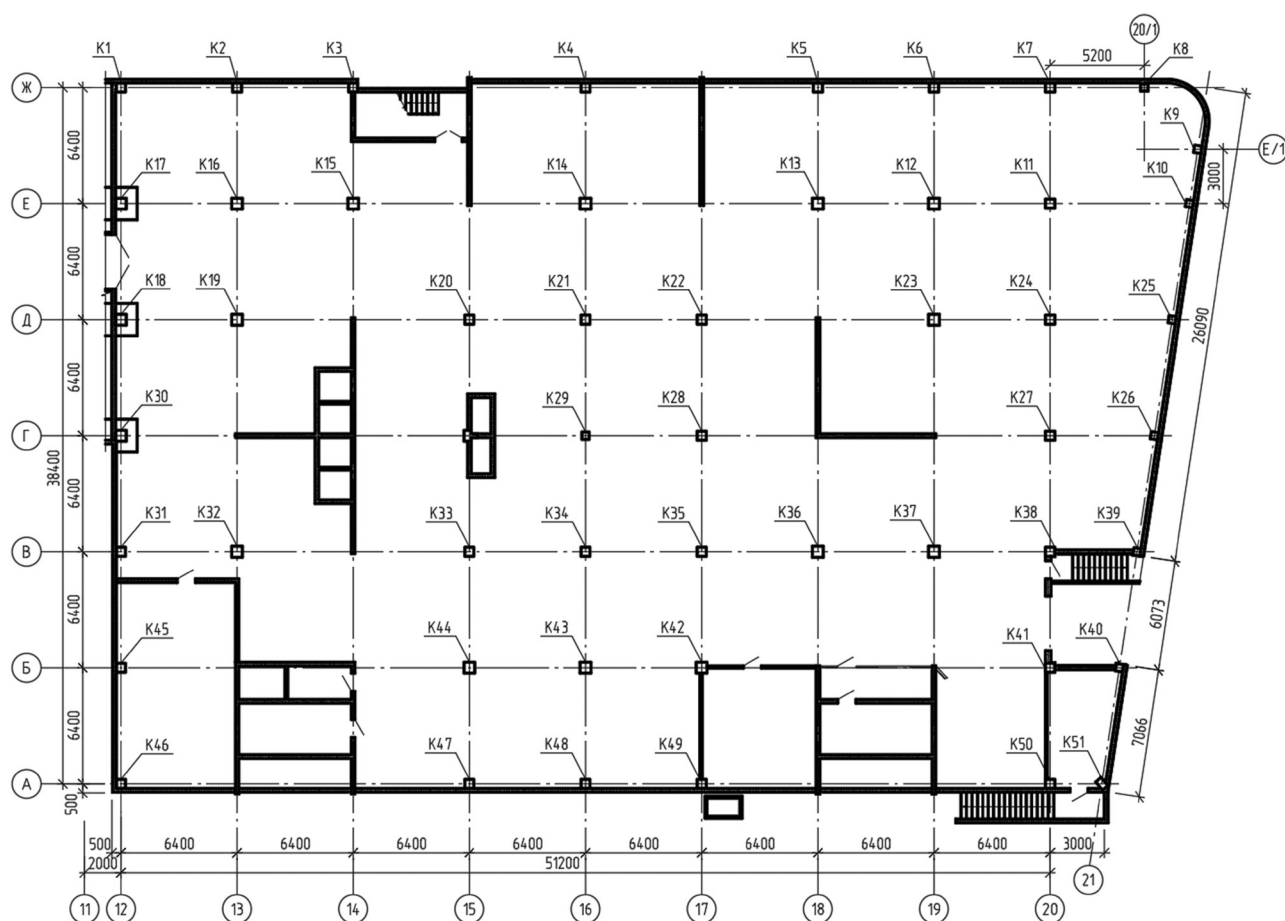


Рис. 4. Схема расположения элементов каркаса общественного здания
Fig. 4. Scheme of frame elements in a public building

по высоте здания. Шаг колонн 6.4×6.4 м. Плиты перекрытия толщиной 200 мм с капителями толщиной 400 мм. Бетон вертикальных несущих конструкций и плит перекрытий В30. Арматура элементов каркаса А500. Конструктивная схема здания с обозначением ключевых элементов – колонн – приведена на рис. 4.

Площадь всех перекрытий эксплуатируемых этажей здания составляет 26 280 м². Суммарная площадь обрушения перекрытий при возможном отказе одного из ключевых элементов общественного здания и коэффициенты разрушения K_p были рассчитаны по предложенной формуле (1), результаты приведены в таблице 4.

Колонны со значениями коэффициента площади разрушения $K_p > 1.11$ не были выявлены, следо-

вательно, присвоение дополнительного коэффициента надежности по живучести конструкции γ для отдельных элементов каркаса не требуется.

4. Заключение

С целью повышения надежности, безопасности и живучести многоэтажных зданий с железобетонными каркасами и снижения вероятности возникновения критических отказов отдельных элементов конструкций вследствие аварийных воздействий было предложено оценивать влияние отказа несущих ключевых элементов каркаса на суммарную площадь обрушения перекрытий.

Предложенный метод повышения надежности позволяет разграничить важность отдельных

Суммарные площади разрушения перекрытий A_p и коэффициенты разрушения K_p при отказе колонн общественного здания
 Total slab collapse areas A_p and failure coefficients K_p at column failure in a public building

Таблица 4/Table 4

Этаж		Колонны																K20, K21, K33, K34			
		K1, K3		K2, K4, K6, K17, K18, K30, K31, K45-K49		K7, K26		K8, K9		K10		K11		K12-K14, K16, K22, K23, K28, K35-K37, K42-K44		K15,		K19, K27, K32			
		$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p
1		492	1.02	984	1.04	888	1.03	660	1.03	1176	1.05	2160	1.09	1968	1.08	1716	1.07	1860	1.08	1920	1.08
2		451	1.02	902	1.04	814	1.03	605	1.02	1078	1.04	1980	1.08	1804	1.07	1573	1.06	1705	1.07	1760	1.07
3		410	1.02	820	1.03	740	1.03	550	1.02	980	1.04	1800	1.07	1640	1.07	1430	1.06	1550	1.06	1600	1.06
4		369	1.01	738	1.03	666	1.03	495	1.02	882	1.03	1620	1.07	1476	1.06	1287	1.05	1395	1.06	1440	1.06
5		328	1.01	656	1.03	592	1.02	440	1.02	784	1.03	1440	1.06	1312	1.05	1144	1.05	1240	1.05	1280	1.05
6		287	1.01	574	1.02	518	1.02	385	1.01	686	1.03	1260	1.05	1148	1.05	1001	1.04	1085	1.04	1120	1.04
7		246	1.01	492	1.02	444	1.02	330	1.01	588	1.02	1080	1.04	984	1.04	858	1.03	930	1.04	960	1.04
8		205	1.01	410	1.02	370	1.01	275	1.01	490	1.02	900	1.04	820	1.03	715	1.03	775	1.03	800	1.03
9		164	1.01	328	1.01	296	1.01	220	1.01	392	1.02	720	1.03	656	1.03	572	1.02	620	1.02	640	1.02
10		123	1.00	246	1.01	222	1.01	165	1.01	294	1.01	540	1.02	492	1.02	429	1.02	465	1.02	480	1.02
11		82	1.00	164	1.01	148	1.01	110	1.00	196	1.01	360	1.01	328	1.01	286	1.01	310	1.01	320	1.01
12		41	1.00	82	1.00	74	1.00	55	1.00	98	1.00	180	1.01	164	1.01	143	1.01	155	1.01	160	1.01
Этаж		Колонны																K50			
		K24		K25		K26		K29		K38		K39		K40		K41		K50		K51	
		$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p	$A_{p'}, m^2$	K_p
1		2016	1.08	1032	1.04	888	1.03	1896	1.08	1320	1.05	408	1.02	264	1.01	1248	1.05	768	1.03	288	1.01
2		1848	1.08	946	1.04	814	1.03	1738	1.07	1210	1.05	374	1.01	242	1.01	1144	1.05	704	1.03	264	1.01
3		1680	1.07	860	1.03	740	1.03	1580	1.06	1100	1.04	340	1.01	220	1.01	1040	1.04	640	1.02	240	1.01
4		1512	1.06	774	1.03	666	1.03	1422	1.06	990	1.04	306	1.01	198	1.01	936	1.04	576	1.02	216	1.01
5		1344	1.05	688	1.03	592	1.02	1264	1.05	880	1.03	272	1.01	176	1.01	832	1.03	512	1.02	192	1.01
6		1176	1.05	602	1.02	518	1.02	1106	1.04	770	1.03	238	1.01	154	1.01	728	1.03	448	1.02	168	1.01
7		1008	1.04	516	1.02	444	1.02	948	1.04	660	1.03	204	1.01	132	1.01	624	1.02	384	1.01	144	1.01
8		840	1.03	430	1.02	370	1.01	790	1.03	550	1.02	170	1.01	110	1.00	520	1.02	320	1.01	120	1.00
9		672	1.03	344	1.01	296	1.01	632	1.02	440	1.02	136	1.01	88	1.00	416	1.02	256	1.01	96	1.00
10		504	1.02	258	1.01	222	1.01	474	1.02	330	1.01	102	1.00	66	1.00	312	1.01	192	1.01	72	1.00
11		336	1.01	172	1.01	148	1.01	316	1.01	220	1.01	68	1.00	44	1.00	208	1.01	128	1.00	48	1.00
12		168	1.01	86	1.00	74	1.00	158	1.01	110	1.00	34	1.00	22	1.00	104	1.00	64	1.00	24	1.00

конструктивных элементов здания и для наиболее неблагоприятных из них назначить дополнительный запас надежности по живучести γ . Также данный подход позволяет оценить неудачные конструктивные системы и сделать вывод о необходимости их корректировки.

Библиографический список

1. Кудишин, Ю. И. К вопросу о живучести строительных конструкций / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 2 (217). – С. 36–43.
2. Кудишин, Ю. И. Методика расчета строительных конструкций на единичную живучесть / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот. – Текст : электронный // [cdn.scipeople.ru](http://cdn.scipeople.ru/materials/3970/статья_исп_5.pdf) : сайт. – URL: http://cdn.scipeople.ru/materials/3970/статья_исп_5.pdf (дата обращения: 12.03.2024).
3. Кудишин, Ю. И. Живучесть строительных конструкций – важный фактор снижения потерь в условиях аварийных ситуаций / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 59–71.
4. Травуш, В. И. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений / В. И. Травуш, В. И. Колчунов, Н. В. Ключева. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 3. – С. 4–11.
5. Травуш, В. И. Расчет параметра живучести рамно-стержневых конструктивных систем / В. И. Травуш, Н. В. Федорова. – Текст : непосредственный // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 1 (45). – С. 21–28.
6. Ключева, Н. В. К построению критериев живучести коррозионно повреждаемых железобетонных конструктивных систем / Н. В. Ключева, Н. Б. Андросова. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 1 (222). – С. 29–34.
7. Ключева, Н. В. К оценке живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем при внезапных запроектных воздействиях / Н. В. Ключева, О. А. Ветрова. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 11. – С. 56–57.
8. Тамразян, А. Г. Ресурс живучести – основной критерий проектных решений высотных зданий / А. Г. Тамразян. – Текст : непосредственный // Жилищное строительство. – 2010. – № 1. – С. 15–18.
9. Колчунов, В. И. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях / В. И. Колчунов, Н. В. Федорова. – Текст : непосредственный // Вестник НИЦ «Строительство». – 2018. – № 1 (16). – С. 115–119.
10. Дьяков, И. М. Предпосылки и некоторые аспекты применения теории живучести к оценке работы подпорных стен на предельные нагрузки / И. М. Дьяков. – Текст : непосредственный // Строительство и технологическая безопасность : Сборник научных трудов. – Симферополь : НАПКС, 2011. – Вып. 39. – С. 29–34.
11. Дьяков, И. М. Оценка живучести свайных удерживающих конструкций / И. М. Дьяков. – Текст : непосредственный // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сборник научных трудов. – Днепрпетровск : Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2013. – Вып. 69. – С. 169–174.
12. Назаров, Ю. П. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях / Ю. П. Назаров, А. С. Городецкий, В. Н. Симбиркин. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 4 (225). – С. 5–9.
13. Айдемиров, К. Р. (2010). Состояние проблемы прогрессирующего разрушения зданий и сооружений, классификация задач и подходы к их решению / К. Р. Айдемиров. – Текст : непосредственный // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2010. – № 1. – 13 с.
14. Бондаренко, В. М. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 2. – С. 28–31.
15. Теличенко, В. И. Обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара – базовый элемент системы комплексной безопасности / В. И. Теличенко, В. М. Ройтман. – Текст : электронный // Наука и безопасность : электронный журнал. – URL: <https://www.pamag.ru/prensa/mtsuz-cs> (дата обращения: 10.02.2024).
16. Ройтман, В. М. Прогессирующее обрушение высотных зданий: инженерные аспекты событий 11 сентября 2001 года / В. М. Ройтман. – Текст : электронный // Предотвращение аварий зданий и сооружений. –

URL: <https://prevdis.ru/progressiruyushhee-obrushenie-vysotnyh-zdanij-inzhenernye-aspekty-sobytij-11-sentyabrya-2001-goda/> (дата обращения: 10.02.2024).

17. Алмазов, В. О. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов / В. О. Алмазов, К. Као Зуй. – Москва : Издательство АСВ, 2013. – 128 с. – Текст : непосредственный.
18. Macromodel-based simulation of progressive collapse: reinforced concrete frame structures / Y. Bao, S. K. Kunnath, S. El-Tawil, H. S. Lew. – Текст : электронный // Journal of Structural Engineering. – 2008. – Vol. 134. – No. 7. – P. 1079–1091.
19. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. NIST Technical Note 1720 / H. S. Lew, Y. Bao, F. Sadek [et al.]. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1720.pdf> (дата обращения: 01.02.2024). – Текст : электронный.
20. Mosalam, Kh. M. Modeling progressive collapse in reinforced concrete framed structures / Kh. M. Mosalam. – Текст : электронный // Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. – 2008. – URL: <https://invenio.itam.cas.cz/record/11064?ln=en> (дата обращения: 01.02.2024).
21. Improving collapse-resistance performance of steel frame with openings in beam web / B. Meng, J. Hao, W. Zhong [et al.]. – DOI 10.1016/j.istruc.2020.08.009. – Текст : непосредственный // Structures. – 2020. – No. 27 (8). – P. 2156–2169.
22. Малышкин, А. П. Опыт проектирования большепролетного покрытия с учетом недопущения прогрессирующего обрушения / А. П. Малышкин, А. В. Есипов. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 38 (57). – С. 40–48.
23. Алексеева, А. А. Анализ строительных норм для проектирования большепролетных зданий с учетом недопущения прогрессирующего обрушения / А. А. Алексеева, А. В. Есипов. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Тюмень, 22 декабря 2017 года / отв. ред. А. Н. Халин. – Т. I. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 48–52.
24. Волощук, Д. А. Нормативные требования при проектировании высотных зданий с учетом соблюдения требований прогрессирующего обрушения / Д. А. Волощук, А. В. Есипов. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Тюмень, 22 декабря 2017 года / отв. ред. А. Н. Халин. – Т. I. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 78–81.
25. Есипов, А. В. Расчет прогонов с учетом недопущения прогрессирующего обрушения шатра покрытия здания со стальным каркасом / А. В. Есипов, А. А. Алексеева. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2018. – № 4 (39). – С. 89–93.

References

1. Kudishin, Yu. I., & Drobot, D. Yu. (2008). K voprosu o zhivuchesti stroitel'nykh konstruksiy. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, (2(217)), pp. 36-43. (In Russian).
2. Kudishin, Yu. I., & Drobot, D. Yu. (2009). Metodika rascheta stroitel'nykh konstruksiy na edinichnyu zhivuchest'. (In Russian). Available at: http://cdn.sciepeople.ru/materials/3970/статья_исп_5.pdf (accessed 12.03.2024).
3. Kudishin, Yu. I., & Drobot, D. Yu. (2009). Building structure survivability. Metal Constructions, 15(1), pp. 59-71. (In Russian).
4. Travush, V. I., Kolchunov, V. I., & Klyueva, N. V. (2015). Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. Industrial and Civil Engineering, (3), pp. 4-11. (In Russian).
5. Travush, V. I., & Fedorova, N. V. (2017). Survivability parameter calculation for framed structural systems. Russian Journal of Building Construction and Architecture, (1), pp. 6-14. (In Russian).
6. Klyueva, N. V., & Androsova, N. B. (2009). K postroeniyu kriteriev zhivuchesti korrozionno povrezhdaemykh zhelezobetonnykh konstruktivnykh sistem. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, (1(222)), pp. 29-34. (In Russian).
7. Klyueva, N. V., & Vetrova, O. A. (2006). K otsenke zhivuchesti zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevnykh konstruktivnykh sistem pri vnezapnykh zaproektnykh vozdeystviyakh. Industrial and Civil Engineering, (11), pp. 56-57. (In Russian).

8. Tamrazyan, A. G. (2010). Resurs zhivuchesti – osnovnoy kriteriy proektnykh resheniy vysotnykh zdaniy. *Housing Construction*, (1), pp. 15-18. (In Russian).
9. Kolchunov, V., & Fedorova, N. (2018). Current problems of reinforced concrete structural systems survivability at emergency impacts. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*, (1(16)), pp. 115-119. (In Russian).
10. D'yakov, I. M. (2011). Predposylki i nekotorye aspekty primeneniya teorii zhivuchesti k otsenke raboty podpornykh sten na zapredel'nye nagruzki. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost': Sbornik nauchnykh trudov. Simferopol'*, NAPKS Publ., 39, pp. 29-34. (In Russian).
11. D'yakov, I. M. (2013). Otsenka zhivuchesti svaynykh uderzhivayushchikh konstruktsiy. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sbornik nauchnykh trudov. Dnepropetrovsk, Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture Publ.*, 69, pp. 169-174. (In Russian).
12. Nazarov, Y. P., Gorodetsky, A. S., & Simbirkin, V. N. (2009). About a problem of survivability support of building structures subjected to emergency actions, (4(225)), pp. 5-9. (In Russian).
13. Aydemirov, K. R. (2010). Sostoyanie problemy progressiruyushchego razrusheniya zdaniy i sooruzheniy, klassifikatsiya zadach i podkhody k ikh resheniyu. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, (1), 13 p. (In Russian).
14. Bondarenko, V. M., & Kolchunov, V. I. (2013). The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under the influence of force and environmental factors. *Industrial and Civil Engineering*, (2), pp. 28-31. (In Russian).
15. Telichenko, V. I., & Roytman, V. I. (2012). Obespechenie stoykosti zdaniy i sooruzheniy pri kombinirovannykh osobykh vozdeystviyakh s uchastiem pozhara – bazovyy element sistemy kompleksnoy bezopasnosti. *Nauka i bezopasnost'*. (In Russian). Available at: <https://www.pamag.ru/pressa/mtsuz-cs> (accessed 10.02.2024).
16. Roytman, V. M. (2014). Progressiruyushchee obrushenie vysotnykh zdaniy: inzhenernye aspekty sobytij 11 sentyabrya 2001 goda. *Predotvrashchenie avariya zdaniy i sooruzheniy*. (In Russian). Available at: <https://prevdis.ru/progressiruyushchee-obrushenie-vysotnykh-zdanij-inzhenernye-aspekty-sobytij-11-sentyabrya-2001-goda/> (accessed 10.02.2024).
17. Almazov, V. O., & Kao Zuy, K. (2013). *Dinamika progressiruyushchego razrusheniya monolitnykh mnogoetazhnykh karkasov*. Moscow, ASV Publ., 128 p. (In Russian).
18. Bao, Y., Kunnath, S. K., El-Tawil, S., & Lew, H. S. (2008). Macromodel-based simulation of progressive collapse: reinforced concrete frame structures. *Journal of Structural Engineering*, 134(7), pp. 1079-1091. (In English).
19. Lew, H. S., Bao, Y., Sadek, F. & Main, J. A. (2011). An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. *NIST Technical Note 1720*. (In English).
20. Mosalam, K. M. (2008). Modeling progressive collapse in reinforced concrete framed structures. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. (In English). Available at: <https://invenio.itam.cas.cz/record/11064?ln=en> (accessed 01.02.2024).
21. Meng, B., Hao, J., Zhong, W., Tan, Z., & Duan, S. (2020). Improving collapse-resistance performance of steel frame with openings in beam web. *Structures*, (27), pp. 2156-2169. (In English).
22. Malyshkin, A. P., & Esipov, A. V. (2014). Experience of design of wide-span covering taking into account prevention of progressive collapse. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*, (38(57)), pp. 40-48. (In Russian).
23. Alekseeva, A. A., & Esipov, A. V. (2018). Analiz stroitel'nykh norm dlya proektirovaniya bol'sheproletnykh zdaniy s uchetom nedopushcheniya progressiruyushchego obrusheniya. *Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov*, December, 22. Tyumen, Industrial University of Tyumen, 1, pp. 48-52. (In Russian).
24. Voloshchuk, D. A., & Esipov, A. V. (2018). Normativnye trebovaniya pri proektirovanii vysotnykh zdaniy s uchetom soblyudeniya trebovaniy progressiruyushchego obrusheniya. *Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov*, December, 22. Tyumen, Industrial University of Tyumen, 1, pp. 78-81. (In Russian).
25. Esipov, A. V., & Alekseeva, A. A. (2018). Raschet prognozov s uchetom nedopushcheniya progressiruyushchego obrusheniya shatra pokrytiya zdaniya so stal'nym karkasom. *Akademicheskij Vestnik URALNIIPROEKT RAASN*, (4(39)), pp. 89-93. (In Russian).

Сведения об авторах

Малышкин Александр Петрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru

Есипов Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru

Есипов Михаил Андреевич, бакалавр, Тюменский индустриальный университет, e-mail: yacorl.mail@gmail.com

Information about the authors

Aleksandr P. Malyshkin, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru

Andrei V. Esipov, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru

Mikhail A. Esipov, Bachelor, Industrial University of Tyumen, e-mail: yacorl.mail@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЫСИТЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Т. С. Жилина¹, М. Н. Сабукевич¹, Дан Ву Дин², Джанака Видесундара³

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Ханойский университет горного дела и геологии, Ханой, Вьетнам

³ Университет Моратувы, Моратува, Шри-Ланка

USING THE BOOSTER PUMPING STATIONS FOR MODERNIZATION OF HEAT SUPPLY SYSTEM

Tatiana S. Zhilina¹, Maria N. Sabukevich¹, Dang Vu Dinh², Janaka Wijesundara³

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

³ University of Moratuwa, Moratuwa, Sri Lanka

Аннотация. Авторы рассматривают проблему недостаточной мощности существующих котельных и сетей теплоснабжения в крупных городах, что приводит к перегрузкам и авариям. Модернизация работы систем теплоснабжения направлена на повышение энергоэффективности, экологической безопасности и надежности сетей теплоснабжения. Использование современных технологий позволяет значительно улучшить работу систем теплоснабжения и сделать теплоноситель более доступным и эффективным для потребителей.

В целях обеспечения бесперебойной работы объектов в селитебной застройке и эффективной работы тепловых сетей, а также тепловых магистралей, которые расположены в труднодоступных районах со сложным рельефом, авторы предлагают устанавливать или модернизировать повысительные насосные станции. Станции нужны для поддержания требуемых параметров теплоносителя и обеспечения качественным теплоносителем потребителей тепловой энергии. В статье рассмотрен

Abstract. The authors consider the problem of insufficient power of existing boiler houses and heat supply networks in large cities, which leads to overloads and accidents. Modernization of operation in heat supply system is aimed at improving energy efficiency, environmental safety and reliability of heat supply networks. The use of modern technologies provides a significant improvement in the operation of heat supply systems and makes the coolant more accessible and efficient for consumers. To ensure uninterrupted operation of heat supply facilities in residential areas and efficient operation of heat supply networks and heating mains in hard-to-reach areas with difficult terrain, the authors proposed to install or modernize booster pumping stations. Such stations help to keep the required parameters of the coolant and to provide heat consumers with quality coolant. The article discusses the operating principle of pumping stations and provides a functional diagram of process automation. Piezometric diagrams of pre- and post-installation of booster pumping stations

принцип работы насосных станций, приведена функциональная схема автоматизации технологического процесса. Пьезометрические графики, построенные до и после установки повысительных насосных станций, позволяют говорить о положительном эффекте модернизации повысительных насосных станций в системе теплоснабжения. Так, после реконструкции общая производительность насосных групп на подающем и обратных контурах возросла в 1.33 раза, напор в системе – в 1.12 раза.

Ключевые слова: тепловая сеть, теплоноситель, автоматизация, энергоэффективность, энергосбережение, модернизация системы теплоснабжения

allow us to speak about the positive effect of booster pumping stations modernization in the heat supply system. Thus, after reconstruction, the total capacity of pumping groups on the direct and return circuits increased by 1.33 times, the head in the system – by 1.12 times.

Key words: heat supply network, coolant, automation, energy efficiency, energy saving, modernization of heat supply system

Для цитирования: Применение повысительных насосных станций для модернизации систем теплоснабжения / Т. С. Жилина, М. Н. Сабукевич, Дан Ву Дин, Джанака Видесундара. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-56-66. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 56–66.

For citation: Zhilina, T. S., Sabukevich, M. N., Vu Dinh, Dang, & Wijesundara, Janaka. (2024). Using the booster pumping stations for modernization of heat supply system. Architecture, Construction, Transport, (2(108)), pp. 56-66. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-56-66.

1. Введение

Энергосбережение – одно из основных направлений развития системы теплоснабжения. В настоящее время сделан акцент на конкретные решения проблем энергосбережения, приоритетные с точки зрения потребителей тепловой энергии. Это предотвращение падения объемов поставляемого теплоносителя, уменьшение расхода теплоты в системах отопления, горячего водоснабжения и вентиляции зданий, уменьшение тепловпотерь или сокращение тепловых затрат зданий. Актуальным является вопрос о целесообразности и необходимости реконструкции повысительных насосных станций (ПНС), так

как повышение надежности функционирования энергоагрегатов ведет к повышению эффективности работы системы теплоснабжения и снижению износа оборудования при транспортировке теплоносителя от основного источника до потребителя.

В настоящее время применяется Федеральный закон «О теплоснабжении» от 27.07.2010 № 190-ФЗ¹, который устанавливает основные понятия в энергокомплексе системы теплоснабжения и определяет общие принципы организации отношений в сфере теплоснабжения. Однако законодательная база в сфере теплоснабжения постепенно обновляется, разрабатываются новые

¹ О теплоснабжении : Федеральный закон № 190-ФЗ : принят Государственной Думой 9 июля 2010 года : одобрен Советом Федерации 14 июля 2010 года : с изменениями на 26 февраля 2024 года. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902227764> (дата обращения: 10.04.2024).

положения и регламенты, обсуждаются принципиальные решения о направлениях развития системы теплоснабжения крупных городов [1]. Это вызвано необходимостью решить ряд накопившихся проблем.

Так, недостаточная мощность существующих котельных и сетей теплоснабжения [2] часто приводит к перегрузкам и авариям на сетях. Уровень потерь тепла в процессе передачи теплоносителя по сети бывает очень высоким, а это увеличивает расходы на топливо и снижает эффективность системы. Кроме того, устаревшие теплосети, задержки технического обслуживания и ремонта оборудования и недостаток инвестиций в развитие отрасли приводят к частым отказам, перебоям в подаче тепла и срывам графика отопительного сезона.

Модернизация системы теплоснабжения подразумевает повышение энергоэффективности, экологической безопасности и надежности сетей и является одной из важных задач, решаемых в сфере жилищно-коммунального хозяйства не только в России, но и в мире.

К примеру, существующая энергетическая политика государств-членов Европейского союза направлена на повышение энергоэффективности систем теплоснабжения и защиту окружающей среды. При внедрении новых технологий в области энергетики для зданий и снижении потребления энергии, необходимой для отопления помещений, проводятся изменения в системах централизованного теплоснабжения для сохранения их конкурентоспособности по сравнению с альтернативными индивидуальными решениями [3]. В основном это модернизация и реконструкция тепловых станций для выработки и транспортировки тепловой энергии и привлечение инвестиций для повышения энергоэффективности в сфере коммунальных услуг [4].

Ведущие российские ученые также продолжительное время работают над совершенствованием теоретической и методологической базы в этой отрасли, рассматривая разные варианты улучшения работы систем теплоснабжения. Так, например, проводятся расчеты математического моделирования работы насосной станции

[5], усовершенствование и урегулирование рыночных тарифных отношений в сфере теплоснабжения [6], проводится анализ по внедрению инновационных технологий в системы теплоснабжения [7].

Обновление инфраструктуры систем теплоснабжения с использованием современных материалов и технологий – важное направление развития отечественной энергетической отрасли. Использование современных технологий позволяет увеличить срок службы оборудования, повысить его энергоэффективность, снизить вероятность отказов, следовательно, значительно улучшить качество теплоснабжения и сделать его более доступным и эффективным для потребителей. Сейчас в обслуживающих организациях особое внимание уделяется обучению персонала и внедрению современных технологий контроля и управления системой теплоснабжения.

Это тем более актуально, что цифровая трансформация и автоматизация промышленности являются важными приоритетами в развитии страны. Отечественные компании активно инвестируют в повышение уровня защищенности своих систем кибербезопасности. Специалисты считают, что спрос на эти системы обусловлен растущими потребностями в автоматизации производства. Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) применяются на российских предприятиях и показали свою эффективность и актуальность в условиях пандемии [8, 9].

Под АСУТП обычно понимается комплексное решение, обеспечивающее автоматизацию основных операций технологического процесса на производстве в целом или каком-то его участке, выпускающем относительно завершенный продукт. Также составными частями АСУТП могут служить отдельные системы автоматического управления (САУ) и автоматизированные устройства, связанные в единый комплекс.

Как правило, АСУТП имеет единую систему операторского управления технологическим процессом в виде одного или нескольких пультов управления, средств обработки и архивирования информации о ходе процесса, типовых

элементов автоматики: датчиков, контроллеров, исполнительных устройств. Внедрение системы автоматизации – достаточно трудоемкий процесс, который требует длительного времени и больших финансовых затрат, поэтому предприятия, которые не обладают достаточными финансовыми возможностями, могут автоматизировать свое производство частично [10].

Автоматизация технологических и производственных процессов, работ является ключевой ветвью развития, переподготовки и экономического усовершенствования отечественной энергетической сферы. Рассматриваемый технологический процесс подразумевает наделение специализированного оборудования и приборов функциями управления, обработки информации и контроля.

В целях обеспечения бесперебойной работы объекта и правильной работы крупных тепловых сетей, а также тепловых магистралей, которые расположены в труднодоступных районах со сложным рельефом или в удаленных районах селитебной застройки, рекомендуется предусмотреть установку повысительных насосных станций. Они нужны для поддержания требуемых параметров теплоносителя и обеспечения качественным теплоносителем потребителей тепловой энергии.

Ресурсоснабжающие организации, как зарубежные, так и отечественные, также активно изучают вопросы модернизации и повышения эффективности системы теплоснабжения, стремясь улучшить взаимодействие между источниками тепла и конечными потребителями теплоносителя. Однако существует ряд методик модернизации систем теплоснабжения, которые пока трудно реализовать из-за их высокой стоимости

или потребности в значительных материальных ресурсах [11].

Одной из доступных методик, набирающей популярность среди ресурсоснабжающих организаций, является реконструкция объектов и субъектов теплоснабжения и установка новых энергетических агрегатов с учетом увеличения потенциала для развития инфраструктуры крупных городов.

Цель данного исследования заключается в анализе процесса модернизации систем теплоснабжения при реконструкции и установке повысительных насосных станций в условиях жилой застройки.

2. Материалы и методы

Современные теплоснабжающие организации следуют требованиям федеральных норм и правил, таких как:

- Приказ Минэнерго России от 24.03.2003 № 115², который устанавливает требования по технической эксплуатации тепловых энергоустановок;
- Федеральный закон № 261-ФЗ³, который регулирует мероприятия по энергосбережению и повышению энергетической эффективности для создания правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Авторы предлагают рассмотреть модернизацию системы теплоснабжения на примере крупного города с численностью жителей около 1 млн человек, где находятся в работе около 10 ПНС.

Повысительная насосная станция – это сложный технический комплекс, состоящий из обо-

² Об утверждении Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок: утверждены приказом Минэнерго РФ от 24.03.2003 № 115: Зарегистрировано в Минюсте РФ 2 апреля 2003 г. № 4358. – Текст: электронный // ГАРАНТ: сайт. – URL: <https://base.garant.ru/185671/> (дата обращения: 10.04.2024).

³ Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ: принят Государственной Думой 11 ноября 2019 года: одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 года. – Текст: электронный // ГАРАНТ: сайт. – URL: <https://base.garant.ru/12171109/> (дата обращения: 10.04.2024).

дования и сооружений, предназначенных для перекачки теплоносителя магистральной тепловой сети и регулирования гидравлического режима. Основным элементом насосной станции является насосный агрегат, включающий в себя один или несколько насосов, запорную арматуру, приводные электродвигатели, системы нагнетательных и всасывающих трубопроводов и средства измерения технических параметров [12].

ПНС повышают параметры теплоносителя, а именно давление в системе, до требуемых показателей и обеспечивают транспортировку тепловой энергии до удаленного конечного потребителя. В системе теплоснабжения ПНС является одним из главных элементов. Принцип ее работы основан на использовании насосов, которые перекачивают теплоноситель через трубопроводы от источника тепла к потребителям. В зависимости от конфигурации системы и условий эксплуатации насосы могут быть разного типа и мощности. При правильном подборе насосов и

настройке их работы обеспечена стабильная работа всей системы теплоснабжения и минимизация затрат на тепловую энергию.

Современные насосные станции обычно оснащены датчиками контроля давления, температуры и расхода теплоносителя, частотными преобразователями, что позволяет оперативно реагировать на изменения параметров в системе и предотвращать аварийные ситуации [13]. Все это в совокупности позволяет обеспечивать надежную и эффективную работу системы теплоснабжения для комфорта конечных потребителей.

Для каждого проектируемого объекта разрабатывается индивидуальная функциональная схема автоматизации. Условия разработки функциональной схемы автоматизации зависят от предоставленного технического задания, а также от условий дальнейшей работы объекта. Вышеуказанные условия прописываются в рамках проектно-сметной документации. На рис. 1 и 2 показаны функциональная схема автоматизации

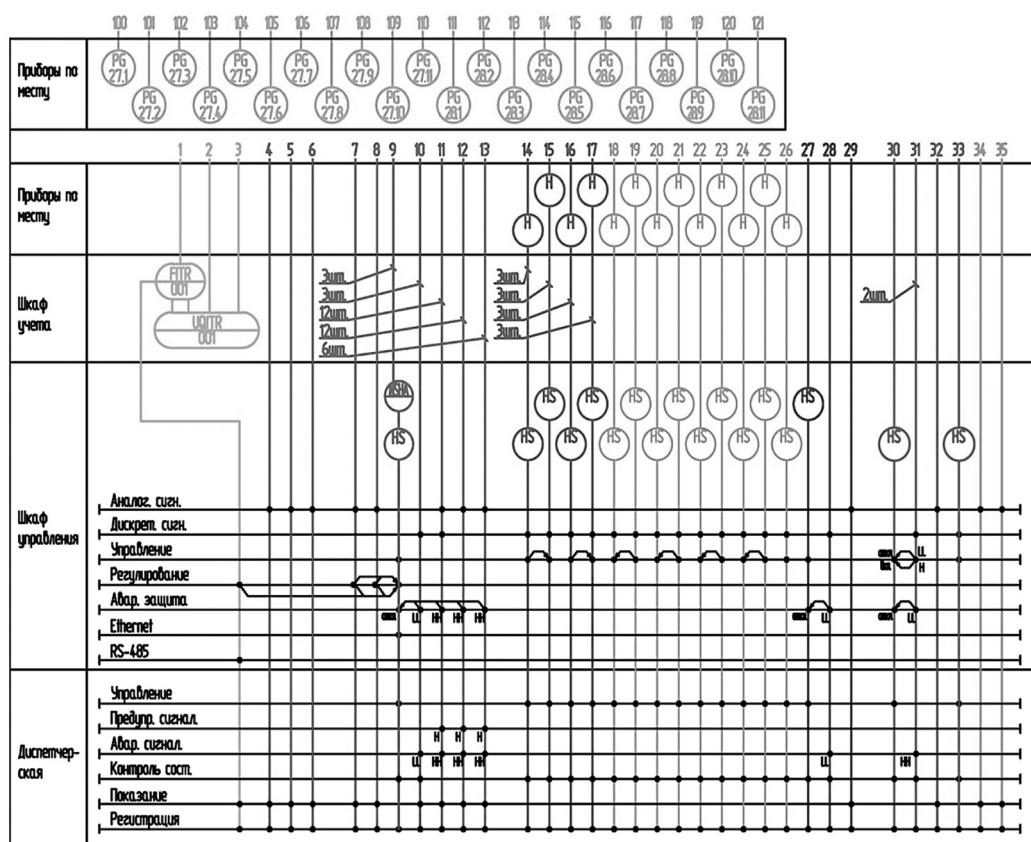


Рис. 1. Функциональная схема автоматизации ПНС
Fig. 1. Functional scheme of booster pumping station automation

и принципиальная схема, которые разрабатываются при проектировании новых ПНС в городе с численностью жителей около 1 млн человек. В случае аварийной ситуации на объекте через пульт управления дистанционно подается сигнал оператору.

Сигналом о срабатывании является какое-либо «критичное» отклонение параметров от нормы, заложенное для недопущения остановки ПНС (например, снижение напряжения на объекте). В этом случае сработает автоматический ввод резерва для переключения объекта к другому источнику ввода. Автоматика на ПНС полностью запускает все режимы работы оборудования и не допускает остановки процессов на ПНС.

Условные обозначения функциональной схемы автоматизации рис. 1 по позициям представлены в таблице 1.

По техническим решениям, разработанным в проектной документации, на принципиальной схеме (рис. 2) насосная группа установлена на обратном контуре для поддержания давления в системе в обратном трубопроводе в сторону источника теплоты.

Таблица 1/Table 1
Условные обозначения функциональной
схемы автоматизации
Conventional signs of the automation functional diagram

Позиция обозначения	Наименование
1	Расходомер-счетчик
2	Термопреобразователь сопротивления
3	Преобразователь давления
4	Реле давления
5	Преобразователь давления
6	Датчик вибрации подшипников
7	Датчик температуры подшипников
8	Датчик температуры обмоток электродвигателя
9	Кран шаровой
10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 34	Электропривод, установленный на поворотном затворе
11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 33	Поворотный затвор
21	Термопреобразователь сопротивления
27, 28	Манометр
29	Термометр
30	Поплавковый датчик уровня
31	Кран шаровой
32	Электропривод, установленный на шаровом кране
100–121	Манометры, установленные по месту

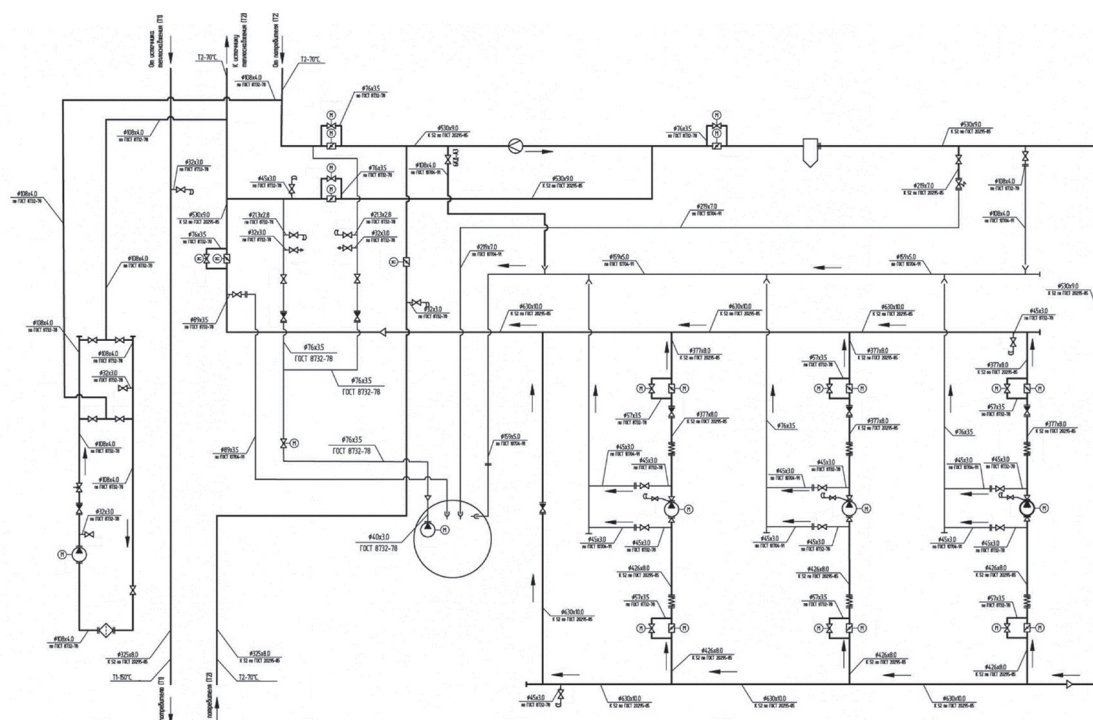


Рис. 2. Принципиальная схема ПНС
Fig. 2. Circuit diagram of the booster pumping station

Существующие методики модернизации, в данном случае модернизации существующей ПНС, направлены на замену (демонтаж) старого оборудования с последующей установкой нового и современного оборудования (насосных агрегатов, запорной и запорно-регулирующей арматуры).

При технической возможности применяется дистанционное и автоматизированное управление работой на станции, соответствующее современным тенденциям.

При строительстве новых ПНС на стадии проектирования предусматривается новое оборудование, которое будет обеспечивать требуемые параметры теплоносителя (давление) в системе теплоснабжения от источника теплоты до конечного потребителя в зависимости от конфигурации расположения насосной группы на подающем и/или обратном контурах. Конфигурация расположения насосной группы определяется в зависимости от условий местонахождения района, а также необходимости поддержания давления на определенном контуре системы теплоснабжения во избежание «просадки» параметров теплоносителя.

3. Результаты и обсуждение

В условиях крупного города с численностью около 1 млн человек модернизация системы теплоснабжения должна проводиться с особым вниманием к техническим и социальным аспектам. Необходимо рассмотреть все возможные варианты повышения эффективности системы, улучшения ее надежности и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Для анализа параметров теплоносителя был рассмотрен один из примеров проведенной реконструкции тепловой сети (модернизации субъекта системы теплоснабжения) в условиях крупного города с численностью около 1 млн граждан, а именно реконструкция ПНС.

Сбор параметров был осуществлен благодаря автоматизированной системе коммерческого учета тепловой энергии тепловой сети мониторинга, пьезометрические графики с критическими точками построены с помощью системы для

создания карт, моделирования инженерных сетей и разработки ГИС-приложений ZuluGIS.

До реконструкции на ПНС были установлены две группы центробежных насосных агрегатов на подающем и обратном контурах. На каждом контуре были установлены по 3 насосных агрегата с производительностью 2 500 м³/ч, напором 60 м вод. ст. (марка насоса СЭ 2500-60) и по 1 насосу с производительностью 1 250 м³/ч, напором 70 м вод. ст. (марка насоса СЭ 1250-70). Режим работы насосных агрегатов на каждом контуре: 3 в работе, 1 в резерве.

После реконструкции ПНС были установлены центробежные насосные агрегаты на подающем и обратном контурах по 4 насоса с производительностью 3 335 м³/ч, напором 67 м вод. ст. (марка насоса Wilo SCPE 500-600 DV MEDI-CCW-800/6-T6-I2/EX-FC-Pt100-Vib). Режим работы насосных агрегатов на каждом контуре: 3 в работе, 1 в резерве.

На рис. 3 показан пьезометрический график до реконструкции ПНС. На графике видны «просадки» в параметрах теплоносителя: минимальная разница давления на подающем и обратном трубопроводах, – выделенные на графике прямоугольником. При анализе конечные потребители на распределительной тепловой камере получали параметры по подающему и обратному трубопроводам с минимальной разницей по напору в системе. Разница напора влияет на показатель движущей силы теплоносителя, а именно на скорость теплоносителя в трубопроводе.

На рис. 4 показан пьезометрический график после реконструкции ПНС. На данном графике видны значительные отличия на участке, где ранее были «просадки» и низкие показатели у конечного потребителя на распределительной камере – увеличена разница напора между подающим и обратным трубопроводами.

Параметр разницы напора в тепловой сети имеет огромное значение для обеспечения эффективного функционирования системы. Разница напора является основным параметром, определяющим расход теплоносителя в системе [14]. Этот параметр влияет на эффективность работы оборудования, на распределение тепла по сети.

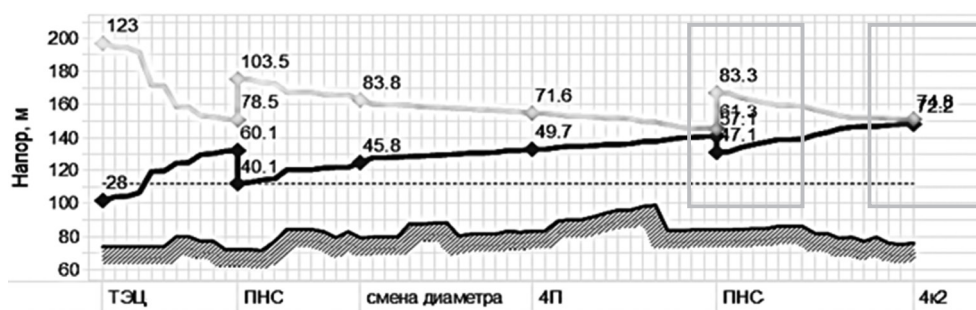


Рис. 3. Пьезометрический график от теплового источника до распределительной тепловой камеры до реконструкции существующей ПНС

Fig. 3. Piezometric diagram from the heat source to the heat distribution chamber before the reconstruction of the existing booster pumping station

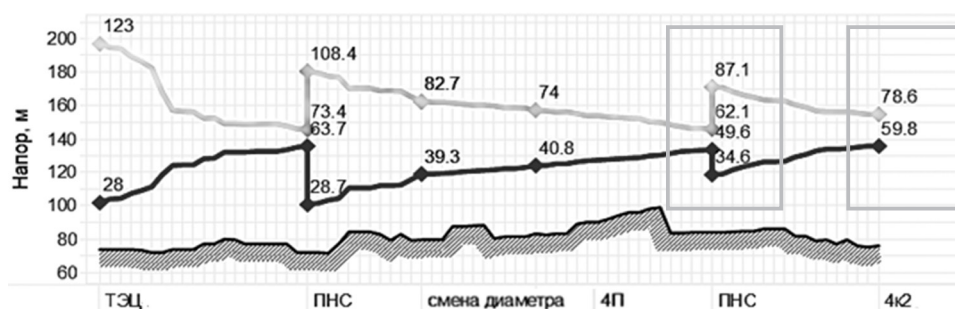


Рис. 4. Пьезометрический график от теплового источника до распределительной тепловой камеры после реконструкции существующей ПНС

Fig. 4. Piezometric diagram from the heat source to the heat distribution chamber after the reconstruction of the existing booster pumping station

Кроме того, разница напора влияет на надежность работы оборудования. Допущение большой и минимальной разницы напора может привести к износу и поломкам оборудования, что повлечет за собой дополнительные расходы на ремонт и замену деталей. Так, например, при минимальном параметре напора насосное оборудование будет часто выключаться. При превышающем параметре насос будет работать при полной нагрузке, что уменьшит срок износа комплектующих насосного оборудования. Поэтому поддержание оптимального уровня разницы напора необходимо для продления срока службы оборудования.

При рассмотрении вопроса модернизации тепловой сети и улучшения поставки теплоносителя для быстро застраивающихся и развива-

ющихся районов города возможно устройство новых ПНС. Новые ПНС сразу предполагают наличие АСУТП. В этом случае не требуется постоянное присутствие персонала на объекте. Предусмотрены центробежные насосные агрегаты с производительностью 1 065 м³/ч, напором 39 м вод. ст. Режим работы насосных агрегатов на каждом контуре: 2 в работе, 1 в резерве (марка насоса CNP DMC250-370E-160/4). Результаты представлены на рис. 5 и 6.

Как и в случае с реконструкцией, видны значительные отличия между параметрами теплоносителя, а именно выравнивание параметров теплоносителя без перегрузки тепловых сетей на участках и повышение разницы напора у конечной распределительной камеры.

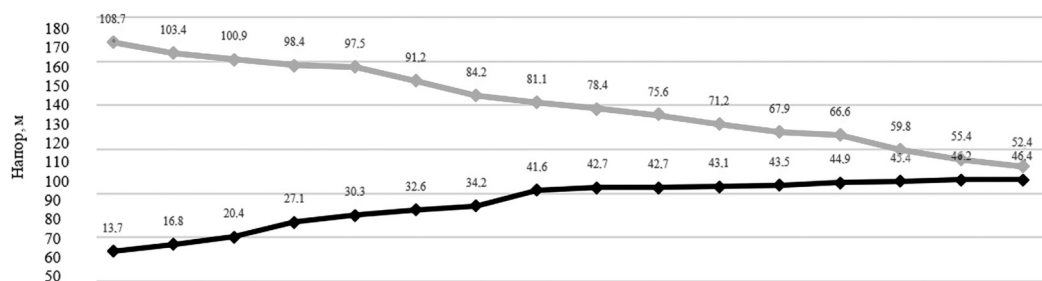


Рис. 5. Пьезометрический график от теплового источника до распределительной тепловой камеры до устройства новой ПНС
 Fig. 5. Piezometric diagram from the heat source to the heat distribution chamber until the construction of the new booster pumping station

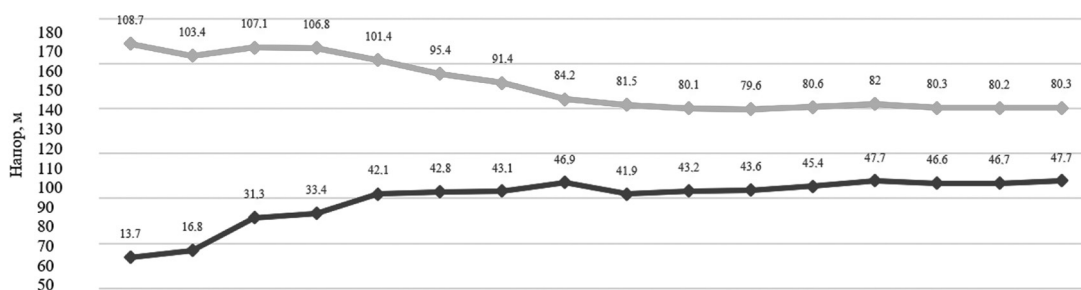


Рис. 6. Пьезометрический график от теплового источника до распределительной тепловой камеры после устройства новой ПНС
 Fig. 6. Piezometric diagram from the heat source to the heat distribution chamber after the construction of the new booster pumping station

4. Заключение

Для улучшения работы централизованных систем теплоснабжения в селитебной застройке необходимо проведение комплексных технических обследований, разработка планов мероприятий по модернизации и реконструкции оборудования и сетей, а также повышение уровня квалификации персонала. В связи с активным изменением застройки крупных городов требуется поддержание определенных гидравлических режимов для поддержания давления в системе теплоснабжения. Возникает необходимость замены установленного устаревшего оборудования на существующих ПНС, применения современных технологий и оборудования, повышение надежности работы насосных станций как элементов системы теплоснабжения.

Обновление и модернизация инфраструктуры систем теплоснабжения, реализация мероприятий по повышению надежности систем

теплоснабжения являются долгосрочными процессами, важный аспект которых – ранжирование по значимости и эффективности инвестиционных мероприятий.

На основании вышерассмотренного наглядно видно, что характеристики тепловой сети после реконструкции существующей ПНС увеличились: общая производительность насосных групп, находящихся на подающем и обратных контурах, в 1.33 раза, напор в системе на подающем и обратных контурах – в 1.12 раза. Это свидетельствует о повышении параметров тепловой сети для стабилизации общей работы в системе как в сторону потребителей, так и в сторону источника тепловой энергии.

Современные технологии позволяют автоматизировать процессы управления насосами, что делает эксплуатацию станции более эффективной и удобной.

Кроме того, модернизация позволяет улучшить контроль за состоянием оборудования и оперативно реагировать на возможные неисправности. Повышение эффективности и надежности работы насосов позволяет обеспечить более стабильную подачу теплоносителя, снижает

расход энергии и уменьшает число аварийных ситуаций. Модернизация повысительных насосных станций повышает общую эффективность системы теплоснабжения, а именно улучшает качество поставки параметров теплоносителя до конечного потребителя.

Библиографический список

1. Условия модернизации системы теплоснабжения в России // Издательский дом «Гелион» : сайт. – URL: <https://helion-ltd.ru/energitehnologia-l/> (дата обращения: 12.04.2024).
2. Жилина, Т. С. Исследование работы централизованных систем теплоснабжения в условиях селитебной застройки / Т. С. Жилина, М. Н. Павлова. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-1-36-44. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 1 (103). – С. 36–44.
3. On the influence of decommissioning an area thermal substation in a district heating system on heat consumption and costs in buildings – Long term field research / A. Siuta-Olcha, T. Cholewa, M. Gomółka [et al.]. – DOI 10.1016/j.seta.2021.101870. – Текст : электронный // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2022. – Vol. 50. – P. 101870. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138821008845> (дата обращения: 18.05.2024).
4. Matisoff, D. C. Modernizing the energy infrastructure at federal facilities: Should utilities play a bigger role? / D. C. Matisoff, M. A. Brown, S. Kale. – DOI 10.1016/j.tej.2022.107078. – Текст : непосредственный // The Electricity Journal. – 2022. – Vol. 35, No. 2. – P. 107078.
5. Mathematical modelling of pump station / K. D. Semenova, N. V. Savosteenko, N. M. Maksimov, N. A. Belov. – DOI 10.1088/1757-899X/919/6/062063. – Текст : непосредственный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, July 31, 2020. Vol. 919. International Scientific Conference CAMSTech-2020: Advances in Material Science and Technology. – Krasnoyarsk : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 62063.
6. Файн, Б. И. Либерализация отношений в сфере теплоснабжения Российской Федерации: предпосылки, первые результаты и тарифные последствия. – DOI 10.38050/01300105202212. – Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. – 2022. – № 1. – С. 27–51. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/liberalizatsiya-otnosheniy-v-sfere-teplosnabzheniya-rossiyskoy-federatsii-predposylki-pervye-rezultaty-tarifnye-posledstviya>.
7. Рабочих, М. В. Инновационные технологии в теплоснабжении / М. В. Рабочих. – Текст : непосредственный // Экономика и социум. – 2021. – № 12-2 (91). – С. 421–428.
8. Автоматизация промышленности. Тренды-2024 // Промышленные страницы : сайт. – 2024. – 24 января. – URL: <https://indpages.ru/solutions/avtomatizacziya-promyshlennosti-trendy-2024> (дата обращения: 18.05.2024).
9. Шавернева, Н. А. Проблемы автоматизации на производственных предприятиях. Организационное проектирование в современных условиях / Н. А. Шавернева, А. М. Шавернева. – Текст : непосредственный // Актуальные исследования. – 2021. – № 47 (74). – С. 102–104.
10. Луков, Д. К. Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) – Текст : непосредственный // European science. – 2019. – № 2 (44). – С. 19–21. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannye-sistemy-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-asu-tp> (дата обращения: 19.05.2024).
11. Бектемиров, А. Пути модернизации и совершенствования системы централизованного теплоснабжения / А. Бектемиров. – Текст : непосредственный // Архивариус. – 2020. – № 2 (47). – С. 128–130.
12. Кокорина, О. М. Анализ работы насосных подстанций, применяемых в водяных тепловых сетях / О. М. Кокорина, А. А. Лемаева, М. А. Мунарева. – Текст : непосредственный // Исследования молодых ученых : материалы Международной научной конференции, Казань, 20–23 июня 2019 года. – Казань : Молодой ученый, 2019. – С. 18–21.
13. Бажанов, Н. А. Оптимизация режимов работы насосных станций в системах теплоснабжения / Н. А. Бажанов. – Текст : непосредственный // Шаг в науку. – 2020. – № 2. – С. 29–32.
14. Чуйкина, А. А. Проектирование оптимальной трубопроводной трассы тепловой сети / А. А. Чуйкина, А. В. Лобода, О. А. Сотникова. – DOI 10.34031/2071-7318-2021-6-2-28-37. – Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2021. – № 2. – С. 28–37.

References

1. Usloviya modernizatsii sistemy teplosnabzheniya v Rossii. (In Russian). Available at: <https://helion-ltd.ru/energitehnologia-l/> (accessed 12.04.2024).
2. Zhilina, T. S., & Pavlova, M. N. (2023). Study of the operation of district heating systems in residential areas. *Architecture, Construction, Transport*, (1(103)), pp. 36-44. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-1-36-44.
3. Siuta-Oлча, A., Cholewa, T., Gomółka, M., Kołodziej, P., Østergaard, D. S., & Svendsen, S. (2022). On the influence of decommissioning an area thermal substation in a district heating system on heat consumption and costs in buildings – Long term field research. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, p. 101870. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138821008845> (accessed 18.05.2024). (In English). DOI 10.1016/j.seta.2021.101870.
4. Matisoff, D. C., Brown, M. A., & Kale, S. (2022). Modernizing the energy infrastructure at federal facilities: Should utilities play a bigger role? *The Electricity Journal*, 35(2), p. 107078. (In English). DOI 10.1016/j.tej.2022.107078.
5. Semenova, K. D., Savosteenko, N. V., Maksimov, N. M., & Belov, N. A. (2020). Mathematical modelling of pump station. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Krasnoyarsk, Russia, July 31, 2020. Vol. 919. International Scientific Conference CAMSTech-2020: Advances in Material Science and Technology. Krasnoyarsk, Institute of Physics and IOP Publishing Limited Publ., pp. 62063. (In English). DOI 10.1088/1757-899X/919/6/062063.
6. Fayn, B. I. (2022). Liberalization of relations in the Russian Federation heat supply field: background, first results and tariff consequences. *Moscow University Economics Bulletin*, (1), pp. 27-51. (In Russian). DOI 10.38050/01300105202212.
7. Rabochih, M. V. (2021). Innovative technologies in heat supply. *Ekonomika i sotsium*, (12-2(91)), pp. 421-428. (In Russian).
8. Avtomatizatsiya promyshlennosti. Trendy-2024. (In Russian). Available at: <https://indpages.ru/solutions/avtomatizatsiya-promyshlennosti-trendy-2024> (accessed 18.05.2024).
9. Shaverneva, N. A., & Shaverneva, A. M. (2021). Problems of automation at manufacturing enterprises. *Organizational design in modern conditions. Aktual'nye issledovaniya*, 47(74), pp. 102-104. (In Russian).
10. Lukov, D. K. (2019). Automated control system of technological process (ACS TP). *European science*, (2(44)), pp. 19-21. (In Russian).
11. Bektemirov, A. (2020). Puti modernizatsii i sovershenstvovaniya sistemy tsentralizovannogo teplosnabzheniya. *Archivarius*, (2(47)), pp. 128-130. (In Russian).
12. Kokorina, O. M., Lemaeva, A. A., & Munareva, M. A. (2019). Analiz raboty nasosnykh podstantsiy, primenyaemykh v vodyanykh teplovykh setyakh. *Issledovaniya molodykh uchenykh: materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*, Kazan, June 20-23, 2019. Kazan, Molodoy uchenyy Publ., pp. 18-21. (In Russian).
13. Bazhanov, N. A. (2020). Optimization of pump station operation modes in heat supply systems. *Step to Science*, (2), pp. 29-32. (In Russian).
14. Chuykina, A., Loboda, A., & Sotnikova, O. (2021). Design of the pipeline route of the heat network. *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, (2), pp. 28-37. (In Russian). DOI 10.34031/2071-7318-2021-6-2-28-37.

Сведения об авторах

Жилина Татьяна Семеновна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: zhilinats@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7832-2331

Сабукевич Мария Николаевна, аспирант кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: pavmashanic@gmail.com

Дан Ву Дин, д-р техн. наук, Университет горного дела и геологии Ханоя, e-mail: dangvudinh@humg.edu.vn

Джанака Видесундара, д-р техн. наук, профессор архитектуры, заведующий кафедрой архитектуры, Университет Моратувы, e-mail: jwijesundara@uom.lk. ORCID 0000-0003-4483-7067

Information about the authors

Tatiana S. Zhilina, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: zhilinats@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7832-2331

Maria N. Sabukevich, Postgraduate at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: pavmashanic@gmail.com

Dang Vu Dinh, PhD in Engineering at the Department of Machinery and Equipment in Mining, Hanoi University of Mining and Geology, e-mail: dangvudinh@humg.edu.vn

Janaka Wijesundara, D. Sc. in Engineering, Professor of Architecture, Head at the Department of Architecture, University of Moratuwa, e-mail: jwijesundara@uom.lk. ORCID 0000-0003-4483-7067

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАМАТЕРИАЛОВ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В. А. Митрошин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Россия

SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES USING METAMATERIALS: CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Vasilii A. Mitroshin

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Аннотация. Ввиду уплотнения и увеличения этажности городской застройки в мире растет число исследований в области защиты зданий и сооружений от сейсмических волн, поскольку распространяющийся в массиве грунта волновой сейсмический фронт способен привести к колоссальным разрушениям и массовым жертвам. Наиболее распространенными методами сейсмозащиты зданий и сооружений в гражданском строительстве в настоящее время являются конструктивные и территориальные способы. Первый метод включает комплекс конструктивных мероприятий, среди которых важное место занимает применение сейсмоизоляторов – специальных устройств, вводимых в фундамент и снижающих инерционные сейсмические воздействия на строительные конструкции. Второй способ предполагает использование различных барьеров на пути распространения сейсмических волн. В последние годы явно обозначилась тенденция поиска новых подходов к территориальной сейсмозащите. Анализ академических баз данных позволил выявить большое число исследований (преимущественно зарубежных), посвященных разработке способов защиты зданий и со-

Abstract. Due to the compaction of urban development and increase in its number of floors, the number of studies in the field of protection of buildings and structures from seismic waves is growing in the world, as the wave seismic front in the soil mass can lead to enormous destruction and mass casualties. The most common methods of seismic protection of buildings and structures in civil engineering today are constructive and territorial methods. The first method includes a set of structural measures, among of them an important place is occupied by the use of seismic isolators – special devices inserted into the foundation and reducing inertial seismic effects on building structures. The second way is the use of various barriers in the path of seismic wave propagation. In recent years, there has been a clear trend towards finding new approaches to territorial seismic protection. The analysis of academic databases revealed a large number of studies (mostly foreign) devoted to the development of ways to protect buildings and structures from wave action using various kinds of composite structures – metamaterials. Some researchers conditionally divide these methods into two groups: the first performs the tasks of masking,

оружий от волнового воздействия с помощью различного рода композиционных структур – метаматериалов. Эти способы некоторые исследователи условно делят на две группы: одни выполняют задачи маскировки, когда волновой фронт отклоняется и огибает защищаемый объект, другие создают искусственную теневую зону, в которой сейсмические волны затухают, не оказывая существенного влияния на здания и сооружения. Так как для российской науки разработка сейсмических метаматериалов пока является новым, но, безусловно, перспективным направлением исследований, целью данного обзора была систематизация имеющихся сведений о способах эффективной защиты зданий и сооружений от волновых воздействий.

Ключевые слова: метаматериалы, сейсмические волны, искусственный барьер, затухание волн, аналитический обзор

when the wave front deviates and wraps around the protected object, and the second creates an artificial shadow zone where seismic waves are damped without significantly affecting buildings and structures. Since the development of seismic metamaterials is still a new but certainly promising area of research for Russian science, the purpose of this review was to systematise the available data on the methods of effective protection of buildings and structures from wave impacts.

Key words: metamaterials, seismic waves, artificial barrier, seismic-waves attenuation, analytical review

Для цитирования: Митрошин, В. А. Сейсмическая защита зданий и сооружений с применением метаматериалов: текущее состояние и перспективы развития / В. А. Митрошин. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-67-83. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 67–83.

For citation: Mitroshin, V. A. (2024). Seismic protection of buildings and structures using metamaterials: current status and development prospects. Architecture, Construction, Transport, (2(108)), pp. 67-83. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-67-83.

1. Введение

В настоящее время многие ведущие научно-исследовательские институты и лаборатории мира занимаются проблемами защиты зданий от сейсмических волн с помощью метаматериалов, которые используются в качестве барьера на пути сейсмического волнового фронта. Метаматериал – это композиционный материал, свойства которого могут быть заранее заданы путем внедрения в исходный природный материал различных структур разнообразных форм и конфигураций. Компоненты метаматериала, готовые микро- или макроструктуры, называются метаатомами. Подробное рассмотрение современного состояния данного вопроса и являлось

целью данного обзора. В качестве исходных данных использовались исследовательские и обзорные материалы по теме статьи. Поиск источников осуществлялся в базах Elibrary (на русском языке) и Google Scholar (на английском языке). Итоговая выборка содержала в себе труды преимущественно с 2006 по 2020 год. Для подбора релевантных публикаций использовались следующие ключевые слова: seismic metamaterials/сейсмические метаматериалы, seismic-waves attenuation/ослабление сейсмических волн, soil-structure interaction/взаимодействие грунт – сооружение и др. Предпочтение отдавалось публикациям, в которых содержались результаты численных или натурных экспериментов.

Прежде чем перейти к рассмотрению известных способов сейсмической защиты с применением метаматериалов, кратко изложим основы метода волнового обтекания и осветим результаты первых наиболее значимых теоретических исследований.

Метод волнового обтекания

Согласно [1–3], задача маскирующего покрытия состоит в искривлении фронта падающего излучения, чтобы за маскируемым объектом лучи принимали прежнее направление. Оптическая длина пути каждого луча должна быть одинаковой и такой, будто на пути фронта препятствие отсутствует. Основная идея метода состоит в применении материалов, обладающих неоднородностью внутреннего строения. Один из первых экспериментов по применению метаматериалов в качестве маскирующего покрытия провели ученые-физики из Великобритании Дж. Пендри и Д. Шуриг [1, 4]. Речь идет о так называемой электромагнитной маскировке, при которой маскируемый объект становится фактически невидимым для падающего излучения. Проектирование маскирующей оболочки основывается на координатном преобразовании, с помощью которого пространство вокруг маскируемого тела трансформируется в оболочку. В теоретической части исследования показано, что вследствие инвариантности уравнений Максвелла относительно преобразований координат

нат затронуты будут лишь компоненты тензоров диэлектрической и магнитной проницаемости. Благодаря этим сложным свойствам материала получаемое маскирующее покрытие (оболочка), включая скрываемый объект, становится фактически невидимым извне. Таким образом, маскировка не рассеивает волны и не оставляет тени в пропускаемом излучении.

В натурном эксперименте [5] маскирующее покрытие было выполнено в виде оболочки из десяти слоев высотой в три элементарные ячейки каждый. На рис. 1 показаны разрез экспериментальной установки, структура маскирующего покрытия и форма элементарной ячейки. Одна ячейка – так называемый резонатор, параметры которого были специальным образом откалиброваны.

Размеры резонатора приняты следующими: $a_\theta = a_z = 10/3$ мм, $a_r = 10/\pi$ мм. Параметры диэлектрической и магнитной проницаемости настраивались с помощью варьирования геометрических размеров s и r (рис. 1с), которые смещают частоты электрического и магнитного резонансов (с учетом компенсации некоторого перекрестного влияния).

Следует отметить, что радиусы слоев были подобраны таким образом, чтоб на длине окружности помещалось целое число резонаторов. Маскируемым объектом в данном эксперименте выступал полый проницаемый цилиндр. Микро-волны подавались через специальный коакси-

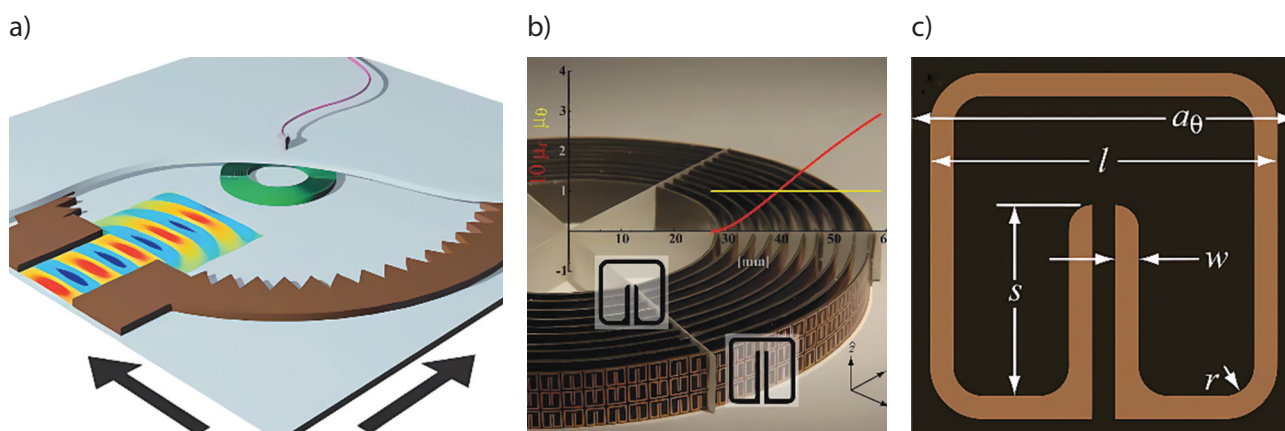


Рис. 1. Экспериментальная установка: а) 3D-модель в разрезе; б) структура маскирующего покрытия (поступающие по волноводу микроволны отмечены цветными полосами); в) форма элементарной ячейки [5]
 Fig. 1. Experimental setup: a) 3D model in section; б) structure of the masking coating (microwaves coming through the waveguide are marked with coloured stripes); в) shape of the unit cell [5]

альный волновод, прикрепленный к нижней пластине. Испытуемые образцы помещались в центр экспериментальной установки и облучались микроволнами на дискретном наборе частот, который включал также ожидаемую рабочую частоту маскирующего покрытия. На каждой частоте проводился ряд измерений. Анализ данных показал, что частота 9.5 ГГц – оптимальная. Это практически совпало с расчетами. На рис. 2 проиллюстрированы зависящие от времени стационарные характеристики электрического поля с линиями, показывающими направление потока энергии поля для цилиндра без маскирующего покрытия и для цилиндра с маскировкой. Результаты эксперимента подтвердили принципиальную возможность создания маскирующих покрытий из метаматериалов с заранее заданными свойствами, хотя и не без некоторых приближений вследствие несовершенства технологий и расчетных моделей.

Эксперимент с использованием маскирующего покрытия в виде цилиндрической оболочки положил начало исследованиям, посвящен-

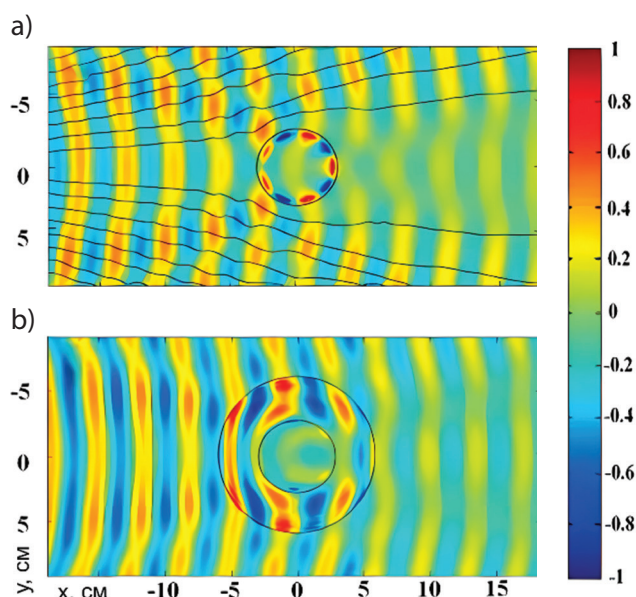


Рис. 2. Графики зависящих от времени стационарных характеристик электрического поля: а) без маскирующего покрытия; б) с маскирующим покрытием [2], [5]
Fig. 2. Diagrams of stationary characteristics of the electric field depend on time: a) without masking coating; b) with masking coating [2], [5]

ным применению других форм покрытий: сфер, эллиптических цилиндров [6], произвольных цилиндров [7], трехмерных оболочек [8, 9] и др.

В настоящем обзоре акцент сделан на применении метаматериалов для сейсмической защиты зданий и сооружений.

2. Основная часть

Создание искусственных барьеров из метаматериалов

Ввиду невозможности контролировать распространение сейсмического фронта традиционные проектные решения, направленные на повышение устойчивости зданий и сооружений к вибрациям или воздействиям сдвиговых волн, не способны обеспечить полноценную защиту. Более эффективными, по мнению авторов [10], являются такие методы борьбы с разрушительным действием землетрясений с применением акустических метаматериалов, как отражение и ослабление волнового фронта. Первый способ основан на отводе набегающих волн от фундамента здания, хотя отраженные сейсмические волны все еще остаются опасными для окружающих строений. Второй способ предполагает создание искусственной теневой зоны с помощью специальных свойств метаматериалов с целью ослабления падающих волн.

В [10] авторы приводят формулу для определения эффективного модуля сдвига упругого материала, реализуемого путем пропускания волн через массив резонаторов Гельмгольца. При достижении отрицательных значений данного модуля сдвига E происходит гашение амплитуды сейсмических волн:

$$E_{eff}^{-1} = E^{-1} \left[1 - \frac{F\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega} \right], \quad (1)$$

где ω , ω_0 – циклическая и резонансная частота, Γ – вязкие потери, F – геометрический параметр.

Энергия сейсмических волн рассеивается внутри специальных метаконтейнеров, а поглощенная энергия превращается в звук и тепло.

Сейсмический барьер состоит из множества подобных резонаторов вокруг фундамента защищаемого здания. Амплитуда сейсмической волны, проходящей через метаконтейнеры, уменьшается в диапазоне частот отрицательного E .

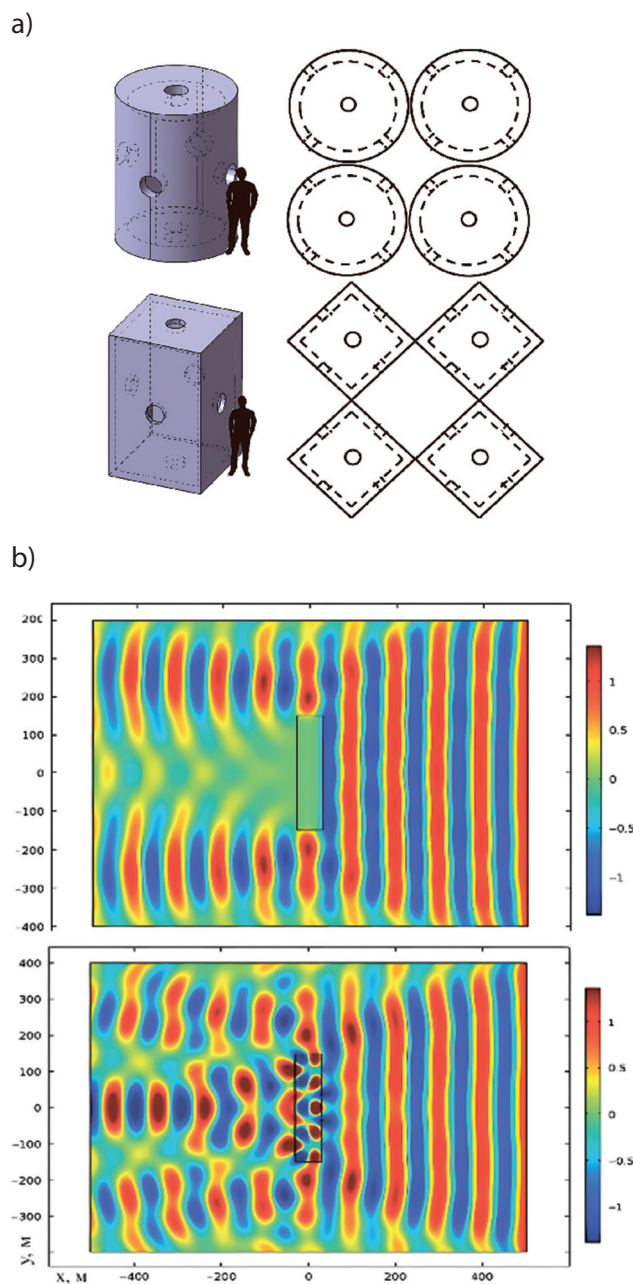


Рис. 3. Искусственный барьер из метаконтейнеров:
а) общий вид; б) результаты численного
моделирования [10]

Fig. 3. Artificial barrier constructed of metacontainers:
a) general view; b) results of numerical modelling [10]

Использование различно настроенных резонаторов позволяет покрыть максимально широкий диапазон частот. Метаконтейнер может быть любой формы (например, полый цилиндр или параллелепипед) с несколькими боковыми отверстиями. На рис. 3а показан общий вид метаконтейнеров в сравнении с человеческой фигурой (в масштабе), а также их возможное взаимное расположение в составе защитной конструкции. Чем больше геометрический параметр F , тем больший диапазон частот способен охватить барьер.

Численный эксперимент, проведенный с помощью программного комплекса COMSOL, показал, что за массивом резонаторов образовалась теневая зона (рис. 3б). У обыкновенных заграждений такого эффекта не было.

Следует отметить, что для эффективной защиты зданий и сооружений длина подобных барьеров должна значительно превышать габариты защищаемого строения из-за эффекта дифракции с обеих сторон барьера (рис. 4).

Натурных экспериментов по данной теме не проводилось.

Влияние лесов на затухание волн Рэлея

В работе [11] представлены результаты численных и натурных экспериментов по исследованию взаимодействия распространяющихся в мягкой осадочной почве на частотах ниже 150 Гц волн Рэлея с лесопосадкой. Геофизическое исследование было проведено в небольшом (около 60 тыс. м²) хвойном лесу неподалеку от Университета Жозефа Фурье в Гренобле (Франция). Два трехкомпонентных сейсмодатчика S1 и S2 в режиме реального времени записывали показания в двух разных точках в течение одного часа. Датчик S2 находился достаточно далеко от лесного массива, а датчик S1 – в глубине лесной посадки (рис. 4а).

Анализ результатов измерений выявил два явных минимума на графике в частотах между 30 и 45 Гц, а также 90 и 110 Гц. Энергия колебаний, проходящих сквозь лес на этих частотах, уменьшается в 6 раз.

Экспериментальная площадка имела простые геологические условия. Лес располагался

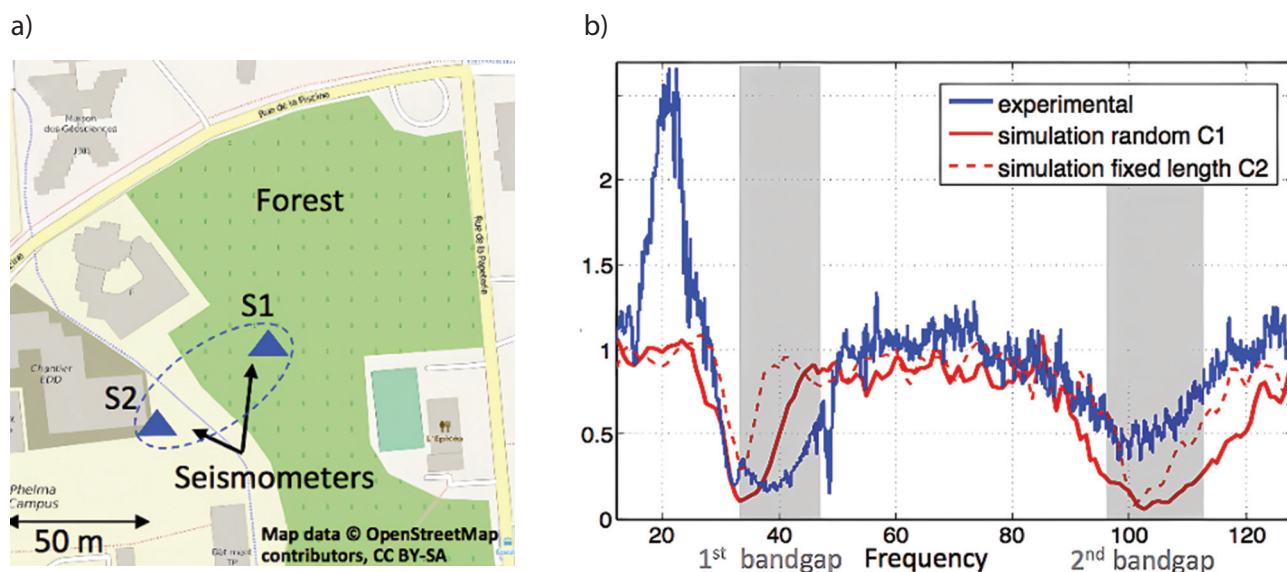


Рис. 4. Исследование взаимодействия волн Рэлея с лесопосадкой:
 а) расположение сейсмометров; б) сравнение результатов численного и натурного экспериментов [11]
 Fig. 4. Study of Rayleigh waves interaction with forest plantation:
 а) location of seismometers; б) comparison of results of numerical and in-situ experiments [11]

на сравнительно ровной геологически однородной площадке, что облегчило процесс моделирования и последующего сравнения результатов.

В численном эксперименте деревья моделировались однородными упругими вертикальными резонаторами постоянной толщины и, следовательно, постоянного поперечного сечения. Неоднородность природного леса учитывалась резонаторами разной высоты (средний размер $14 \text{ м} \pm 2.5 \text{ м}$). Расстояние между резонаторами принималось случайным (на рис. 4б сплошная кривая C1), а также фиксированным (на рис. 4б прерывистая кривая C2). Плотность древесины была принята равной 450 кг/м^3 .

Численный эксперимент показал, что искусственно созданный локально резонирующий метаматериал, состоящий из вертикальных резонаторов, обладает динамическими свойствами, аналогичными свойствам деревьев. Необходимо заметить, что при варьировании размеров и месторасположений деревьев (сплошная кривая C1) ширина зоны ослабления сигнала больше, чем при однородной конфигурации лесного массива (прерывистая кривая C2). Эти эксперименты позволяют осторожно выдвинуть предпо-

ложение, что различные метаматериалы можно использовать для создания защиты зданий и сооружений от упругих волн.

В целом лесные деревья считаются эффективным средством смягчения вибраций, распространяющихся в неглубоко залегающих слоях земной коры. В некоторых работах по данной тематике лесные массивы называют *естественным метаматериалом*. Данное определение не очень точно описывает суть современных метаматериалов, тем не менее, динамические процессы, происходящие в массиве грунта под лесопосадкой в момент прохождения волнового фронта, близки к аналогичным процессам в случае использования искусственных барьеров из метаматериалов.

Затухание поверхностных волн, проходящих через барьер из метаматериалов

Полученные в ходе натурных экспериментов результаты исследований затухания поверхностных волн, проходящих сквозь барьер из метаматериалов, изложены в [12, 13]. В [12] исследована возможность применения метаматериалов не только для высокочастотных антропогенных источников (взрывов, свабойной вибрации, передвижений и операционной деятельности тяжелой

строительной техники и пр.), но и для низкочастотных диапазонов землетрясений 0.1–50 Гц. Авторам [12] представляется возможным использовать искусственный анизотропный слой для воздействия на проходящие сквозь него сейсмические волны. Поскольку грунты весьма неоднородны, а их характеристики различны, для корректного учета максимально возможного числа параметров в модели потребовалось провести предварительные полевые испытания с целью уточнить необходимые характеристики грунта. В дальнейших расчетах использовалась следующая приближенная модель пластины Миндлина:

$$\begin{aligned} kh \left(\nabla \cdot \mu \nabla \Psi + \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \rho h \omega^2 \Psi &= 0, \\ \nabla \cdot D(1-\nu) \nabla u + \frac{\partial}{\partial x} \left[D(1+\nu) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \\ - 2k\mu h \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} + u \right) + \frac{\rho h^3}{6} \omega^2 u &= 0, \\ \nabla \cdot D(1-\nu) \nabla v + \frac{\partial}{\partial y} \left[D(1+\nu) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - \\ - 2k\mu h \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y} + v \right) + \frac{\rho h^3}{6} \omega^2 v &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где k, μ, ρ, ν – постоянная нормализации Миндлина ($\pi^2/12$), модуль сдвига, плотность и коэффициент Пуассона соответственно,

h – толщина плиты,
 D – жесткость плиты.

Модуль сдвига может быть вычислен по формуле:

$$\mu = E/2(1+\nu),$$

где E – модуль упругости.

Единственное дифференциальное уравнение в частных производных четвертого порядка может быть получено для Ψ путем исключения u и v . При рассмотрении чистого изгиба (приближение Кирхгофа – Лява для тонких пластин) получается:

$$\rho^{-1} \nabla \left[\sqrt{E} \cdot \nabla \rho^{-1} \nabla \cdot (\sqrt{E} \nabla \Psi) \right] - \omega^2 \frac{\rho h}{D} \Psi = 0. \quad (3)$$

Плотность грунта была принята равной 1500 кг/м³, а в пройденных пустотах – 1.2 кг/м³. Диаметр включений составлял 0.32 м. Толщина пластины $h = 5$ м, а жесткость плиты рассчитывалась по формуле: $D = Eh^3 / 12(1-\nu^2)$ при $E = 100$ МПа, $\nu = 0.3$.

Моделирование проводилось в программном комплексе COMSOL. Испытательная установка представляла собой заглубленный источник вибрации частотой излучения 50 Гц с боковой амплитудой 0.014 м в плоскости x – y , что должно было привести к достаточно сильному отражению поверхностных упругих волн от крупного метаматериала (барьера из цилиндрических пустот). Для измерения энергетического поля было установлено 20 трехкомпонентных датчиков. Барьер был

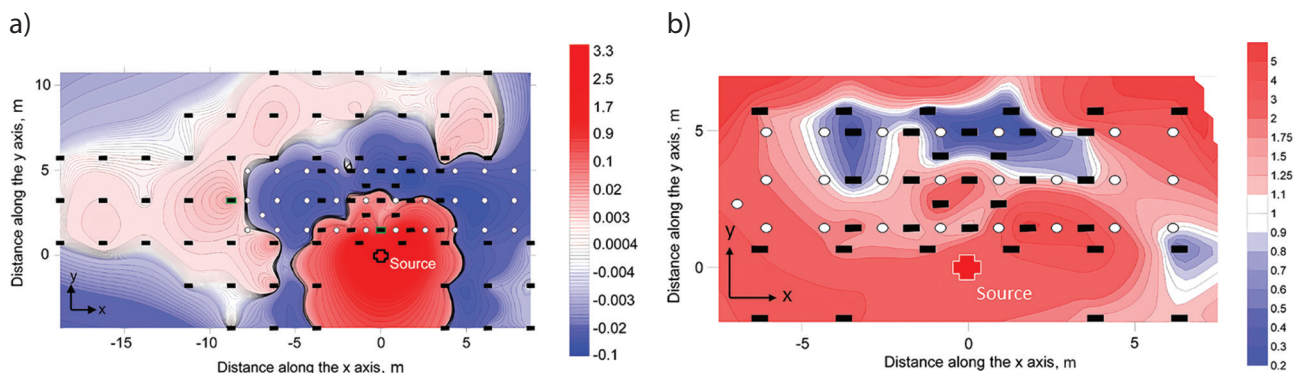


Рис. 5. Результаты эксперимента: а) измерения разности энергетических полей;

б) измерения отношения энергетических полей [12]

Fig. 5. Experimental results: a) energy field difference measurements; b) energy field ratio measurements [12]

организован из регулярной сетки вертикальных цилиндрических пустот диаметром 0.32 м длиной 5 м и расстоянием в плане около 1.73 м.

На рис. 5 показаны результаты эксперимента: разность ($J_2 - J_1$) и отношение (J_2/J_1) измеренной энергии после (J_2) и до (J_1) устройства скважин. На рисунке датчики показаны черными прямоугольниками, скважины – белыми окружностями, источник вибрации обозначен красным крестом.

Следует отметить, что численное моделирование перед проведением эксперимента не учитывало вязкоупругие свойства грунта, которые проявились в процессе полевых измерений. На рис. 5а показана концентрация энергии вблизи источника вибрации в радиусе примерно 5 м, сильно затухающей по мере удаления от него в сторону защищаемой конструкции. В этой области и вблизи источника разница между измеренным энергетическим полем до и после бурения скважин может достигать двойки, что подтверждает эффекты отражения и поглощения поверхностных волн сейсмическим метаматериалом (термин из [12, 13]). Измеряемый сигнал едва преодолевает второй ряд полостей, что свидетельствует об эффективности предлагаемого решения. Также в выводах рассматриваемой публикации отмечается, что для сейсмической защиты здания расположение скважин может и не быть строго упорядоченным.

Особенности проектирования одномерных метаматериалов для сейсмической защиты

Обобщим некоторые понятия, рассмотренные в предыдущих разделах. Метаматериалы относятся к искусственно созданным структурам с заранее заданными характеристиками и периодическим внутренним строением. С помощью специальным образом заданных параметров метаматериала можно «запретить» прохождение сквозь него волн на определенных частотах. В литературе на английском языке эти «запрещенные» частоты называются термином «bandgaps», дословно перевести который можно как «разрыв диапазона». Первые исследования в этой области были посвящены прежде всего электромагнитным метаматериалам [14–20]. Впоследствии

был предложен термин «*фотонный кристалл*» для явления контроля спонтанного излучения и локализации света в трехмерных неупорядоченных материалах. Распространение частиц подавлялось фотонным кристаллом, особенностью которого являлось наличие так называемых запрещенных диапазонов, в которых световые волны распространяться не в состоянии.

Подобно фотонным кристаллам, подавляющим световое излучение, можно также управлять распространением механических волн с помощью акустических метаматериалов, называемых *фононными кристаллами*. Термин «фонон» относится к материалам, предназначенным для контроля направления и управления акустическими волнами в газах, жидкостях или твердых телах. Диапазон запрещенной зоны определяется геометрией конструкции и характеристиками самого метаматериала. Таким образом, задача подавления волнового фронта с помощью элементов, размеры которых сравнимы с размерами самой волны, в данном случае не является неразрешимой. В то же время фононные и фотонные кристаллы изготавливаются из разных исходных материалов и обладают разными свойствами. Подробно их различия описаны в [21].

Встречаются зарубежные исследования, посвященные разработке оснований и фундаментов пролетных сооружений с использованием одномерных [22, 23], двумерных [24–27] и трехмерных [28] метаматериалов для защиты от вертикальных сейсмических волн. Различные комбинации бетона, резины и стали, упорядоченные в строгом соответствии с расчетами, показали неплохую способность к подавлению падающих волн в частотах, близких к спектру сейсмических волн. Экспериментальные исследования на масштабных моделях описаны в [23, 27, 28]. В целом, проектирование барьеров с использованием метаматериалов имеет целью рассеяние сейсмических колебаний грунта и сводится к использованию массивов из резонирующих элементов, а именно: сетей из полых заглубленных цилиндров [29], специально настроенных демпферов [30], решеток из вложенных масс [31, 32], а также других поглотителей [33, 34]. Сложность состоит

в том, что множество различных резонаторов должны покрывать соответствующий типичным землетрясениям частотный диапазон. В работе [10] авторы предположили, что заглубление сравнительно больших резонаторов Гельмгольца позволит преобразовать поступающие сейсмические волны в акустическую энергию, а затем в тепло. Однако численное моделирование, проведенное в [35], лишь частично подтвердило это предположение. Анализ результатов позволяет заключить, что рассеяние возможно только на дискретных резонансных частотах. Также авторы отмечают, что волны сдвига не могут взаимодействовать с резонаторами, заполненными воздухом или жидкостью, что делает такой метод не столь эффективным для разрушительных землетрясений.

В то же время остаются нерешенными многие проблемы, связанные с сейсмозащитой зданий и сооружений. Сейсмические волны состоят из поверхностных и объемных волн. Если первый тип распространяется практически в горизонтальном направлении, то второй (объемные волны) распространяется от эпицентра к поверхности земли и может быть практически вертикальным. Большая часть исследований в сфере применения метаматериалов посвящена созданию барьеров, препятствующих поверхностным волнам.

Также отметим, что диапазон рабочих частот фоновых кристаллов значительно ниже того диапазона, в котором распространяются сейсмические волны. Длины сейсмических волн могут достигать нескольких километров. Технически создать метаматериал с запрещенной зоной таких размеров довольно трудно. Кроме того, зарубежные исследователи отмечают, что необходимо соблюдать осторожность в отношении вычисления несущей способности проектируемого фундамента с включением метаматериалов, которые влияют на устойчивость защищаемого здания. При использовании материала с очень низким модулем упругости и скоростью передачи волн такие периодические основания могут создавать дополнительные резонансные пики в диапазоне низких частот [23, 27, 28].

На основании [36] рассмотрим подробнее одномерный сейсмический метаматериал, состоящий из двух типов упругих материалов (рис. 6). Подобные слоистые структуры описываются с помощью дисперсионного соотношения, содержащего в себе информацию о параметрах и соотношениях этих параметров, составляющих структуру материалов.

Кратко обозначим основные предпосылки и результаты исследований, представленные в [36]. Одномерный слоистый метаматериал состоит из двух повторяющихся слоев, организованных в горизонтальном направлении. Толщина каждого слоя в одной ячейке метаматериала обозначена на рис. 6 как a_1 , a_2 . Падающее излучение вдоль оси x перпендикулярно плоскости слоев и описывается следующим выражением:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_i^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где i – номер слоя,

u_i – перемещение,

C_i – скорость волны в слое i .

Скорости продольных и поперечных волн задаются обычными для динамической теории упругости соотношениями.

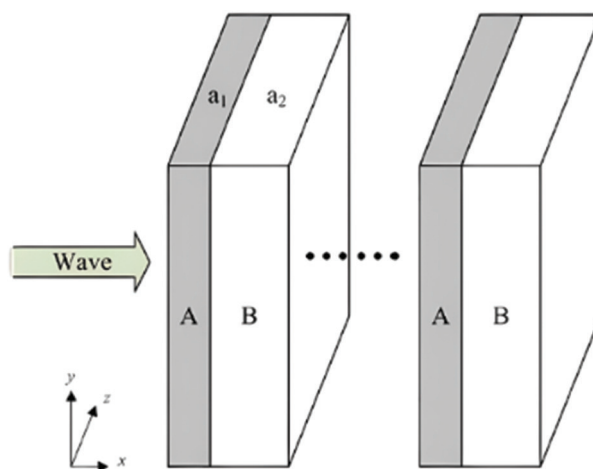


Рис. 6. Схематическое изображение одномерного сейсмического метаматериала [36]

Fig. 6. Schematic representation of a one-dimensional seismic metamaterial [36]

Решение уравнения (4) будем искать в следующем виде:

$$u_i(x, t) = A_i e^{j(k_i x - \omega t)} + B_i e^{j(-k_i x - \omega t)}, \quad (5)$$

где ω – угловая частота,
 j – мнимая единица,

$k_i = \frac{\omega}{C_i}$ – волновое число.

Опустив некоторые промежуточные вычисления, запишем систему гомогенных линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ -A_2 \\ -B_2 \end{bmatrix} = 0, \quad (6)$$

где

$$M_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \rho_1 C_1 & -\rho_1 C_1 \end{bmatrix}, \quad M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \rho_2 C_2 & -\rho_2 C_2 \end{bmatrix},$$

$$M_{21} = \begin{bmatrix} e^{-j(k_1 - k)a_1} & e^{j(k_1 + k)a_1} \\ \rho_1 C_1 e^{-j(k_1 - k)a_1} & -\rho_1 C_1 e^{j(k_1 + k)a_1} \end{bmatrix},$$

$$M_{22} = \begin{bmatrix} e^{j(k_2 - k)a_2} & e^{j(k_2 + k)a_2} \\ \rho_2 C_2 e^{j(k_2 - k)a_2} & -\rho_2 C_2 e^{j(k_2 + k)a_2} \end{bmatrix}.$$

Получим следующее выражение дисперсного отношения для одномерного метаматериала:

$$\begin{aligned} \cos(ka) = \cos \frac{\omega a_1}{C_1} \cos \frac{\omega a_2}{C_2} - \\ - \frac{1}{2} \sin \frac{\omega a_1}{C_1} \sin \frac{\omega a_2}{C_2} \left(\frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Частотный диапазон, соответствующий реальным значениям волновых чисел (при условии, что правая часть уравнения находится в интервале $[-1.1]$), определяется как полоса про-

пускания. И наоборот, если волновые числа являются мнимыми, тогда соответствующая частота ω оказывается в подавляемой полосе частот. Таким образом, с помощью известных значений скоростей продольных и поперечных волн можно определить комбинации полос пропускания и подавления метаматериала для P -волн и S -волн.

Исследователи пришли к следующим выводам.

1. Комбинация двух разных материалов (легкого и мягкого с тяжелым и жестким) позволяет получить широкие полосы подавления в низкочастотном диапазоне. Для достижения большего эффекта следует увеличивать соотношение прохождения волн в этих двух материалах.
2. Уменьшение плотности мягкого материала приводит к значительному увеличению ширины подавляемой частотной полосы.
3. Численное моделирование показывает хорошую способность метаматериалов к ослаблению сигнала как в установившихся процессах, так и в переходных. Кроме того, увеличение числа элементарных ячеек, а также комбинирование их различных размеров приводит к расширению зоны рабочих частот всего барьера.
4. Для подавления сейсмических волн в низкочастотном диапазоне требуется малая жесткость применяемых метаматериалов, что может накладывать довольно жесткие ограничения по размещению их в фундаментной части строений.
5. Перед барьером из метаматериалов наблюдается усиление уровня вибрации вследствие отражения волн, что может навредить окружающим зданиям и сооружениям.

Еще один оригинальный способ подавления сейсмических волн с помощью V-образной конструкции из скважин, устроенных в грунте вокруг защищаемого объекта (рис. 7), предложили авторы в [35].

Идея гашения энергии сейсмических волн состоит в уменьшении амплитуды перемещения частиц грунта до достижения волнами критической инфраструктуры с помощью V-образной

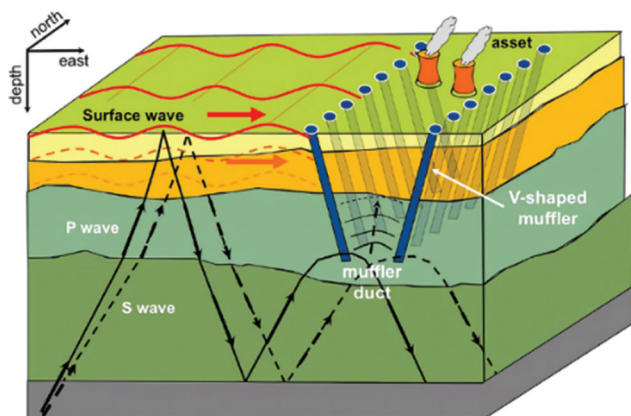


Рис. 7. Концепция массива скважин с маскирующим устройством [35]

Fig. 7. Concept of a well array with a masking device [35]

конструкции из заглубленных под определенными углами скважин расчетной длины.

В соответствии с [35], общие потери определяются как сумма потерь на входе защитной конструкции и потерь при прохождении волнового фронта через конический глушитель и описываются следующими уравнениями:

$$TL = TL_{\text{КОН}} + TL_{\text{ВХ}}, \quad (8)$$

$$TL_{\text{КОН}} = 20 \log \left(0.5 \frac{b}{t} \cdot \left[T_{11} + T_{12} \frac{4v}{\pi t^2} + T_{21} \frac{4v}{\pi b^2} + T_{22} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \right] \right), \quad (9)$$

где b – размер входа глушителя,
 T_{ij} – элементы матрицы преобразования,
 t – размер выхода глушителя.

Результат моделирования работы V-образного глушителя показан на рис. 8. Численный эксперимент проводился для четырех случаев (рис. 8а), отличающихся между собой входными размерами глушителя (0.1, 0.25, 0.35 и 0.5 км соответственно) при постоянных значениях глубины заложения скважин 0.25 км и размера выхода 0.5 км. На рис. 8 показана динамика потерь при прохождении поперечных и продольных волн для различных случаев расположения скважин в зависимости от частоты сейсмических волн.

$$TL_{\text{ВХ}} = -10 \log \left(1 - \left(\frac{0.25(k_0 b)^2 + 0.6i(k_0 b) - 1}{0.25(k_0 b)^2 + 0.6i(k_0 b) + 1} \right)^2 \right), \quad (10)$$

где k_0 – волновое число.

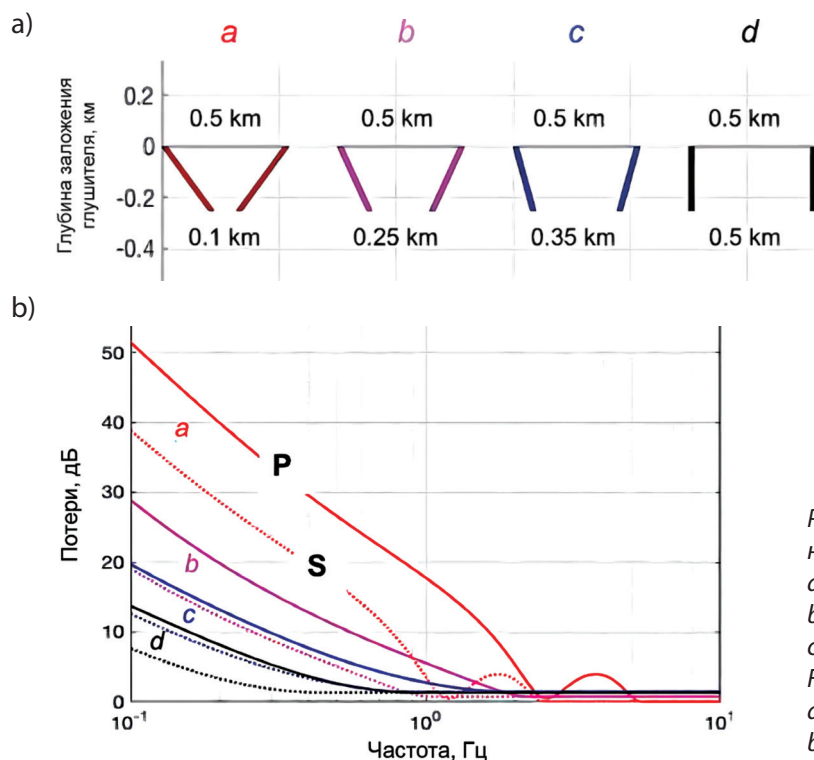


Рис. 8. Эффект глушителя, оказываемый на волновой фронт:

a) взаимное расположение скважин;

b) потери при прохождении сейсмической волны

Fig. 8. Silencer effect on the wave front:

a) relative positioning of wells;

b) seismic wave travelling losses

При анализе результатов численного моделирования были отмечены следующие тенденции:

1. Угол наклона скважин (угол вхождения) на прямую влияет на величину потерь при прохождении волнового фронта: чем угол вхождения меньше, тем потери больше, и наоборот.
2. Масштабирование внешнего (выходного) размера и глубины заложения глушителя с одним и тем же коэффициентом с неизменными размером входа и наклоном скважин практически не влияет на потери при прохождении волн сквозь глушитель.

3. Заключение

Анализ отечественных и зарубежных источников по сейсмической защите зданий и сооружений с применением метаматериалов позволил выделить следующие основные направления в исследованиях последних десятилетий.

1. *Сейсмические грунтовые метаматериалы.* В англоязычной литературе такие материалы называются Seismic Soil-Metamaterials (SSM). Их использование подразумевает создание структурированного массива грунта с устройством, например, цилиндрических пустот или жестких включений [12, 37, 38]. Главная цель – модификация сейсмического волнового фронта с помощью создания искусственной анизотропии путем внедрения в грунт геометрических элементов с регулярным или нерегулярным расположением в плане. Эффекты динамической анизотропии усиливаются локальным резонансом элементов, расположенных вдоль сетки, что в теории может привести к созданию идеальной маскировки и обвести волновой фронт вокруг защищаемой области.
2. *Заглубленные в грунт резонаторы.* В англоязычной литературе этот тип метаматериалов имеет название Buried Mass-Resonators (BMR). Данная группа сейсмических метаматериалов представляет собой заглубленные в грунт резонаторы со специально подобранным расположением и диаметром от-

верстий – аналогичным образом настраиваются на определенные частоты демпферы в высотных сооружениях. Частота демпфера или набора резонаторов настроена на определенную структурную частоту таким образом, чтобы при возбуждении этой частоты демпфер резонировал в противофазе с движением конструкции. Энергия таким образом будет рассеиваться за счет силы инерции демпфера. Некоторые исследователи [29] предлагают использовать цилиндры с различным наполнением (например, с резиной, сталью или бетоном) для ослабления как волн Рэлея, так и объемных волн в диапазоне частот 1–10 Гц. Основным недостатком данного типа локально-резонансной структуры является сложность реализации широких эффективных полос пропускания, т. к. всегда приходится выбирать между относительной шириной полосы пропускания и эффективностью подавления сигнала. Частично этот вопрос можно решить за счет увеличения числа резонаторов и расчета целых массивов таких элементов. Однако такие масштабные структуры из резонаторов сложно реализовать на практике.

3. *Резонаторы, расположенные над поверхностью грунта.* В литературе на английском языке за данной группой сейсмических метаматериалов закрепилось название Above-Surface Resonators (ASR). Преимущественно к ней относят леса, которые достаточно эффективно гасят вибрации, распространяющиеся в поверхностных слоях грунтовых массивов. Подробно исследования по этой теме представлены в [11, 39].
4. *Ауксетики (материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона).* Использование данного метаматериала, выделяемого авторами [13] в отдельный класс, основано на экстремальных свойствах структурированных сред, таких как ауксетические метаматериалы, имеющие отрицательный коэффициент Пуассона. В случае верного расчета они обеспечивают достаточно широкую запретную зону на частотах, совместимых с сейсмиче-

скими волнами. Как известно, коэффициент Пуассона – это отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению. Ауксетические материалы при растяжении расширяются (в отличие от обычных материалов, которые при растяжении истончаются). Такой элемент предназначен для создания настраиваемых эластичных ограничителей сейсмических волн.

Сейсмические волны включают в себя несколько разных компонент, среди которых продольные и поперечные волны, а также волны Рэлея и Лява. Волны Рэлея распространяются вблизи поверхности вдали от источника подземных толчков, и именно они в основном приводят к разрушению строительных конструкций вследствие своей низкой частоты, высокой амплитуды и продолжительности воздействия. Волны Лява характеризуются тем, что образуются в горизонтальном слоистом полупространстве, а частицы грунта при этом смещаются в горизонтальном направлении перпендикулярно направлению движения волны. В литературе редко встречаются описания землетрясений с большими разрушениями по причине волн Лява. Вследствие

этого внимание ученых сосредоточено преимущественно на разработке систем защиты от волн Рэлея в виде барьеров на пути распространения волнового фронта. Традиционные методы защиты – сейсмоизоляторы – эффективны практически всегда, за исключением случаев, при которых землетрясение генерирует колебания с энергией, сосредоточенной в небольших по времени, но больших по величине пиках.

Отметим, что для упрощения расчета большая часть существующих исследований по изучению сейсмических метаматериалов основана на использовании плоских моделей (грунт принимается в качестве однородной изотропной среды). Между тем, в реальности слоистая структура площадки может оказать существенное влияние на эффективность взаимодействия метаматериалов с волновым фронтом. В связи с этим в дальнейших исследованиях интересным представляется рассмотреть трехмерную задачу с учетом стратификации грунтов.

В заключение следует отметить, что проектирование защиты с использованием метаматериалов должно осуществляться одновременно с инженерным анализом самого защищаемого объекта.

Благодарности. Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2023-0004 «Система территориальной сейсмической защиты критически важных объектов инфраструктуры на основе гранулированных метаматериалов, обладающих свойствами широкодиапазонных фононных кристаллов».

Acknowledgements. The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2023-0004 "System of territorial seismic protection of critical infrastructure based on granular metamaterials with the properties of broadband phononic crystals".

Библиографический список

1. Pendry, J. B. Controlling electromagnetic fields / J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith. – DOI 10.1126/science.1125907. – Текст : непосредственный // Science. – 2006. – No. 312 (5781). – P. 1780–1782.
2. Дубинов, А. Е. Маскировка материальных тел методом волнового обтекания / А. Е. Дубинов, Л. А. Мытарева. – DOI 10.3367/ufnr.0180.201005b.0475. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, № 5. – С. 475–501.
3. Розанов, Н. Н. Невидимость: за и против / Н. Н. Розанов. – Текст : непосредственный // Природа. – 2008. – № 6. – С. 3–10.
4. Schurig, D. Calculation of material properties and ray tracing in transformation media / D. Schurig, J. B. Pendry, D. R. Smith. – DOI 10.1364/oe.14.009794. – Текст : непосредственный // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, Issue 21. – P. 9794–9804.

5. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies / D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice [et al.]. – DOI 10.1126/science.1133628. – Текст : непосредственный // Science. – 2006. – Vol. 314, Issue 5801. – P. 977–980.
6. Material parameter equation for elliptical cylindrical cloaks / H. Ma, S. Qu, Z. Xu [et al.]. – DOI 10.1103/PhysRevA.77.013825. – Текст : непосредственный // Physical Review A – Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2008. – No. 77 (1). – P. 1–4.
7. Electromagnetic Concentrators with Reduced Material Parameters Based on Coordinate Transformation. / W. Wang, L. Lin, J. Ma [et al.]. – DOI 10.1364/oe.16.011431. – Текст : непосредственный // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, Issue 15. – P. 11431–11437.
8. Full-wave analysis of prolate spheroidal and hyperboloidal cloaks / Y. Luo, J. Zhang, H. Chen, B.-I. Wu. – DOI 10.1088/0022-3727/41/23/235101. – Текст : непосредственный // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Vol. 41, Issue 23. – P. 5101.
9. Interaction of an electromagnetic wave with a cone-shaped invisibility cloak and polarization rotator. / Y. Luo, J. Zhang, B.-I. Wu, H. Chen. – DOI 10.1103/PhysRevB.78.125108. – Текст : непосредственный // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics. – 2008. – No. 78:125108.
10. Kim, S. H. Artificial seismic shadow zone by acoustic metamaterials / S. H. Kim, M. P. Das. – DOI 10.1142/S0217984913501406. – Текст : электронный // Modern Physics Letters B. – 2013. – Vol. 27, No. 20:1350140.
11. Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. / A. Colombi, P. Roux, S. Guenneau [et al.]. – DOI 10.1038/srep19238. – Текст : непосредственный // Scientific Reports. – 2016. – No. 6(1):19238.
12. Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves. / S. Brûlé, E. H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau. – DOI 10.1103/PhysRevLett.112.133901. – Текст : непосредственный // Physical Review Letters. – 2013. – No. 112:133901.
13. Brûlé, S. Emergence of seismic metamaterials: Current state and future perspectives / S. Brûlé, S. Enoch, S. Guenneau. – DOI 10.1016/j.physleta.2019.126034. – Текст : электронный // Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics. – 2020. – No. 384(1):126034.
14. Walser, R. M. Metamaterials: What are they? What are they good for? – Текст : непосредственный // APS March Meeting Abstracts. – 2000. – No. 1. – P. 5001.
15. Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial / D. R. Smith, D. C. Vier, N. Kroll, S. Schultz. – DOI 10.1063/1.1314884. – Текст : непосредственный // Applied Physics Letters. – 2000. – No. 77(14). – P. 2246–2248.
16. Walser, R. M. Electromagnetic metamaterials. Complex Mediums II: beyond linear isotropic dielectrics / R. M. Walser. – DOI 10.1117/12.432921. – Текст : непосредственный // International Society for Optics and Photonics. – 2001. – No. 4467. – P. 1–15.
17. Strutt, J. W. On the Remarkable Phenomenon of Crystalline Reflexion described by Prof. Stokes. / J. W. Strutt. – DOI 10.1017/cbo9780511703980.010. – Текст : непосредственный // Scientific Papers : Cambridge Library Collection – Mathematics. – Cambridge : Cambridge University Press. – 2011. – P. 204–212.
18. Могилевский, И. Е. Математическое моделирование метода волнового обтекания в задачах маскировки / И. Е. Могилевский, В. В. Ровенко. – Текст : непосредственный // Физические основы приборостроения. – 2014. – Т. 3, № 4 (13). – С. 28–39.
19. Ohtaka, K. Energy band of photons and low-energy photon diffraction / K. Ohtaka. – DOI 10.1103/PhysRevB.19.5057. – Текст : непосредственный // Physical Review B. – 1979. – Vol. 19, Issue 10:5057.
20. Sajeev, J. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices / J. Sajeev. – DOI 10.1103/PhysRevLett.58.2486. – Текст : непосредственный // Physical Review Letters. – 1987. – Vol. 58, No. 23. – P. 2486–2489.
21. Classical vibrational modes in phononic lattices: Theory and experiment. / M. Sigalas, M. S. Kushwaha, E. N. Economou [et al.]. – DOI 10.1524/zkri.2005.220.9-10.765. – Текст : непосредственный // Zeitschrift fur Kristallographie [Crystalline Materials]. – 2005. – Vol. 220, No. 9–10. – P. 765–809.
22. Bao, J. Dynamic Responses of a Structure with Periodic Foundations. / J. Bao, Z. Shi, H. Xiang. – DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000383. – Текст : непосредственный // Journal of Engineering Mechanics. – 2012. – Vol. 138, Issue 7. – P. 761–769.
23. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation / H. J. Xiang, Z. F. Shi, S. J. Wang, Y. L. Mo. – DOI 10.1088/0964-1726/21/11/112003. – Текст : непосредственный // Smart Materials and Structures. – 2012. – No. 21(11):112003.

24. Cheng, Z. Novel composite periodic structures with attenuation zones. / Z. Cheng, Z. Shi. – DOI 10.1016/j.engstruct.2013.07.003. – Текст : непосредственный // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 56. – P. 1271–1282.
25. Cheng, Z. Locally resonant periodic structures with low-frequency band gaps. / Z. Cheng, Z. Shi, Y. L. Mo, H. Xiang. – DOI 10.1063/1.4816052. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physics. – 2013. – No. 114: 033532.
26. Huang, J. Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation / J. Huang, Z. Shi. – DOI 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000193. – Текст : непосредственный // International Journal of Geomechanics. – 2013. – Vol. 13, No. 2 – P. 132–142.
27. Seismic isolation of two dimensional periodic foundations / Y. Yan, A. Laskar, Z. Cheng [et al.]. – DOI 10.1063/1.4891837. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physics. – 2014. – No. 116(4):044908.
28. Yan, Y. Three dimensional periodic foundations for base seismic isolation / Y. Yan, Z. Cheng, F. Menq [et al.]. – DOI 10.1088/0964-1726/24/7/075006. – Текст : непосредственный // Smart Materials and Structures. – 2015. – Vol. 24, No. 7:075006.
29. Large scale mechanical metamaterials as seismic shields / M. Miniaci, A. Krushynska, F. Bosia, N. M. Pugno. – DOI 10.1088/1367-2630/18/8/083041. – Текст : непосредственный // New Journal of Physics. – 2016. – No. 18(8):083041.
30. Krödel, S. Wideband-gap seismic metastructures / S. Krödel, N. Thomé, C. Daraio. – DOI 10.1016/j.eml.2015.05.004. – Текст : непосредственный // Extreme Mechanics Letters. – 2015. – No. 4. – P. 111–117.
31. Dertimanis, V. K. Feasibility analysis on the attenuation of strong ground motions using finite periodic lattices of mass-in-mass barriers / V. K. Dertimanis, I. A. Antoniadis, E. N. Chatzi. – DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001120. – Текст : непосредственный // Journal of Engineering Mechanics. – 2016. – Vol. 142, Issue 9. – P. 1–10.
32. Robust-to-uncertainties optimal design of seismic metamaterials / P.-R. Wagner, V. K. Dertimanis, E. N. Chatzi, J. L. Beck. – DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001404. – Текст : непосредственный // Journal of Engineering Mechanics. – 2018. – Vol. 144, Issue 3. – P. 1–17.
33. Cacciola, P. Vibrating barrier: A novel device for the passive control of structures under ground motion / P. Cacciola, A. Tombari. – DOI 10.1098/rspa.2015.0075. – Текст : непосредственный // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2015. – No. 471:2179.
34. Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves / A. Palermo, S. Krödel, A. Marzani, C. Daraio. – DOI 10.1038/srep39356. – Текст : непосредственный // Scientific Reports. – 2016. – No. 6(1):39356.
35. Seismic cloaking protection from earthquakes / R. W. Haupt, V. Liberman, M. Rothschild, C. G. Doll. – DOI 10.1109/THS.2018.8574152. – Текст : непосредственный // 2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). – 2018. – P. 1–7.
36. Geng, Q. Issues in design of one-dimensional metamaterials for seismic protection / Q. Geng, S. Zhu, K. P. Chong. – DOI 10.1016/j.soildyn.2018.01.028. – Текст : непосредственный // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2018. – No. 107 (14). – P. 264–278.
37. Flat lens effect on seismic waves propagation in the subsoil / S. Brûlé, E. H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau. – DOI 10.1038/s41598-017-17661-y. – Текст : непосредственный // Scientific Reports. – 2017. – No. 7(1): 18066.
38. Seismic metamaterial: how to shake friends and influence waves? / S. Brûlé, E. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau. – DOI 10.58550/arXiv.1301.7642. – Текст : непосредственный // arXiv. – 2013. – No. 1301.7642.
39. A seismic metamaterial: The resonant metawedge / A. Colombi, D. Colquitt, P. Roux [et al.]. – DOI 10.1038/srep27717. – Текст : непосредственный // Scientific Reports. – 2016. – No. 10(6):27717.

References

1. Pendry, J. B., Schurig, D., Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. Science, 312(5781), pp. 1780–1782. (In English). DOI 10.1126/science.1125907.
2. Dubinov, A. E., & Mytareva, L. A. (2010). Invisible cloaking of material bodies using the wave flow method. Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 180(5), Pp. 475–501. DOI 10.3367/ufnr.0180.201005b.0475. (In Russian).
3. Rozanov, N. N. (2008). Nevidimost': za i protiv. Priroda, (6), pp. 3–10. (In Russian).
4. Schurig, D., Pendry, J.B., & Smith, D. R. (2006). Calculation of material properties and ray tracing in transformation media. Optics Express, 14(21), pp. 9794–9804. (In English). DOI 10.1364/oe.14.009794.

5. Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., & Smith, D. R. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314(5801), pp. 977-980. (In English). DOI 10.1126/science.1133628.
6. Ma, H., Qu, S., Xu, Z., Zhang, J., Chen, B., & Wang, J. (2008). Material parameter equation for elliptical cylindrical cloaks. *Physical Review A – Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 77(1), pp. 1-4. (In English). DOI 10.1103/PhysRevA.77.013825.
7. Wang, W., Lin, L., Ma, J., Wang, C., Cui, J., Du, C., & Luo, X. (2008). Electromagnetic Concentrators with Reduced Material Parameters Based on Coordinate Transformation. *Optics Express*, 16(15), pp. 11431-11437. (In English). DOI 10.1364/oe.16.011431.
8. Luo, Y., Zhang, J., Chen, H., & Wu, B.-I. (2008). Full-wave analysis of prolate spheroidal and hyperboloidal cloaks. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(23), 5101. (In English). DOI 10.1088/0022-3727/41/23/235101.
9. Luo Y., Zhang, J., Wu, B.-I., & Chen, H. (2008). Interaction of an electromagnetic wave with a cone-shaped invisibility cloak and polarization rotator. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, (78), 125108. (In English). DOI 10.1103/PhysRevB.78.125108.
10. Kim, S. H., & Das, M. P. (2013). Artificial seismic shadow zone by acoustic metamaterials. *Modern Physics Letters B*, 27(20), 1350140. (In English). DOI 10.1142/S0217984913501406.
11. Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P., & Craster, R. V. (2016). Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific Reports*, (6(1)), 19238. (In English). DOI 10.1038/srep19238.
12. Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., & Guenneau, S. (2013). Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves. *Physical Review Letters*, (112), 133901. (In English). DOI 10.1103/PhysRevLett.112.133901.
13. Brûlé, S., Enoch, S., & Guenneau, S. (2020). Emergence of seismic metamaterials: Current state and future perspectives. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, (384(1)), 126034. (In English). DOI 10.1016/j.physleta.2019.126034.
14. Walser, R. M. (2000). Metamaterials: What are they? What are they good for? APS March Meeting Abstracts, (1), pp. 5001. (In English).
15. Smith, D. R., Vier, D. C., Kroll, N., & Schultz, S. (2000). Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, (77(14)), pp. 2246-2248. (In English). DOI 10.1063/1.1314884.
16. Walser, R. M. (2001). Electromagnetic metamaterials. *Complex Mediums II: Beyond linear isotropic dielectrics*. International Society for Optics and Photonics, (4467), pp. 1-15. (In English).
17. Strutt, J. W. (2011). On the Remarkable Phenomenon of Crystalline Reflexion described by Prof. Stokes. *Scientific Papers. Cambridge Library Collection - Mathematics*. Cambridge, Publ. Cambridge University Press, pp. 204-212. (In English). DOI 10.1017/cbo9780511703980.010.
18. Mogilevsky, I. E., & Rovenko, V. V. (2014). Mathematical modeling of the cloaking method for problems of radio-locating masking. *Physical Bases of Instrumentation*, (3(4)), pp. 28-39. (In Russian).
19. Ohtaka, K. (1979). Energy band of photons and low-energy photon diffraction. *Physical Review B*, 19(10), pp. 5057-5067. (In English). DOI 10.1103/PhysRevB.19.5057.
20. Sajeev, J. (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters*, (58(23)), pp. 2486-2489. (In English). DOI 10.1103/PhysRevLett.58.2486.
21. Sigalas, M., Kushwaha, M. S., Economou, E. N., Kafesaki, M., Psarobas, I. E., & Steurer, W. (2005). Classical vibrational modes in phononic lattices: theory and experiment. *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*, (220(9-10)), pp. 765-809. (In English). DOI 10.1524/zkri.2005.220.9-10.765.
22. Bao, J., Shi, Z., & Xiang, H. (2012). Dynamic responses of a structure with periodic foundations. *Journal of Engineering Mechanics*, (138(7)), pp. 761-769. (In English). DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000383.
23. Xiang, H. J., Shi, Z. F., Wang, S. J., & Mo, Y. L. (2012). Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation. *Smart Materials and Structures*, (21(11)), 112003. (In English). DOI 10.1088/0964-1726/21/11/112003.
24. Cheng, Z., & Shi, Z. (2013). Novel composite periodic structures with attenuation zones. *Engineering Structures*, (56), pp. 1271-1282. (In English). DOI 10.1016/j.engstruct.2013.07.003.
25. Cheng, Z., Shi, Z., Mo, Y. L., & Xiang, H. (2013). Locally resonant periodic structures with low-frequency band gaps. *Journal of Applied Physics*, (114), 033532. (In English). DOI 10.1063/1.4816052.

26. Huang, J., & Shi, Z. (2013). Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation. *International Journal of Geomechanics*, (13(2)), pp. 132-142. (In English). DOI 10.1061/(asce)jgm.1943-5622.0000193.
27. Yan, Y., Laskar, A., Cheng, Z., Menq, F., Tang, Y., Mo, Y. L., & Shi, Z. (2014). Seismic isolation of two dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*, (116(4)). (In English). DOI 10.1063/1.4891837.
28. Yan, Y., Cheng, Z., Menq, F., Mo, Y. L., Tang, Y., & Shi, Z. (2015). Three dimensional periodic foundations for base seismic isolation. *Smart Materials and Structures*, (24(7)). (In English). DOI 10.1088/0964-1726/24/7/075006.
29. Miniaci, M., Krushynska, A., Bosia, F., & Pugno, N. M. (2016). Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New Journal of Physics*, (18(8)), 083041. (In English). DOI 10.1088/1367-2630/18/8/083041.
30. Krödel, S., Thomé, N., & Daraio, C. (2015). Wide band-gap seismic metastructures. *Extreme Mechanics Letters*, (4), pp. 111-117. (In English). DOI 10.1016/j.eml.2015.05.004.
31. Dertimanis, V. K., Antoniadis, I. A., & Chatzi, E. N. (2016). Feasibility analysis on the attenuation of strong ground motions using finite periodic lattices of mass-in-mass barriers. *Journal of Engineering Mechanics*, (142(9)), pp. 1-10. (In English). DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001120.
32. Wagner, P.-R., Dertimanis, V. K., Chatzi, E. N., & Beck, J. L. (2018). Robust-to-uncertainties optimal design of seismic metamaterials. *Journal of Engineering Mechanics*, (144(3)), pp. 1-17. (In English). DOI 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001404.
33. Cacciola, P., & Tombari, A. (2015). Vibrating barrier: A novel device for the passive control of structures under ground motion. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, (471), 2179. (In English). DOI 10.1098/rspa.2015.0075.
34. Palermo, A., Krödel, S., Marzani, A., & Daraio, C. (2016). Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves. *Scientific Reports*, (6(1)), 39356. (In English). DOI 10.1038/srep39356.
35. Haupt, R. W., Liberman, V., Rothschild, M., & Doll, C. G. (2018). Seismic cloaking protection from earthquakes. *2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pp. 1-7. (In English). DOI 10.1109/THS.2018.8574152.
36. Geng, Q., Zhu, S., & Chong, K. P. (2018). Issues in design of one-dimensional metamaterials for seismic protection. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (107(14)), pp. 264-278. (In English). DOI 10.1016/j.soildyn.2018.01.028.
37. Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., & Guenneau, S. (2017). Flat lens effect on seismic waves propagation in the subsoil. *Scientific Reports*, (7(1)), 18066. (In English). DOI 10.1038/s41598-017-17661-y.
38. Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., & Guenneau, S. (2013). Seismic metamaterial: how to shake friends and influence waves? *arXiv*, 1301.7642. (In English). DOI 10.58550/arXiv.1301.7642.
39. Colombi, A., Colquitt, D., Roux, P., Guenneau, S., & Craster, R. V. (2016). A seismic metamaterial: The resonant metawedge. *Scientific Reports*, (10(6)), 27717. (In English). DOI 10.1038/srep27717.

Сведения об авторе

Митрошин Василий Александрович, старший преподаватель кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), e-mail: mitroshinva@mgsu.ru. ORCID 0000-0003-4776-5118

Information about the author

Vasilii A. Mitroshin, Senior Lecturer at the Department of Theoretical and Structural Mechanics, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), e-mail: mitroshinva@mgsu.ru. ORCID 0000-0003-4776-5118

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В РЕЧНОЙ ВОДЕ НА ТЕХНОЛОГИЮ ОЧИСТКИ

А. Г. Жулин, Л. В. Белова, П. А. Семенов
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

INFLUENCE OF IRON CONCENTRATION IN RIVER WATER ON TREATMENT TECHNOLOGY

Alexander G. Zhulin, Larisa V. Belova, Pavel A. Semyonov
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. В воде поверхностных источников могут присутствовать различные соединения железа в растворенной коллоидной и комплексной форме. Содержание железа в воде р. Туры в зависимости от времени года изменяется в пределах 0.12–3.8 мг/дм³. Многообразие форм железа в речной воде в зависимости от внутригодовых изменений требует применения соответствующих технологий его устранения. Удаление большинства соединений железа осуществляется коагулированием и при наличии комплексных соединений – с применением окислителей. По результатам систематических анализов качественных показателей воды р. Туры лаборатории ВОС Метелевского водозабора представлены графические зависимости количественных значений железа: от уровня воды (расхода реки), мутности, цветности, окисляемости и водородного показателя pH. В связи с влиянием формы соединения железа в природной воде на эффективный выбор технологии подготовки воды хозяйственно-питьевого назначения, для различных периодов года в общем железе определены соотношения двух- и трехвалентного железа в речной воде в зависимости от величины окислительно-восстановительного (Eh) и водородного (pH) показателей. Результаты исследования по-

Abstract. Various iron compounds in dissolved colloidal and complex forms can be found in the surface source water. Iron content in the water of the Tura depends on the time of year and changes from 0.12 to 3.8 mg/dm³. The variety of iron forms in river water depending on annual changes requires the application of relevant technologies for its elimination. Most iron compounds are removed by coagulation and, if complex compounds are present, by the use of oxidizing agents. Systematic analyses of qualitative indicators of the Tura water by the laboratory of Metelevsky water treatment plant of Metelevsky water intake made it possible to graph the dependences of iron quantitative values on water level (river flow rate), turbidity, colour, oxidation susceptibility and hydrogen pH. Since the forms of iron compounds in natural water affect the effective choice of water treatment technology for household and drinking water, the ratios of iron (II) and iron (III) in total iron in river water depending on the value of redox (Eh) and hydrogen (pH) indices were determined for different periods of the year. The results of the study showed that during water treatment it is necessary to carry out aeration with the introduction of oxidizing agent. The objectives of the study were to identify the ratio of iron (II) and iron (III) in total iron in river water for different

казали, что при подготовке воды необходимо осуществлять ее аэрацию с вводом окислителя. В задачи исследования входило выявление в составе общего железа речной воды соотношения двух- и трехвалентного железа для различных периодов года по величине Eh и pH. Соотношение форм железа в природной воде имеет значение при выборе технологии подготовки воды для хозяйственно-питьевых целей. В результате исследований установлено, что при общем содержании железа в воде р. Туры 0.67 мг/дм³ количество двухвалентного железа составило 60 % и трехвалентного – 40 %.

Ключевые слова: формы железа в воде, двух- и трехвалентное железо, гуминовые комплексы, железобактерии, водородный показатель (pH), окислительно-восстановительный потенциал (Eh)

periods of a year in terms of Eh and pH values. The ratio of iron forms in natural water is important in the choice of water treatment technology for domestic and drinking purposes. The research showed that if total iron content in the Tura water was 0.67 mg/dm³ the amount of iron (II) was 60 percent and iron (III) was 40 percent.

Key words: iron forms in the water, iron (II), iron (III), humic substances, iron bacteria, pH value, redox potential (Eh)

Для цитирования: Жулин, А. Г. Влияние содержания железа в речной воде на технологию очистки / А. Г. Жулин, Л. В. Белова, П. А. Семенов. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-84-94. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 84–94.

For citation: Zhulin, A. G., Belova, L. V., & Semyonov, P. A. (2024). Influence of iron concentration in river water on treatment technology. Architecture, Construction, Transport, (2(108)), pp. 84-94. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-84-94.

1. Введение

Наличие железа в природных водах связывается с контактностью воды с донными осадками органических и неорганических соединений, при этом в результате активной жизнедеятельности бактерий образуются минеральные кислоты, которые переводят нерастворимые формы соединений в растворимые, в частности, кристаллический карбонат железа $\text{FeCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$. В зависимости от периода года в воде наличествуют и органические соединения, влияющие на соотношение двухвалентного и трехвалентного железа. В межсезонье в отсутствие поступления в поверхностные источники осадков питание осуществляется подземными водами, которые обычно имеют высококонцентрированные железосодержащие примеси. Широкий диапазон источников поступления соединений железа в

природные воды связывается с жизнедеятельностью человека (сточные воды бытовые), работой промышленных и добывающих предприятий.

При подготовке воды ВОС Метелевского водозабора г. Тюмени, забирающего воду из р. Туры, в отдельные периоды года содержание железа может достигать высоких значений (3.8 мг/дм³), что требует проведения соответствующих мероприятий для его снижения.

Вода, с концентрацией железа более 1.0–1.5 мг/дм³ имеет желтовато-бурую окраску, повышенную мутность, железистый привкус, и при наличии растворенного железа в системе водоснабжения происходит интенсивное образование хлопьевидного осадка, который способствует вторичному загрязнению воды [1, 2].

Железо в земной коре по наличию занимает четвертое место среди ведущих элементов.

Активная деятельность человека ускорила перераспределение металлов между различными компонентами окружающей среды.

Ввиду значительной распространенности в природе железо встречается в кристаллических и растворенных соединениях. Насыщение вод происходит в результате химического разложения горных пород в сочетании с выветриванием и растворением [3]. В природных водах растворенное железо может находиться в неорганических ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$, FeS и др.) и в комплексных органоминеральных соединениях [4]. В поверхностных водах железо находится в коллоидной форме и часто входит в состав органических соединений [5, 6]. Соединения железа в различных состояниях в природных водах представлены на рис. 1 [7].

Дополнительными источниками поступления различных форм железа являются:

- промышленные и горнодобывающие предприятия;
- сельское хозяйство;

- воздушный перенос;
- сточные воды.

Поверхностные воды служат основным источником водоснабжения большинства городов и других объектов. Содержание железа в таких источниках обычно находится в пределах десятых долей миллиграмма на литр, но может превышать допустимую норму (0.3 мг/дм^3). В зависимости от происхождения и времени года железо может находиться либо в виде взвешенного ила, либо в растворенном состоянии, либо в составе комплексов с солями гуминовых кислот (гуматы). Наибольшее содержание железа наблюдается в болотных водах [4–6, 8], где концентрация гумусовых веществ велика, что характерно для Тюменского региона.

Источниками наличия железа в р. Туре могут являться топографические факторы – исток реки начинается с железорудных гор Урала, по ходу протекания русло пересекает болота с высокими концентрациями гумусовых и других органических примесей. Но основные объемы

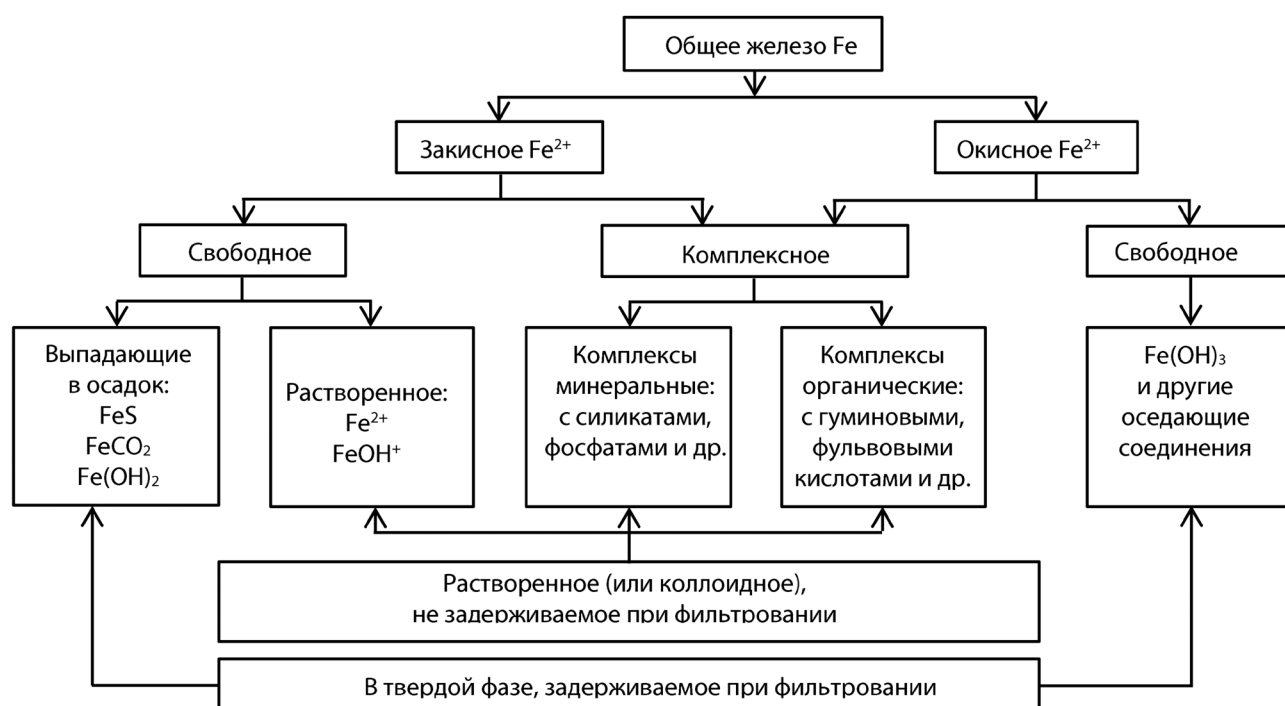


Рис. 1. Формы железа в природной воде
Fig. 1. Iron forms in natural water

загрязняющих веществ в воду р. Туры поступают со сточными водами городов и расположенных в них промышленных и автомобильных предприятий [9].

В некоторые периоды года содержание железа в воде может превышать 10 мг/дм³ [9]. Если исток реки и далее река находятся в контакте с болотными водами, то из-за наличия гидравлической связи в реке будут присутствовать органические формы, особенно в массовом количестве зимой, ввиду отсутствия контакта воды с кислородом воздуха.

Гуминовые комплексы железа относят к растворенному органическому железу. Во взвешенном состоянии железо входит в состав коллоидных частиц, образованных высокомолекулярными соединениями (танины, лигнины), и как продукт жизнедеятельности бактерий, окисляющих железо.

К наиболее часто встречающимся видам железобактерий относятся [10, 11, 12]:

- *Leptothrix ochracea* – бактерия рода *Leptothrix*, обитает в пресной воде, насыщенной железом, и в болотах с низкой концентрацией органических веществ;
- *Gallionella ferruginea* – палочкообразная нитчатая бактерия, обитает в воде с включениями железа и марганца;
- *Mariprofundus Ferrooxydans* – нейтрофильная хемолитотрофная грамотрицательная бактерия, окисляет двухвалентное железо в трехвалентное в качестве питательных веществ.

Важнейшими агентами восстановительных реакций в природных водах являются микроорганизмы, разлагающие органическое вещество. В условиях восстановительной среды трехвалентное железо переходит в двухвалентную форму [13].

Показателем возможного окисления металлов является величина окислительно-восстановительного потенциала Eh природной воды. Eh природных вод колеблется в диапазоне от –400 до +700 мВ. В этом интервале значений Eh в зависимости от pH железо находится в двух- и трехвалентном состоянии.

Форма наличия железа в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала и pH может быть рассчитана по уравнениям [8, 14]: для слабоминерализованных вод с неорганическими соединениями:

$$\frac{[Ок.]}{[Вос.]} = 10^{\frac{(Eh - E^0)^n}{0.0591 + 0.0002(t - 25^\circ C)} + m \cdot pH}, \quad (1)$$

и в случае связывания ионов металла в комплексные соединения:

$$\frac{C_{Ок.}}{C_{Вос.}} = \frac{1 + \sum_i \beta_{p(Ок.)} \cdot [L]^p}{1 + \sum_i \beta_{q(Вос.)} \cdot [L]^q} \cdot 10^{\frac{(Eh - E^0)^n}{0.0591 + 0.0002(t - 25^\circ C)} + m \cdot pH}, \quad (2)$$

где Ок. – концентрация окисленной части, мг/дм³; Вос. – концентрация восстановленной части, мг/дм³;

E^0 – стандартный потенциал рассматриваемой окислительно-восстановительной системы;

t – температура воды, °C;

Eh – значение окислительно-восстановительного потенциала речной воды, В;

pH – водородный показатель речной воды;

$\beta_{p(Ок.)}$ и $\beta_{q(Вос.)}$ – общие устойчивости комплексов $[Ок. L_p]$ и $[Вос. L_q]$;

$C_{Ок.}$ и $C_{Вос.}$ – суммарные концентрации всех форм металла в окисленном и восстановленном состоянии;

$[L]$ – равновесная концентрация лиганда (гидроксильного иона).

Соотношение Fe (III) и Fe (II) может измениться, если в воде присутствуют:

- комплексообразующие элементы;
- окислители (хлор, гипохлорит натрия, двуокись хлора, перманганат калия, озон, перекись водорода и др.);
- окисляющие бактерии;
- антропогенные загрязнения.

Возможно влияние ультрафиолета, при этом эффективность фотохимического окисления зависит от кислотности среды или присутствия ка-

тализаторов, а также от интенсивности и времени облучения [15].

Расчеты, выполненные по уравнению (2), приведены в таблице 1 и подтверждают преобладание Fe (II) при низких pH и Eh, что соответствует составу болотных и грунтовых вод, а при высоких pH и Eh присутствие Fe (III) наблюдается уже в большем количестве.

Таблица 1/Table 1
Влияние pH и Eh среды на наличие
форм железа +3 и +2, % [8]
*Effect of pH and Eh of the water on the presence of iron
forms (III and II), % [8]*

pH	Eh = +0.5 В		Eh = +0.3 В		Eh = +0.1 В	
	Fe (III)	Fe (II)	Fe (III)	Fe (II)	Fe (III)	Fe (II)
8.0	100.00	0.0	99.81	0.19	17.56	82.44
7.0	99.99	0.01	82.61	17.39	0.20	99.80
6.0	97.00	3.00	1.31	98.69	0.00	100.00

Но следует отметить, что экспериментальные методы более надежны.

Цель исследований – выявить соотношение природных форм железа в р. Туре в зависимости от сезона года для оптимизации процесса реагентной обработки и выбора технологической схемы подготовки воды хозяйственно-питьевого назначения, удовлетворяющей требованиям СанПиН¹.

2. Материалы и методы

Аналитический обзор и выявление особенностей количественного содержания железа воды р. Туры проводились с использованием

данных рабочих журналов ВОС Метелевского водозабора управления Водоканала г. Тюмени. Рассматривались результаты анализов за последние 8 лет, отнесенные к одной дате – 10-й день каждого месяца года. Зависимости содержания железа в речной воде представлены в виде сравнительных графиков изменения показателей от: уровней воды (соотношение водного баланса – расхода воды), цветности, pH, перманганатной окисляемости.

Исследования по выявлению форм железа в речной воде, а также изменения параметров Eh и pH в процессе дегазации-аэрации проводились в лаборатории кафедры инженерных систем и сооружений Тюменского индустриального университета.

Измерения показателей компонентов осуществлялись на приборах: окислительно-восстановительный потенциал Eh – ОВП-метр ORP-169e (KELILONG, Китай); водородный показатель pH – pH-метр pH-150МИ (ООО «Измерительная техника», г. Москва, Россия); железо, мутность и цветность – спектрофотометр марки ПЭ-5400ВИ (ООО «ЭКРОСХИМ», г. Санкт-Петербург, Россия). Количественное содержание железа определялось согласно ГОСТ 16698.6-93² с сульфосалициловой кислотой.

Исследования проводились в течение года в лаборатории кафедры инженерных систем и сооружений с забором проб воды из р. Туры.

3. Результаты и обсуждение

По сравнительным среднегодовым данным содержания железа в р. Туре в процессе движения от истока до впадения в р. Тобол (рис. 2) от-

¹ Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : СанПиН 1.2.3685-21 : официальное издание : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2. – Москва : Минюст России, 2021. – 990 с. – Текст : непосредственный.

² ГОСТ 16698.6-93. Марганец металлический и марганец азотированный. Методы определения железа = Metallic manganese and nitrated manganese. Methods for determination of iron : межгосударственный стандарт : принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации 17 февраля 1993 г. : дата введения 1995-07-01 / разработан Техническим комитетом ТК 8 «Ферросплавы». – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008956?ysclid=lw4k9ncikm880396637> (дата обращения: 10.03.2024).

мечаются незначительные изменения значений: в верховье его количество составило 1.3, в средней части – 0.8, в низовой – 1.09 мг/дм³ (снижение содержания в средней части связано с притоками, которые формируются при отсутствии болот и имеют минимальные количества железа) [9]. В низовье увеличение железа незначительно, но по сравнению со средней частью реки возрастает содержание марганца с 0.12 до 0.2 мг/дм³, что указывает на гидравлическую связь реки с болотами, каковые имеются на этом отрезке в большом количестве.

Анализ систематических измерений количественных показателей речной воды за последние годы дает конкретное представление о связи содержания железа с расходными характери-

стиками реки (даны через посредство уровней) и некоторыми другими основными (мутностью, цветностью, окисляемостью, pH). В связи с тем, что в последние годы расходные характеристики водного баланса р. Туры имеют неустойчивый характер, рассматривается связь содержания различных компонентов с уровнем воды. Зависимость содержания железа и мутности от уровней воды приведена на рис. 3.

По данным за рассматриваемый промежуток максимальные количества железа соответствовали 3.31 мг/дм³, и, судя по совмещенным графикам (рис. 3), максимумы совпадают с паводковыми явлениями (снеговым, дождевым), и железо в этом случае в массовом количестве содержится в илистой форме.



Рис. 2. Схема бассейна р. Туры с расчетными створами [9]
Fig. 2. Scheme of the Tura basin with the control stations [9]

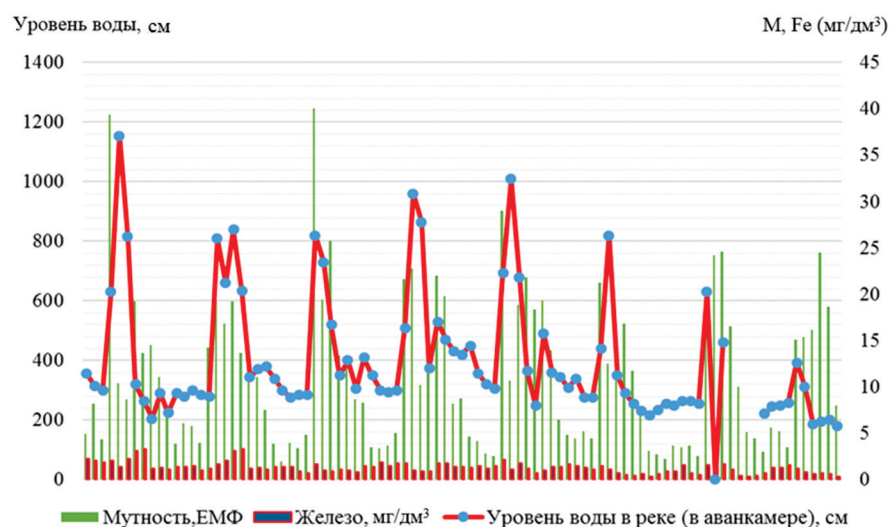


Рис. 3. Зависимость содержания железа и мутности от уровней воды
Fig. 3. Dependence of iron content and turbidity on water levels



Рис. 4. Изменение содержания железа и водородного показателя по сезонам года в течение семилетнего наблюдения
Fig. 4. Change in iron content and hydrogen index by seasons during a seven-year observation period



Рис. 5. Изменение содержания железа и цветности по сезонам года в течение семилетнего наблюдения
Fig. 5. Change in iron content and colour by seasons during a seven-year observation period

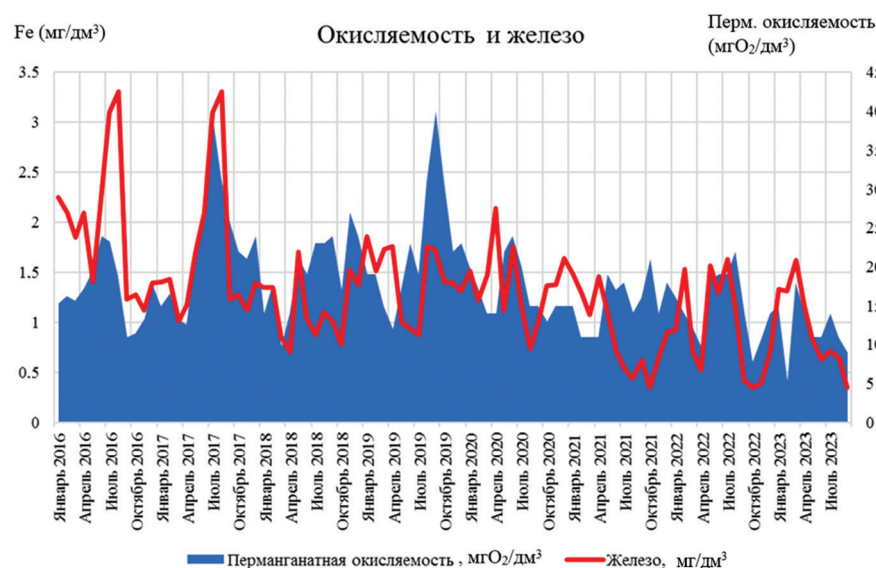


Рис. 6. Изменение содержания железа и перманганатной окисляемости по сезонам года в течение семилетнего наблюдения
Fig. 6. Changes in iron content and permanganate value by seasons during a seven-year observation period

Зависимость содержания железа от некоторых других качественных показателей (водородного показателя, цветности, перманганатной окисляемости) речной воды за рассматриваемый промежуток времени представлены на рис. 4–6.

Измерение величины Eh и pH природной воды р. Туры выявили, что Eh системы составило +0.193 В, pH – 7.34 и общее содержание железа – 0.67 мг/дм³. Данные значения показателей воды позволили отнести таковую к «промежуточной среде» (рис. 7), которая характеризуется наличием гумусовых соединений (болотного происхождения) и неорганических включений.

Расчетные данные по формуле (2) фиксируют наличие железа в речной воде в виде двухвалентного Fe (II) – 82.70 % и трехвалентного комплекса

Fe (III) – 17.30 %, сравнительные экспериментальные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2/Table 2
Экспериментальные данные наличия двухвалентного и трехвалентного железа в речной воде
Experimental data of the iron (II) and iron (III) presence in the river water

Fe (II)	Fe (III)	Fe общее
0.4 мг/дм ³	0.27 мг/дм ³	0.67 мг/дм ³
59.70 %	40.30 %	

В пробе речной воды, взятой в осенний период, измерениями подтверждено преобладание Fe (II) при данном соотношении pH/Eh. После отдувки воды воздухом величины составили pH = 8.01 и Eh = 0.097 В, продувка воды воздухом позволила увеличить pH.

Форма железа при выявленном значении Eh показывает некоторое несовпадение теоретических и экспериментальных данных (из-за многообразия реальных составляющих солевого содержания природной воды). Но следует отметить, что экспериментальные методы более надежны.

Наиболее действенным, распространенным и эффективным способом обработки природной воды является коагулирование [16, 17]. Но в ряде случаев из-за наличия заряженных коллоидных и растворенных примесей, особенно в виде железоорганических комплексов, для их извлечения, кроме адсорбционных процессов, требуется применение окислителей с целью нейтрализации коллоидов и разрушения комплексных соединений.

4. Заключение

Исследование соотношения природных форм железа в р. Туре в разные периоды года позволило прийти к следующим выводам:

1. Качественные показатели речной воды зависят от сезона года и от колебания водного баланса (уровня) в реке, так, согласно многолетним наблюдениям за количественными показателями ряда компонентов, отмечены значительные изменения содержания железа (0.3–3.8 мг/дм³), цветности (50–230 град

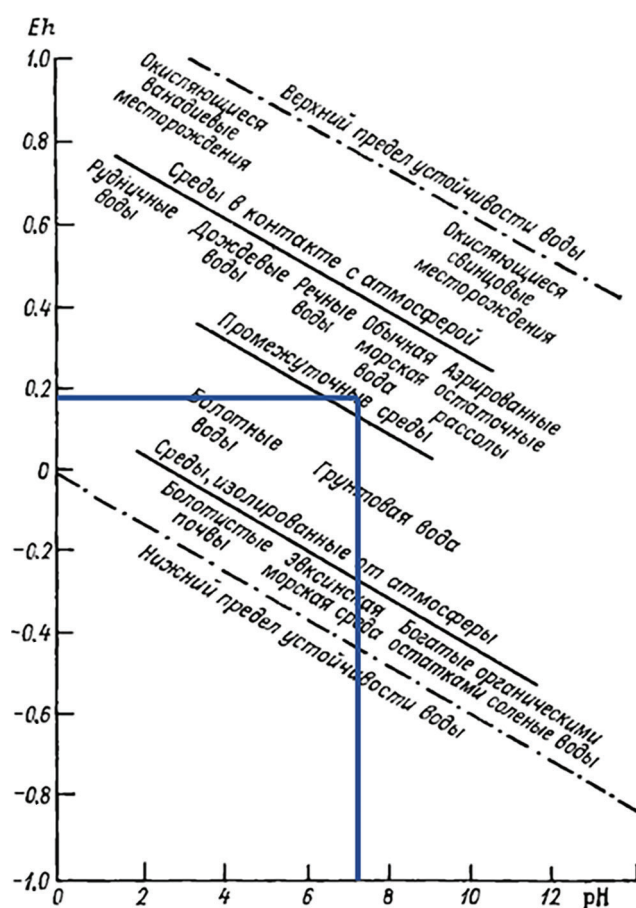


Рис. 7. Зависимость природных сред от Eh и pH по М. Р. Гаррелсу [4]
Fig. 7. Dependence of natural environment on Eh and pH according to M. R. Garrels [4]

- ПКШ), перманганатной окисляемости (7–40 мг·О₂/дм³) и др.
2. Ориентируясь на величину Eh и pH речной воды, можно установить количественные значения форм железа. При величине Eh < –0.45 (процесс окисления железа) железо находится в связанной органической форме, при повышении значения Eh – в окисленной форме в виде взвеси.
 3. Выявление формы состояния железа позволит обоснованно принимать технологию обработки воды при различных состояниях водного объекта, повысить эффективность технологии удаления сложных органических примесей, для чего требуется применение окислителей (активный хлор, гипохлорит натрия, перманганат калия и др.).

Библиографический список

1. Фрог, Б. Н. Водоподготовка : учебник для студентов высших учебных заведений / Б. Н. Фрог, А. Г. Первов. – Москва : Ассоциация строительных вузов, 2014. – 506 с. – ISBN 978-5-93093-974-3. – Текст : непосредственный.
2. О показателях качества воды / Л. Г. Дерюшев, Н. Л. Дерюшева, А. А. Ерхов, Б. Н. Фрог. – Текст : непосредственный // Яковлевские чтения : XIII Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти академика РАН С.В. Яковлева, Москва, 15–16 марта 2018 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, Московский государственный строительный университет. – Москва : Издательство МИСИ-МГСУ, 2018. – С. 30–34.
3. Перельман, А. И. Геохимические ландшафты России и радиогеоэкология (методология, теория, практика) / А. И. Перельман, Е. Н. Борисенко, А. Е. Воробьев. – Текст : непосредственный // Науки о земле на пороге XXI века: новые идеи, подходы, решения, Москва, 11–14 ноября 1997 года. – Москва : ООО «Научный мир», 1997. – С. 140.
4. Алекин, О. А. Основы гидрохимии : учебное пособие для гидрометеорологических институтов и гос. университетов / О. А. Алекин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. – 444 с. – Текст : непосредственный.
5. Влияние физико-химических факторов на содержание тяжелых металлов в водных экосистемах / О. А. Давыдова, Е. С. Климов, Е. С. Ваганова, А. С. Ваганов. – Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2014. – 167 с. – ISBN 978-5-9795-1344-0. – Текст : непосредственный.
6. Алешина, А. Р. Изменение форм металлов и их биодоступности при фотохимическом окислении органических соединений в природных водах : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Алешина Алиса Романовна ; МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2023. – 110 с. – Текст : непосредственный.
7. Чайковский, Г. П. Обезжелезивание и деманганация подземных вод : учебное пособие / Г. П. Чайковский, В. В. Кулаков, Е. В. Сошников. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 1998. – 88 с. – Текст : непосредственный.
8. Линник, П. Н. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах / П. Н. Линник, Б. И. Набиванец. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. – 268, [2] с. – Текст : непосредственный.
9. Маркин, В. Н. Эколого-водохозяйственная оценка реки Туры / В. Н. Маркин. – Текст : непосредственный // Природообустройство. – 2012. – № 2. – С. 60–65.
10. Янин, Е. П. Осадок железосодержащих подземных питьевых вод (образование, особенности, проблемы утилизации) / Е. П. Янин. – Текст : непосредственный // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2008. – № 4. – С. 26–57.
11. Metal oxidizing microbes and potential application in bioremediation of soil and water / D. Soustav, D. Dey, S. Dey [et al.]. – Текст : электронный // Metals and Metalloids in Soil-Plant-Water Systems / Edited by Tariq Aftab and Khalid Hakeem. – Academic Press, 2022. – P. 309–330. – DOI 10.1016/C2021-0-00911-1. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323916752000159?via%3Dihub> (date of the application: 12.03.2024).
12. Luna, J. M. Biosurfactant from Candida sphaerica UCP0995 exhibiting heavy metal remediation properties / J. M. Luna, R. D. Rufino, L. A. Sarubbo. – DOI 10.1016/j.psep.2016.05.010. – Текст : электронный // Process Safety and Environmental Protection. – 2016. – Vol. 102. – P. 558–566. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582016300659?via%3Dihub> (date of the application: 12.03.2024).
13. Мотузова, Г. В. Формы соединений железа в почвенных растворах и дренажных водах на примере Яхромской поймы / Г. В. Мотузова, А. К. Дегтярева. – Текст : непосредственный // Почвоведение. – 1993. – № 1. – С. 110–114.

14. Stumm, W. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters / W. Stumm, J. J. Werner. – New York : Wiley, 1996. – 1022 p. – Текст : непосредственный.
15. Плехович, С. Д. Механизм фотохимического окисления нитросоединениями субстратов различной природы (изучение методами квантовой химии) : специальность 02.00.04 «Физическая химия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Плехович Сергей Дмитриевич. – Нижний Новгород, 2014. – 133 с. – Текст : непосредственный.
16. Жулин, А. Г. Влияние качественных показателей реки Туры на выбор технологической схемы очистки воды / А. Г. Жулин, О. А. Паталай. – Текст : непосредственный // Северный морской путь, водные и сухопутные транспортные коридоры как основа развития Сибири и Арктики в XXI веке : Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции, Тюмень, 23 марта 2018 года. Том 1. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 84–89.
17. Алексеева, Л. П. Оптимизация процесса реагентной обработки цветных вод в характерные периоды года / Л. П. Алексеева, С. Е. Алексеев. – DOI 10.35776/VST.2023.03.01. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2023. – № 3. – С. 4–14.

References

1. Frog, B. N., & Pervov, A. G. (2014). Vodopodgotovka. Moscow, Publishing House ASV Publ., 506 p. (In Russian).
2. Deryushev, L. G., Deryusheva, N. L., Erkhov, A. A., & Frog, B. N. (2018). O pokazatelyakh kachestva vody. Yakovlevskie chteniya: XIII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, posvyashchennaya pamyati akademika RAN S.V. Yakovleva, Moscow, 15–16 March, 2018. Moscow, MISI-MGSU Publ., pp. 30-34. (In Russian).
3. Perel'man, A. I., Borisenko, E. N., & Vorob'ev, A. E. (1997). Geokhimicheskie landshafty Rossii i radiogeoekologiya (metodologiya, teoriya, praktika). Nauki o zemle na poroge XXI veka: novye idei, podkhody, resheniya, Moscow, 11–14 November, 1997. – Moscow, "Nauchnyy mir" Publ., 140 p. (In Russian).
4. Alekin, O. A. (1970). Osnovy gidrokhimii. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 444 p. (In Russian).
5. Davydova, O. A., Klimov, E. S., Vaganova, E. S., & Vaganov, A. S. (2014). Vliyanie fiziko-khimicheskikh faktorov na sodержanie tyazhelykh metallov v vodnykh ekosistemakh. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 167 p. (In Russian).
6. Aleshina, A. R. (2023). Izmenenie form metallov i ikh biodostupnosti pri fotokhimicheskom okislenii organo-mineral'nykh soedineniy v prirodnykh vodakh. Diss. kand. geologo-mineralogicheskikh nauk. Moscow, 110 p. (In Russian).
7. Chaykovskiy, G. P., Kulakov, V. V., & Soshnikov, E. V. (1998). Obezzhелеzivanie i demanganatsiya podzemnykh vod. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 88 p. (In Russian).
8. Linnik, P. N., & Nabivanets, B. I. (1986). Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 268[2] p. (In Russian).
9. Markin, V. N. (2012). Ekologo-vodokhozyaystvennaya otsenka reki Tury. Environmental Engineering, (2), pp. 60-65. (In Russian).
10. Yanin, E. P. (2008). Osadok zhelezosoderzhashchikh podzemnykh pit'evykh vod (obrazovanie, osobennosti, problemy utilizatsii). Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchey sredy, (4), pp. 26-57. (In Russian).
11. Soustav, D., Dey, D., Dey, S., Mallick, A., & Barman, M. (2022). Metal oxidizing microbes and potential application in bioremediation of soil and water. From: Tariq Aftab and Khalid Hakeem (eds.). Metals and Metalloids in Soil-Plant-Water Systems. Publ. Academic Press, pp. 309-330. DOI 10.1016/C2021-0-00911-1. (In English). Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323916752000159?via%3Dihub> (accessed 12.04.2024).
12. Luna, J. M., Rufino, R. D., & Sarubbo, L. A. (2016). Biosurfactant from Candida sphaerica UCP0995 exhibiting heavy metal remediation properties. Process Safety and Environmental Protection, 102, pp. 558-566. DOI 10.1016/j.psep.2016.05.010. (In English). Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582016300659?via%3Dihub> (accessed 12.03.2024).
13. Motuzova, G. V., & Degtyaryova, A. K. (1993). Formy soedineniy zheleza v pochvennykh rastvorakh i drenaznykh vodakh na primere Yakhromskoy poymy. Pochvovedenie, (1), pp. 110-114. (In Russian).
14. Stumm, W., & Werner, J. J. (1996). Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters. New York, Publ. Wiley, 1022 p. (In English).
15. Plekhovich, S. D. (2014). Mekhanizm fotokhimicheskogo okisleniya nitrosoedineniyami substratov razlichnoy prirody (izuchenie metodami kvantovoy khimii). Diss. kand. khimicheskikh nauk. Nizhny Novgorod, 133 p. (In Russian).

16. Zhulin, A. G., & Patalay, O. A. (2018). Vliyanie kachestvennykh pokazateley reki Tury na vybor tekhnologicheskoy skhemy ochistki vody. Severnyy morskoy put', vodnye i sukhoputnye transportnye koridory kak osnova razvitiya Sibiri i Arktiki v XXI veke : Sbornik dokladov XX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tyumen, 23 March, 2018. Vol. 1. Tyumen, Industrial University of Tyumen, pp. 84-89.
17. Alekseeva, L., & Alekseev, S. (2023). Optimization of the process of colored water chemical treatment in characteristic periods of the year. Water Supply and Sanitary Technique, (3), pp. 4-14. (In Russian). DOI 10.35776/VST.2023.03.01.

Сведения об авторах

Жулин Александр Гаврилович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: semen1941@yandex.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: belovalv@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7279-3618

Семенов Павел Александрович, обучающийся кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, e-mail: semechko2009@gmail.com

Information about the authors

Alexander G. Zhulin, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: semen1941@yandex.ru

Larisa V. Belova, Cand. Sc. 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: belovalv@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7279-3618

Pavel A. Semyonov, Student at the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: semechko2009@gmail.com



ПУТЬ ТВОРЧЕСТВА!

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

- Архитектурно-дизайнерские классы
- Творческие студии для детей и взрослых
- Подготовительные курсы для абитуриентов

АРХИТЕКТУРНОЕ БЮРО

- Архитектурные концепции благоустройства территорий
- Дизайн-проекты жилых и коммерческих помещений

ТВОРЧЕСКАЯ МАСТЕРСКАЯ-АТЕЛЬЕ «АРХИМОДА»

- Реставрация мебели
- Пошив и ремонт изделий любой сложности:
индивидуальная одежда, текстиль, спортивный инвентарь



 +7 (3452) 28-37-03

 г. Тюмень, ул. Нагорная, 6



УДК 621.735.016.2

2.5.5 Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки (технические науки)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО ПРИВОДА ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА

И. Н. Дроздов¹, А. Ю. Попов²¹ Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия² Омский государственный технический университет, Омск, Россия

EFFECTIVENESS OF USING A SLIDER-CRANK MECHANISM FOR WAFFLE BACKGROUND MILLING

Igor N. Drozdov¹, Andrey Yu. Popov²¹ JSC "Federal Research and Production Center "Progress", Omsk, Russia² Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В работе представлена конструкция экспериментального привода подачи режущего инструмента на основе кривошипно-ползунного механизма. Особенностью технологии фрезерования регулярного рисунка вафельного фона является необходимость многократного повторения ячеек, как правило, прямоугольной формы. Это требует разработки механизма подачи инструмента, обеспечивающего высокую скорость обработки и существенное снижение сил резания для предотвращения деформации формы ячейки. Представленная в работе конструкция привода обеспечивает скорость подачи до 43 м/мин при скорости резания до 942 м/мин, что исключает выход механизма за пределы габарита ячейки, а также обеспечивает значительное снижение сил резания до 10 Н и снимает проблему применения смазочно-охлаждающих жидкостей – обработка ведется всухую. Это особенность скоростного режима фрезерования, когда скорость подачи и скорость резания существенно выше традиционных, а глубина резания не превышает 1 мм. Производительность такого вида фрезерования существенно выше традиционных режимов и, кроме того, практически не вызывает нагрева детали, так как почти

Abstract. The paper presents the design of an experimental cutting tool feed drive based on a slider-crank mechanism. A feature of the technology of milling a regular waffle background pattern is the need for regular repetition of cells, usually rectangular shape. This requires the development of a tool feed mechanism that provides a high processing speed and a significant reduction in cutting forces to prevent deformation of the cell shape. The drive design presented in the work provides feed rate up to 43 m/min with cutting speed up to 942 m/min. This eliminates the exit of the mechanism out of the cell dimensions, as well as provides a significant reduction of cutting forces up to 10 N and removes the problem of using coolant (dry machining). This is a feature of the high-speed milling mode, when the feed rate and cutting speed are significantly higher than traditional ones, and the cutting depth does not exceed 1 mm. The productivity of this milling process is much higher than traditional milling modes and, in addition, it causes less heating of the part, as almost all the heat escapes with the chips. The practical significance of the development is the increase of productivity of the equipment for waffle background milling in fuel tanks from aluminium alloys due to the application

все тепло уходит со стружкой. Практическая значимость разработки заключается в повышении производительности оборудования для фрезерования вафельного фона в топливных баках из алюминиевых сплавов за счет применения высокоскоростного привода на основе кривошипно-ползунного механизма, который предлагается монтировать вместо штатного шпинделя на крупногабаритных станках фрезерного портального типа. Это позволяет переходить на режимы высокоскоростного фрезерования при силе резания в несколько ньютонов, что позволяет уменьшить вес силовых и движущихся частей привода икратно повысить скорость подачи.

Ключевые слова: привод подачи, кривошипно-ползунный механизм, фреза, технология, станок, сила резания

of the high-speed drive based on the slider-crank mechanism. The authors offered to mount it instead of the standard spindle on large-sized milling gantry-type machines. This makes it possible to use the high-speed milling modes at cutting forces of several newtons for reducing the weight of the power and moving parts of the drive and increasing the feed rate.

Key words: feed drive, crank-slide mechanism, milling cutter, technology, machine tool, cutting force

Для цитирования: Дроздов, И. Н. Эффективность применения кривошипно-ползунного привода для фрезерования вафельного фона / И. Н. Дроздов, А. Ю. Попов. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-96-104. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 96–104.

For citation: Drozdov, I. N., & Popov, A. Yu. (2024). Effectiveness of using a slider-crank mechanism for waffle background milling. Architecture, Construction, Transport, (2(108)), pp. 96-104. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-96-104.

1. Введение

Обработка вафельного фона производится на листовых заготовках из алюминиевых сплавов¹ [1, 2]. Заготовки не жесткие, с допусками, большими габаритными размерами по длине и ширине, обработка производится на крупногабаритных станках с массой движущихся частей до 12 тонн. Это приводит к большим инерционным силам при перемещении узлов станка на расстояниях 50–100 мм – габариты ячейки вафельного фона

[3, 4]. Высокие скорости подачи необходимы для обеспечения требуемой производительности. Скорость перемещения шпиндельного узла в пределах 50 мм должна возрастать или снижаться от нуля и до 10–15 м/мин. Ускорения значительны, и современные станки работают в режиме перегрузки приводов, механических и электронных систем. Эта проблема не имеет решения при традиционных подходах к разработке кинематики, конструкций и технологий обработки [5, 6, 7].

¹ГОСТ 22350-91. Корпус ракеты на жидком топливе. Термины и определения = Body of liquid-fuel missile. Terms and definitions : государственный стандарт союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 15.05.91 № 688 : дата введения 01.07.92. – Москва : Изд-во стандартов, 1991. – 16 с. – Текст : непосредственный.

Известна технология обработки деталей, в том числе из закаленных сталей, специальными фрезами со скоростями от 200 и выше м/мин, глубиной до 1 мм и подачами в пределах 1 мм/зуб без применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Такие фрезы выпускаются серийно.

При обработке алюминиевых сплавов такой вид обработки также применяется, но минимальные режимы резания, которые требуются для высокоскоростной обработки алюминиевых сплавов, превышают возможности современных металлорежущих станков. Необходимы частоты вращения более 30 000 об/мин и скорости подач более 30 м/мин, что позволяет достигать производительности выше традиционных режимов. Высокоскоростная обработка интересна при обработке вафельного фона топливных баков с отсутствием охлаждения [8, 9]. Как правило, это требование, которое исключает дополнительные дорогостоящие операции по удалению остатков СОЖ из рельефа обработанной поверхности. Процесс высокоскоростной обработки алюминиевых сплавов исследован фрагментарно, и обоснованных рекомендаций по выбору режимов, определению конструкции инструмента и стратегии обработки в имеющейся литературе недостаточно [10, 11, 12].

Целью исследования является повышение производительности чернового фрезерования ячеек вафельного фона с применением привода подач на основе кривошипно-ползунного механизма и определение рациональных режимов обработки при скорости подачи до 43 м/мин и скорости резания до 942 м/мин.

Актуальность работы заключается в разработке конструкции привода и технологии фрезерования ячеек вафельного фона на листах из алюминиевого сплава с производительностью на черновых операциях выше лучших зарубежных образцов при многократно меньших затратах на оборудование.

Специфика исследований заключается в выходе на такую область режимов, которую было крайне сложно достичь на оборудовании традиционной конструкции с шарико-винтовыми парами на всех координатах. Разгон, торможе-

ние и выход на скорость подачи до 43 м/мин и скорость резания до 942 м/мин на коротких участках реализованы облегченным приводом с кривошипно-ползунным механизмом. Такое сочетание конструктивных и технологических факторов требует экспериментальных исследований в довольно узкой области режимов, но с высокой точностью.

2. Материалы и методы

Проблему целесообразно решать переходом на скоростное фрезерование, при котором скорость резания поднимается до 1000 м/мин, подача продольная свыше 40 м/мин, а глубина резания в пределах 1 мм. Производительность на таких режимах выше, чем на традиционных (под производительностью понимается объем удаляемого металла в единицу времени). Особенностью скоростного фрезерования является отсутствие СОЖ, а силы резания не превышают 30 Н даже кратковременно. Это позволяет оснащать привод малогабаритными электрошпинделями, что снижает динамические нагрузки, и применять оппозитный кривошипно-ползунный механизм для подачи инструмента по одной координате (рис. 1) [5, 6]. Две другие координаты при построчном удалении припуска работают с подачами не более 2 м/мин.

Позиционирование рабочего органа (рис. 1, 2) в вертикальной плоскости осуществляется путем перемещения шпиндельной головки станка. В горизонтальной плоскости рабочий орган перемещается с помощью штатных элементов станка – шарико-винтовой передачи. Кривошипно-ползунный механизм оснащен дополнительным электроприводом 13, передающим вращение на коленвал 6 через муфту 14. Для повышения жесткости привод горизонтального перемещения режущего инструмента установлен на платформе 5, к верхней поверхности которой прикреплены направляющие 15. Вращение вала электродвигателя 13 через коленвал 6 передается на шатуны 8, соединенные шарнирно с ползунами 7. К одному из ползунков 7 с помощью скобы 10 неподвижно крепится привод 11 режущей головки 12.

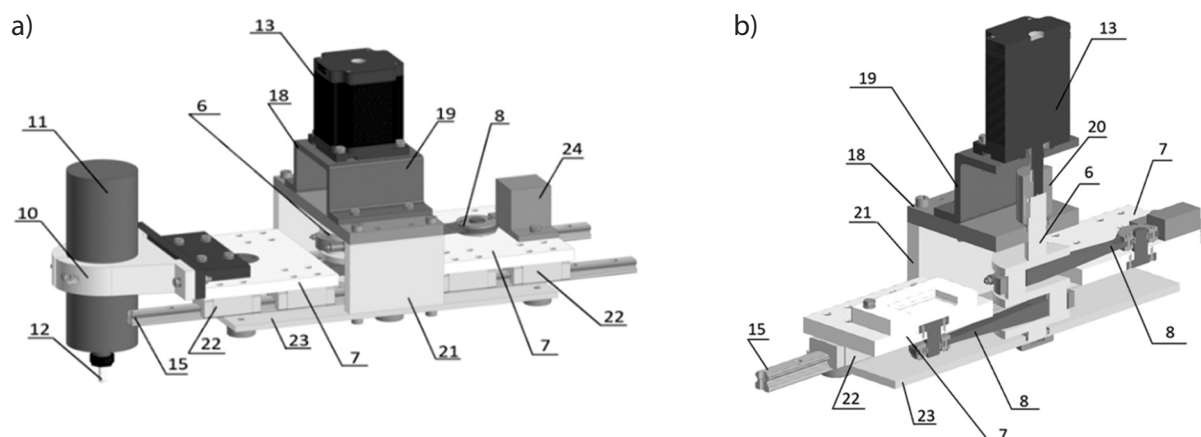


Рис. 1. Вид спереди продольного разреза кривошипно-ползунного привода подачи:
 а) вид механизма, б) разрез кривошипно-ползунного механизма привода без шпинделя и противовеса
 Fig. 1. Longitudinal cut of the slider-crank feed drive (frontal view):
 а) view of the mechanism, б) cut of the slider-crank drive mechanism without spindle and counterweight

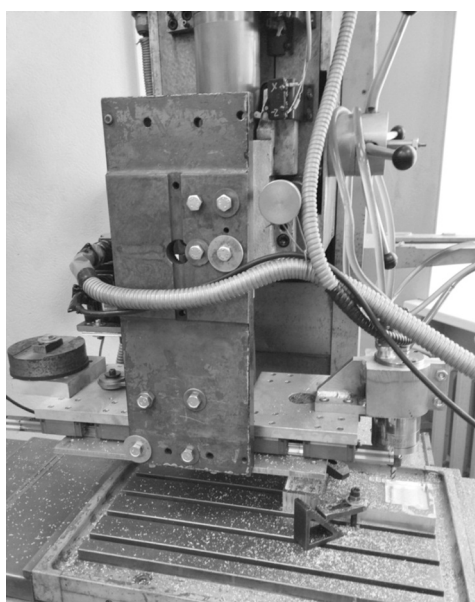


Рис. 2. Вид наладки с балансировкой механизма в вертикальной плоскости
 Fig. 2. Adjustment with balancing of the mechanism in the vertical plane

На рисунке 1b показан продольный разрез привода подачи. Привод содержит электродвигатель 13, неподвижно закрепленный на плите 18 при помощи фланца 19, который передает вращение коленвалу 6 через муфту 20. Плита 18 закреплена на стенках 21 винтовым соединением со штифтами. Вращение с электродвигателя 11 через коленвал 6 передается на шатуны 8, соеди-

ненные шарнирно с ползунами 7. При помощи восьми кареток 22 ползуны 7 линейно перемещаются по рельсовым направляющим 15, закрепленным болтами на плоскости нижней плиты 23. На одном из ползун 7 установлена пластина 10, на другом – противовес 24, уравнивающий динамические силы [7].

3. Результаты и обсуждение

Определение потребляемой на процесс обработки мощности в зависимости от режимов резания

Для решения задачи обработки вафельного фона с помощью высокоскоростного фрезерования были выполнены исследования со следующими входными данными:

- 1) 2- и 3-зубыми фрезами для обработки алюминиевых сплавов диаметром фрез традиционной конструкции 6–10 мм под изделие;
- 2) черновая и чистовая обработка производились одной и той же фрезой;
- 3) критерием для выбора конструкции фрезы и режимов обработки была принята величина мощности, затраченная на сьем припуска за один проход при черновой обработке. При чистовой обработке – шероховатость обработанной поверхности;
- 4) при изготовлении ячеек вафельного фона использовался материал Д16т.

Регистрировалась потребляемая мощность при черновой обработке электрошпинделя. Сила тока холостого хода и под нагрузкой определялись по показаниям частного регулятора.

Были проведены испытания зависимости мощности электрошпинделя от его оборотов при постоянной подаче на зуб и глубине резания. Полученные результаты отражены в таблице 1 и представлены в виде графика на рис. 3.

Частота вращения кривошипа в 6 Гц обеспечивает максимальную скорость продольной подачи – 43 м/мин.

Таблица 1/Table 1

Данные зависимости мощности электрошпинделя от его оборотов при постоянной подаче на зуб и глубине резания

Data on the dependence of the electric spindle power on its revolutions at constant feed rate per tooth and depth of cut

	Обороты электрошпинделя, об/мин		
	10 000	20 000	30 000
Поперечная подача, %	20	40	60
Частота вращения кривошипа, Гц	2	4	6
Сила тока холостого хода, А	2.9	3.16	3.2
Сила тока при резании, А	3.7	4	4
Затраченная мощность, кВт	0.34	0.36	0.34
Расчетная мощность, кВт	0.66	1.32	1.99

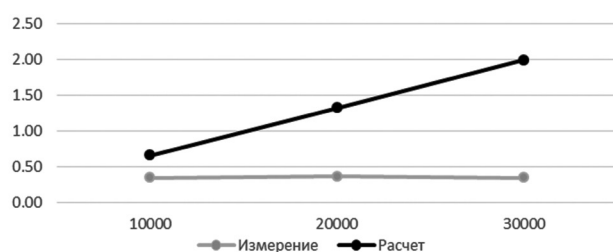


Рис. 3. График зависимости мощности электрошпинделя от его оборотов при постоянной подаче на зуб и глубине резания
Fig. 3. Diagram on the dependence of the electric spindle power on its revolutions at constant feed rate per tooth and depth of cut

Далее провели испытания зависимости мощности электрошпинделя от подачи на зуб при постоянных оборотах электрошпинделя и глубине резания. Полученные результаты отражены в таблице 2 и представлены в виде графика на рис. 4.

Для набора данных был поставлен эксперимент по определению зависимости мощности

Таблица 2/Table 2

Зависимость мощности мотора шпинделя от подачи на зуб S_z при постоянных оборотах электрошпинделя $n = 20\,000$ об/мин и глубине резания $t = 0.5$ мм
Dependence of spindle motor power on feed per tooth S_z at constant spindle speed $n = 20\,000$ rpm and cutting depth $t = 0.5$ mm

	Подача на зуб S_z , мм/мин		
	0.125	0.25	0.5
Поперечная подача, %	10	20	40
Частота вращения кривошипа, Гц	2	4	6
Сила тока холостого хода, А	3.15	3.15	3.15
Сила тока при резании, А	3.4	3.55	4
Затраченная мощность, кВт	0.11	0.17	0.36
Расчетная мощность, кВт	0.49	0.83	1.66

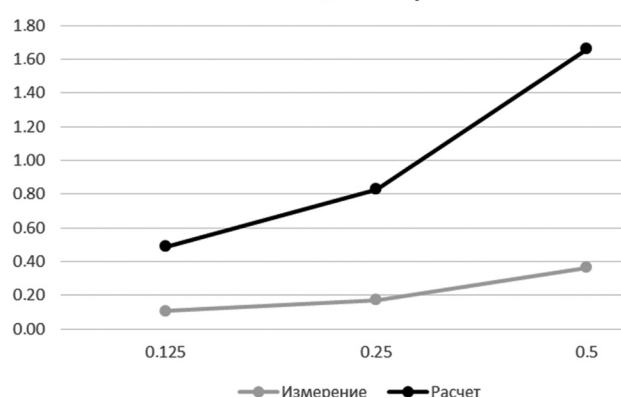


Рис. 4. График зависимости мощности электрошпинделя от подачи на зуб при постоянных оборотах шпинделя и глубине резания
Fig. 4. Diagram of dependence of electrospindle power on feed rate per tooth at constant spindle speed and depth of cut

шпинделя от глубины резания при постоянных оборотах шпинделя и подаче на зуб. Полученные результаты отражены в таблице 3 и представлены в виде графика на рис. 5.

Сравнительные испытания фрез, имеющихся на рынке, с двумя и тремя зубьями показали, что

Таблица 3/Table 3

Зависимость мощности электрошпинделя от глубины резания при постоянных оборотах электрошпинделя $n = 20\,000$ об/мин и подаче на зуб $S_z = 0.5$ мм

Dependence of electrospindle power on depth of cut at constant electrospindle speed $n = 20\,000$ rpm and feed rate per tooth $S_z = 0.5$ mm

	Глубина резания t , мм				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Поперечная подача, %	40	40	40	40	40
Частота вращения кривошипа, Гц	6	6	6	6	6
Сила тока холостого хода, А	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26
Сила тока при резании, А	3.5	3.8	3.9	4.08	4.85
Затраченная мощность, кВт	0.10	0.23	0.27	0.35	1.9
Расчетная мощность, кВт	0.66	1.32	1.97	2.63	3.3

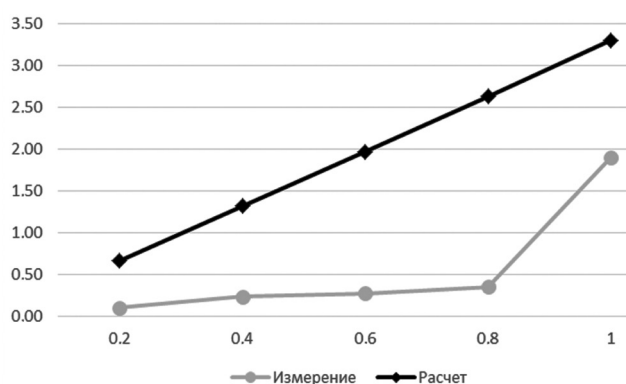


Рис. 5. График зависимости мощности электрошпинделя от глубины резания при постоянных оборотах электрошпинделя и подаче на зуб

Fig. 5. Diagram of dependence of electrospindle power on depth of cut at constant spindle speed and feed rate per tooth

2-зубая фреза обеспечивает режимы на 20–30 % ниже, чем 3-зубая, а значит, интенсивность съема припуска при одних и тех же величинах S_z и t ниже, что объясняется ее меньшей жесткостью при одинаковом вылете. Особенностью работы фрез на скоростных режимах по алюминиевым сплавам объясняется совершенно иной геометрией их режущей части по сравнению с фрезами для скоростной обработки закаленных сталей, а именно радиус округления лезвия не более 0.01 мм, передний угол – 20–30 градусов, угол подъема спирали – 30 градусов [13, 14]. Угол подъема спирали в 30 градусов был выбран для повышения осевой жесткости инструмента.

Методика определения рациональных режимов под другой материал детали и другую геометрию инструмента заключается в подборе режимов V , S_z , t по потребляемой мощности за один проход. Анализ графиков показывает:

1. При постоянной подаче на зуб $S_z = 0.5$ мм и глубине резания $t = 0.4$ мм скорость резания в пределах от 314 м/мин до 942 м/мин не оказала видимого влияния на потребляемую мощность. Расчетная мощность на калькуляторе Walter machining calculator должна была монотонно возрастать (рис. 3).
2. При постоянной скорости резания $V = 628$ м/мин и глубине резания $t = 0.5$ мм при изменении подачи на зуб S_z от 0.125 до 0.5 мм (рис. 4) потребляемая на процесс резания мощность увеличилась с 0.11 до 0.36 кВт при мощности, затрачиваемой на холостой ход в 1.4 кВт.
3. При постоянных скорости резания $V = 628$ м/мин и подаче на зуб $S_z = 0.5$ мм наблюдалось резкое увеличение потребляемой на процесс резания мощности при превышении глубины резания t более 0.8 мм (рис. 5).

Таким образом, можно определить рациональные режимы резания с точки зрения объема снимаемого припуска при постоянной подаче на зуб $S_z = 0.5$ мм, постоянной скорости резания $V = 942$ м/мин и глубине резания $t = 0.8$ мм для изготовленного механизма и применяемого инструмента и материала детали. Подача на зуб S_z и скорость резания V ограничиваются величиной

скорости подачи шпинделя в кривошипно-шатунном механизме при предельной частоте вращения шпинделя 30 000 оборотов. Исследования динамических явлений на предельных режимах работы кривошипно-шатунного механизма привели к выводу, что минутную подачу по оси X целесообразно ограничивать 20 м/мин.

Скачок мощности при превышении глубины резания более 0.8 мм можно объяснить размером фаски на уголках зубьев фрезы – $0.8 \times 45^\circ$. При выходе припуска на цилиндрическую часть фрезы потребляемая мощность возрастает по экспоненте.

Чистовая обработка производилась на режимах в два раза ниже, чем черновая по всем параметрам, что позволило обеспечить шероховатость поверхности и точность обработки в пределах требований конструкторской документации. Чем ниже режимы обработки, тем выше шероховатость обработанной поверхности, но до определенного предела [15–18]. Занижение режимов обработки в три раза и более не привели к существенному повышению чистоты обработанной поверхности.

4. Заключение

1. Проведенная серия экспериментов на физической модели прототипа привода подачи специального фрезерного станка под-

твердила работоспособность конструкции и высокую производительность на операции черновой обработки ячеек вафельного фона.

2. Установлены закономерности потребляемой на процесс резания мощности от режимов резания: скорости продольной подачи инструмента до 43 м/мин и скорости резания до 942 м/мин при обработке алюминиевых сплавов, что позволило применить в приводе малогабаритный шпиндель весом 6 кг, частотой вращения до 40 000 об/мин и мощностью 3 кВт.

Результаты работы целесообразно использовать при разработке конструкции привода подач на базе кривошипно-ползунного механизма по одной координате для крупногабаритных фрезерных станков порталных и вертикальных, которые не позволяют обеспечить высокую скорость перемещения тяжелых многотонных узлов с высокой скоростью на ограниченное расстояние. Высокоскоростной привод по одной координате позволяет компенсировать низкие динамические свойства крупногабаритных узлов станков тяжелого класса. Штатные величины подачи крупногабаритных станков по другим необходимым координатам позволяют позиционировать привод и перемещать с достаточной скоростью (2–4 м/мин).

Библиографический список

1. Михрютин, В. В. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов / В. В. Михрютин, М. А. Шерстобитов. – Текст : непосредственный // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. – 2012. – № 2 (23). – С. 279–284.
2. Писаренко, А. А. Механообрабатывающий центр модели СВО-3500 для формирования вафельного фона на крупногабаритных конструкциях изделий ракетно-космической техники / А. А. Писаренко, А. М. Ковалев. – Текст : непосредственный // Вестник НПО Техномаш. – 2018. – № 2 (6). – С. 86–90.
3. Лизин, В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций / В. Т. Лизин, В. А. Пяткин. – Москва : Машиностроение, 1976. – 408 с. – Текст : непосредственный.
4. Батрутдинов, Р. Г. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов / Р. Г. Батрутдинов, С. К. Сысоев. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. – Т. 1, № 7. – С. 7–8.
5. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – Москва : Наука, 1975. – 640 с.
6. Дворников, Л. Т. Теория кривошипно-ползунных механизмов : монография / Л. Т. Дворников, Н. С. Большаков. – Новокузнецк : НПФ, 2008. – 138 с. – ISBN 978-5-8441-0282-0.
7. Белов, И. В. Кривошипно-ползунный механизм с двумя шатунами / И. В. Белов, Д. В. Семенов, А. А. Белов. – Текст : непосредственный // Оригинальные исследования. – 2023. – Т. 13, № 8. – С. 20–27.

8. Chen, Yu. Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance / Yu. Chen, Yu. Sun, D. Yang. – DOI 10.1007/s12206-016-1209-z. – Текст : непосредственный // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2017. – Vol. 31, No. 1. – P. 75–85.
9. Dynamic modeling and identification of a slider-crank mechanism / J.-L. Ha, R.-F. Fung, K.-Yu. Chen, Sh.-Ch Hsien. – DOI 10.1016/j.jsv.2005.03.011. – Текст : непосредственный // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 289, No. 4. – pp. 1019–1044.
10. Ibaraki, S. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes / S. Ibaraki, T. Shimizu. – DOI 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001. – Текст : непосредственный // Precision Engineering. – 2010. – Vol. 34, No. 4. – P. 675–682.
11. Зайцев, А. М. Разработка направлений повышения эффективности технологической подготовки производства деталей и узлов ракетно-космической техники : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зайцев Алексей Михайлович, 2016. – 168 с. – Текст : непосредственный.
12. Кривонос, Е. В. Обоснование схемы фрезерования вафельного фона / Е. В. Кривонос. – DOI 10.25206/2588-0373-2021-5-3-83-90. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2021. – Т. 5, № 3. – С. 83–90.
13. Шачнев, С. Ю. Разработка методов повышения эффективности технологии механической обработки деталей оболочкового типа из титановых сплавов и мартенситностареющих сталей : специальность 05.03.0105.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шачнев Сергей Юрьевич. – Москва, 2009. – 178 с. – Текст : непосредственный.
14. Зайцев, А. М. Оптимизация режимов резания при фрезеровании карманов обечайки с вафельной конструкцией / А. М. Зайцев, С. Ю. Шачнев, С. В. Грубый. – DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-14-23. – Текст : непосредственный // Космическая техника и технологии. – 2020. – № 3 (30). – С. 14–23.
15. Zheng, E. Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system / E. Zheng, X. Zhou. – DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2013.11.015. – Текст : непосредственный // Mechanism and Machine Theory. – 2014. – Vol. 74. – P. 10–30.
16. Михрютин, В. В. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов / В. В. Михрютин, М. А. Шерстобитов. – Текст : непосредственный // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. – 2012. – № 2 (23). – С. 279–284.
17. Научно-технические разработки ОКБ-23 - КБ «Салют», Выпуск 1. – Москва : Воздушный транспорт, 2006. – 720 с. – ISBN 5-88821-065-x. – Текст : непосредственный.

References

1. Mikhryutin, V. V., & Sherstobitov, M. A. (2012). Metody mekhanicheskoy obrabotki listovykh obshivok planera samoletov. Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva, (2(23)), pp. 279-284. (In Russian).
2. Pisarenko, A. A., & Kovalev, A. M. (2018). Mekhanoobrabatyvayushchii tsentr modeli SVO-3500 dlya formirovaniya vafel'nogo fona na krupnogabaritnykh konstruktivnykh izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki. Vestnik NPO Tekhnomash, (2(6)), pp. 86-90. (In Russian).
3. Lizin, V. T., & Pyatkin, V. A. (1976). Proektirovanie tonkostennykh konstruktivnykh. Moscow, Mashinostroenie Publ., 408 p. (In Russian).
4. Batrutdinov, R. G., & Sysoev, S. K. (2011). Tekhnologiya izgotovleniya vafel'nogo fona v obechaykakh letatel'nykh apparatov. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki, 1(7), pp. 7-8. (In Russian).
5. Artobolevskiy, I. I. (1975). Teoriya mekhanizmov i mashin. – Moscow, Nauka Publ., 640 p. (In Russian).
6. Dvornikov, L. T., & Bol'shakov, N. S. (2008). Teoriya krivoshipno-polzunnykh mekhanizmov : monografiya. – Novokuznetsk, NPF Publ., 138 p. (In Russian).
7. Belov, I. V., Semenov, D. V., & Belov, A. A. (2023). Crank-slide mechanism with two connecting rods. Original'nye issledovaniya, 13(8), pp. 20-27. (In Russian).
8. Chen, Yu., Sun, Yu., & Yang, D. (2017). Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance. Journal of Mechanical Science and Technology, 31(1), pp. 75-85. (In English). DOI 10.1007/s12206-016-1209-z.
9. Ha, J.-L., Fung, R.-F., Chen, K.-Yu., & Hsien, Sh.-Ch. (2006). Dynamic modeling and identification of a slider-crank mechanism. Journal of Sound and Vibration, 289(4), pp. 1019-1044. (In English). DOI 10.1016/j.jsv.2005.03.011.

10. Ibaraki, S., & Shimizu, T. (2010). A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes. *Precision Engineering*, 34(4), pp. 675-682. (In English). DOI 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001.
11. Zaitsev, A. M. (2016). *Razrabotka napravleniy povysheniya effektivnosti tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva detaley i uzlov raketno-kosmicheskoy tekhniki*: Diss. kand. tekhn. nauk. 168 p. (In Russian).
12. Krivonos, E. V. (2021). Justification scheme for milling waffle background. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-rocket and Power Engineering*, 5(3), pp. 83-90. (In Russian). DOI 10.25206/2588-0373-2021-5-3-83-90
13. Shachnev, S. Yu. (2009). *Razrabotka metodov povysheniya effektivnosti tekhnologii mekhanicheskoy obrabotki detaley obolochkovogo tipa iz titanovykh splavov i martensitnostareyushchikh staley*: Diss. kand. tekhn. nauk. 178 p. (In Russian).
14. Zaitsev, A. M., Shachnev, S. Yu., & Grubiy, S. V. (2020). Optimization of cutting modes when milling shell pockets with a wafer structure. *Space Engineering and Technology*, (3(30)), pp. 14-23. (In Russian).
15. Zheng, E., & Zhou, X. (2014). Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system. *Mechanism and Machine Theory*, 74, pp. 10-30. (In English). DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2013.11.015.
16. Mikhryutin, V. V., & Sherstobitov, M. A. (2012). *Metody mekhanicheskoy obrabotki listovykh obshivok planera samoletov*. *Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva*, (2(23)), pp. 279-284. (In Russian).
17. Bahvalov, Yu. O. (eds). (2006). *Nauchno-tekhnicheskie razrabotki OKB-23 - KB "Salyut"*. Issue 1. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 720 p. (In Russian). ISBN 5-88821-065-kh.

Сведения об авторах

Дроздов Игорь Николаевич, начальник цеха АО НПЦ «Прогресс», e-mail: ceh2@progress-omsk.ru

Попов Андрей Юрьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры металлорежущих станков и инструментов, Омский государственный технический университет, e-mail: popov_a_u@list.ru. ORCID 0000-0002-7703-9283

Information about the authors

Igor N. Drozdov, foreman in JSC "Federal Research and Production Center "Progress", e-mail: ceh2@progress-omsk.ru

Andrey Yu. Popov, D. Sc. in Engineering, Professor at the Department of Metal Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University, e-mail: popov_a_u@list.ru. ORCID 0000-0002-7703-9283

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ С ОБРАТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТВЕРДОСТИ

В. Е. Овсянников¹, Е. М. Кузнецова², Р. Ю. Некрасов¹, С. Ю. Тицкая¹

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Курганский государственный университет, Курган, Россия

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF OSCILLATORY PROCESSES AT TURNING OF MATERIALS WITH REVERSE HARDNESS DISTRIBUTION

Victor E. Ovsyannikov¹, Elena M. Kuznetsova², Roman Yu. Nekrasov¹, Snezhana Yu. Titskaya¹

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Kurgan State University, Kurgan, Russia

Аннотация. Технологическое обеспечение требуемых показателей качества поверхностного слоя деталей тел вращения из металлических материалов при чистовой и финишной механической обработке требует правильного назначения технологических режимов. При чистовой токарной обработке на формирование шероховатости поверхности существенное (а часто и решающее) воздействие оказывают колебательные процессы. Необходимо выбирать такие значения технологических режимов, которые обеспечивают приемлемый уровень вибраций (предварительно данную задачу целесообразно решать на основе моделирования). Разработка математической модели выполнялась на основании определения деформаций токарного резца под воздействием сил резания. Для определения амплитуд колебаний резца использовался интеграл Мора, определение амплитудно-частотных характеристик производилось с использованием интеграла Дюамеля. Определение сил резания осуществлялось с учетом формы и характера

Abstract. For technological guarantee of the required quality indicators of the surface layer of metallic rotation body parts at finishing machining needs the correct assignment of technological modes. During finishing turning, vibrational processes have a significant (and often decisive) effect on the formation of surface roughness. It is necessary to choose such values of technological modes, which provide an acceptable level of vibration (previously it is advisable to solve this problem by modelling). Mathematical model was carried out based on the determination of the turning tool deformations under the influence of cutting forces. To determine the amplitudes of the cutter oscillations, the Mohr integral was used, and the amplitude-frequency characteristics were determined using the Duhamel integral. Cutting forces were determined taking into account the shape and nature of chip formation, the value of technological modes and processing conditions. As the material to be machined, the authors considered the cast iron with a layer hardened by

стружкообразования, величины технологических режимов и условий обработки. В качестве обрабатываемого материала рассматривался чугун с упрочненным посредством диффузионного легирования слоем. Определение исходных данных для построения модели проводилось непосредственно при обработке на токарном станке и с помощью дальнейших измерений параметров стружки. В качестве режущих инструментов использовались стандартные резцы с механическим креплением пластин. Оценка результатов моделирования показала высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований: погрешность по амплитуде 8.5 %, по частоте колебаний – 12.3 %; в целом погрешность не превысила 15 %. Таким образом, разработанная модель может быть использована для предварительной оценки вибраций на стадии проектирования технологических операций токарной обработки.

Ключевые слова: обработка, точение, качество поверхности, вибрации, моделирование

diffusion alloying. Determination of input data for model was carried out directly during machining on the lathe and with the help of measurements of chip parameters. As cutting tools, we used standard cutters with mechanically fastened plates. The evaluation of the modelling results showed high convergence with the experimental results: the error in amplitude was 8.5 percent, in oscillation frequency - 12.3 percent; in general, the error did not exceed 15 percent. Thus, the developed model can be used for preliminary vibration assessment at the design stage of turning operations.

Key words: machining, turning, surface quality, vibration, modelling

Для цитирования: Разработка математической модели колебательных процессов при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости / В. Е. Овсянников, Е. М. Кузнецова, Р. Ю. Некрасов, С. Ю. Тицкая. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-105-113. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 105–113.

For citation: Ovsyannikov, V. E., Kuznetsova, E. M., Nekrasov, R. Yu., & Titskaya, S. Yu. (2024). Development of mathematical model of oscillatory processes at turning of materials with reverse hardness distribution. Architecture, Construction, Transport, (2(108)), pp. 105-113. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-105-113.

1. Введение

Основной целью чистовой и финишной обработки деталей в машиностроении является обеспечение требуемых показателей точности и качества поверхностного слоя деталей. Учитывая, что при механической обработке в современном машиностроительном производстве преимущественно используется метод получения требуемой точности, основанный на предварительной настройке станка, остро стоит вопрос об определении таких значений технологических режимов, которые обеспечивают заданные выходные параметры в автоматическом режиме. Одним из

указанных выше выходных параметров является шероховатость поверхности. В промышленной практике решение задачи технологического обеспечения требуемой шероховатости поверхности обычно базируется на результатах предварительных исследований. Наиболее полные исследования в данном аспекте были проведены научной школой под руководством профессора А. Г. Суслова [1]. Однако при обработке материалов со свойствами, отличающимися от стандартных, возникает проблема назначения режимов, так как использование традиционных методик не совсем уместно. В данной ситуации необходимо

иметь представление о механизме формирования микропрофиля. Изучению данного вопроса посвящены работы научных школ под руководством В. Ф. Безъязычного [2], В. Л. Заковоротного [3], а также зарубежных исследователей Y. Altintas [4], T. Özel [5], S. Kalpakjian [6] и др. При этом установлено, что формирование профиля шероховатости поверхности происходит под воздействием как детерминированных факторов, так и случайных процессов. Исследование особенностей формирования производилось в работах А. Г. Суслова [7], В. Ф. Безъязычного [8], М. М. Радкевича [9], а также G. Saindane [10], M. Sortino [11] и др. Данные исследования показывают, что шероховатость обработанных поверхностей – это сложный объект, который формируется под влиянием большого количества факторов. Часть из этих факторов носит систематический, а часть – случайный характер. Причем важные результаты были получены в работах авторов [12, 13], а также в трудах научных школ И. В. Дунина-Барковского [14] и Н. М. Бобровского [15], которые показывают, что при чистовой обработке материалов на основе лезвийной обработки решающий вклад в формирование текстуры профиля шероховатости поверхности вносят вибрации. Таким образом, исследование вибраций при токарной обработке дает возможность предварительной оценки условий, обеспечивающих гарантированное формирование требуемых параметров качества поверхностного слоя, что особенно актуально при проектировании операций обработки материалов с неизученными аспектами в части обрабатываемости.

Цель настоящего исследования: разработка математической модели, которая дает возможность прогнозировать вибрационные процессы при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать математический аппарат для реализации заявленной модели;
- определить зависимости для вычисления входных параметров модели;
- провести экспериментальную проверку результатов.

2. Материалы и методы

В данной работе моделирование колебательных процессов при обработке материалов с обратным распределением твердости производилось на основе определения амплитудно-частотных характеристик с использованием интеграла Дюамеля [16]. Расчетная схема приведена на рис. 1.

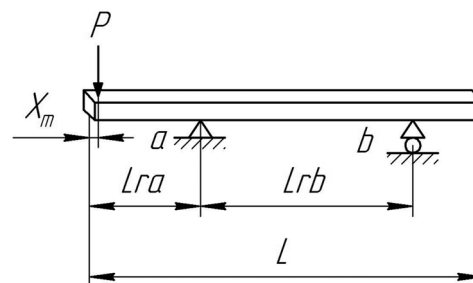


Рис. 1. Расчетная схема модели колебательных процессов при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости
Fig. 1. Calculation scheme of the model of oscillatory processes in turning of materials with inverse hardness distribution

Для того чтобы определить амплитудные значения перемещений вершины резца, необходимо вычислить изгибающие моменты по следующим формулам [17]:

$$M(F, R_A, R_B, x) = R_A(x - L_{Ra}) \cdot (x > L_{Ra}) + R_B \cdot (x - L_{Rb}) \cdot (x > L_{Rb}) - F(x - x_m) \cdot (x > x_m), \quad (1)$$

$$M1(R_A, R_B, xx, x) = R_A(x - L_{Ra}) \cdot (x > L_{Ra}) + R_B \cdot (x - L_{Rb}) \cdot (x > L_{Rb}) - 1(x - xx) \cdot (x > xx), \quad (2)$$

где F – действующая сила (в нашем случае сила резания);

L – величина, характеризующая расположение опор резца (индексы соответствуют 1 и 2 точке опоры);

x – текущее положение точки расчета;

x_m – точка приложения действующего усилия;

R – опорные реакции.

Зная значения внутренних силовых факторов (изгибающих моментов), можем определить значение деформации консольного участка рез-

ца (соответствующего вершине) на основании вычисления интеграла Отто Мора [17]:

$$\Delta(F) = \int_0^L \frac{M(F, R_A(F), R_B(F), x) \cdot M1(R1_A(x_m), R1_B(x_m), x_m, x)}{EJ} dx, \quad (3)$$

где E – модуль продольной упругости материала державки резца, МПа;

J – момент инерции державки, мм⁴;

d – размер поперечного сечения державки, мм.

Зная величину деформаций, имеем возможность определить расчетным методом жесткость державки резца k и коэффициент приведения массы $k_{пр}$ [17]:

$$k = \frac{1}{\int_0^L \frac{M1(R1_A(x_m), R1_B(x_m), x_m, x)^2}{EJ} dx}, \quad (4)$$

$$k_{пр} = \frac{\rho}{m_0 \Delta(F)^2} \cdot \int_0^L A(X) \Delta_x(X)^2 dx, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала державки резца, кг/мм³;

A – амплитуда собственных колебаний резца в расчетном сечении;

d – размер поперечного сечения державки, мм.

После вычисления параметров по формулам (4) и (5) можно определить амплитуду A и частоту собственных колебаний ω для резца при токарной обработке [17]:

$$A = \sqrt{u_0^2 + \frac{(v_0 + hu_0)^2}{\omega^2}}, \quad (6)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m + k_{пр} m_0}}, \quad (7)$$

где u_0 – начальное положение расчетного сечения, мм;

v_0 – начальная скорость, мм/с;

h – коэффициент затухания колебаний.

Учет того, что колебания являются затухающими, производится посредством коэффициента h .

В разрабатываемой модели необходимо учесть тот факт, что при обработке материалов

с обратным распределением твердости образуется элементная стружка, что в свою очередь порождает периодический характер действия возмущающей силы. Это обстоятельство можно учесть посредством использования интеграла Дюамеля для вычисления внешней нагрузки на резец [17]:

$$u(F, t) = \frac{1}{m \cdot \omega} \cdot \int_0^t F(\tau) \cdot e^{-h(t-\tau)} \cdot \sin(\omega \cdot (t - \tau)) d\tau, \quad (8)$$

где τ – временная задержка, с;

t – параметр времени, с;

e – экспоненциальная функция.

В выражении (8) переменная F соответствует силе резания. Для нашего случая удобнее всего использовать теоретические зависимости для определения усилия резания, которые были получены в работах Ю. А. Розенберга [18], так как данный подход позволяет учитывать влияние на характер стружкообразования усилия резания посредством коэффициента усадки стружки ζ . Выражение для определения силы резания с учетом коэффициента усадки стружки имеет вид [18]:

$$P_z = C_{pp} \cdot S \cdot t + C_{zp} \cdot l_{xy}, \quad (9)$$

где S – продольная подача, мм/об;

t – глубина резания, мм;

$C_{pp} = \tau \cdot (\xi + 1)$ – удельная сила на передней поверхности резца;

τ – действующее касательное напряжение, МПа;

$$l_{xy} = \frac{t - r \cdot (1 - \cos(\varphi))}{\sin(\varphi)} + \varphi \cdot r + \frac{S}{2} - \text{суммарная}$$

длина контакта стружки с поверхностью инструмента, мм;

φ – главный угол в плане инструмента;

$C_{zp} = 1.5 \cdot \tau \cdot \zeta \cdot \rho + \mu_1 \cdot \sigma_t \cdot h_z$ – удельная сила на задней поверхности резца, Н/мм;

ρ – радиус закругления режущей кромки;

μ_1 – коэффициент трения в зоне контакта стружки и резца, мм;

h_z – износ инструмента по задней поверхности, мм.

Величина коэффициента трения зависит от свойств материала заготовки и может быть определена по следующей расчетной зависимости [18]:

$$\mu_l = \sqrt{\frac{1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_b}}{8 - \frac{\sigma_T}{\sigma_b}}}, \quad (10)$$

где σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, МПа;

σ_b – предел прочности обрабатываемого материала, МПа.

Значения касательных напряжений также зависят от пластических свойств обрабатываемого материала [18]:

$$\tau = 0.7 \cdot \sigma_b \cdot (1 + \delta), \quad (11)$$

где δ – относительное удлинение.

Частота изменения силы резания может быть определена по следующей расчетной зависимости [18]:

$$\nu = T^{-1} = 2V \sin \varphi (\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg}(\varphi - \gamma)) / r, \quad (12)$$

где r – радиус закругления вершины резца;

γ – главный угол в плане;

V – скорость резания, м/мин.

Аналогичным образом определяются и другие составляющие силы резания.

Экспериментальные исследования проводились на токарном станке марки 16К20. Был использован токарный инструмент со сменными многогранными пластинами. Сечение державки резца 25 × 25 мм. Назначение режимов резания производилось на основе использования известных технологических рекомендаций [18]. В качестве обрабатываемого материала использовался прутки из серого чугуна марки СЧ20 по ГОСТ 1412-85³. На поверхности образцов из серого

чугуна был сформирован упрочненный слой посредством термодиффузионного поверхностного легирования нагревом в контакте со смесью оксидом молибдена и хрома. После насыщения поверхности легирующими элементами образцы подвергались закалке.

Также производилась регистрация и запись виброакустического сигнала с использованием датчика-акселерометра и регистрирующей аппаратуры Zetlab [19]. Записанный сигнал подвергался обработке: строилась огибающая сигнала и затем определялась амплитуда перемещений резца с целью провести верификацию значений амплитуды и частоты колебаний, которые получены опытным путем.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведен пример расчета амплитуды вершины резца при затухающих колебаниях, который был получен с использованием математической модели на основе вычисления характеристик по формулам (1)–(9). Переменная u обозначает положение расчетной точки, N – номер расчетной точки. Входные данные: толщина упрочненного слоя 3 мм, толщина ферритной каймы 0.5 мм, глубина резания 0.75 мм, скорость резания 180 м/мин, подача 0.1 мм/об.

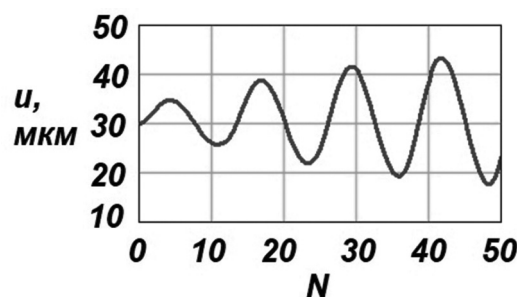


Рис. 2. Пример расчета амплитуды вершины резца при затухающих колебаниях

Fig. 2. Example of calculating the peak amplitude for damped oscillations

³ ГОСТ 1412-85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки = Flake graphite iron for castings. Grades : межгосударственный стандарт : утвержден постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 сентября 1985 г. № 3009 : дата введения 1987-01-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008656?ysclid=lxec50hoi105250333> (дата обращения: 13.03.2024).

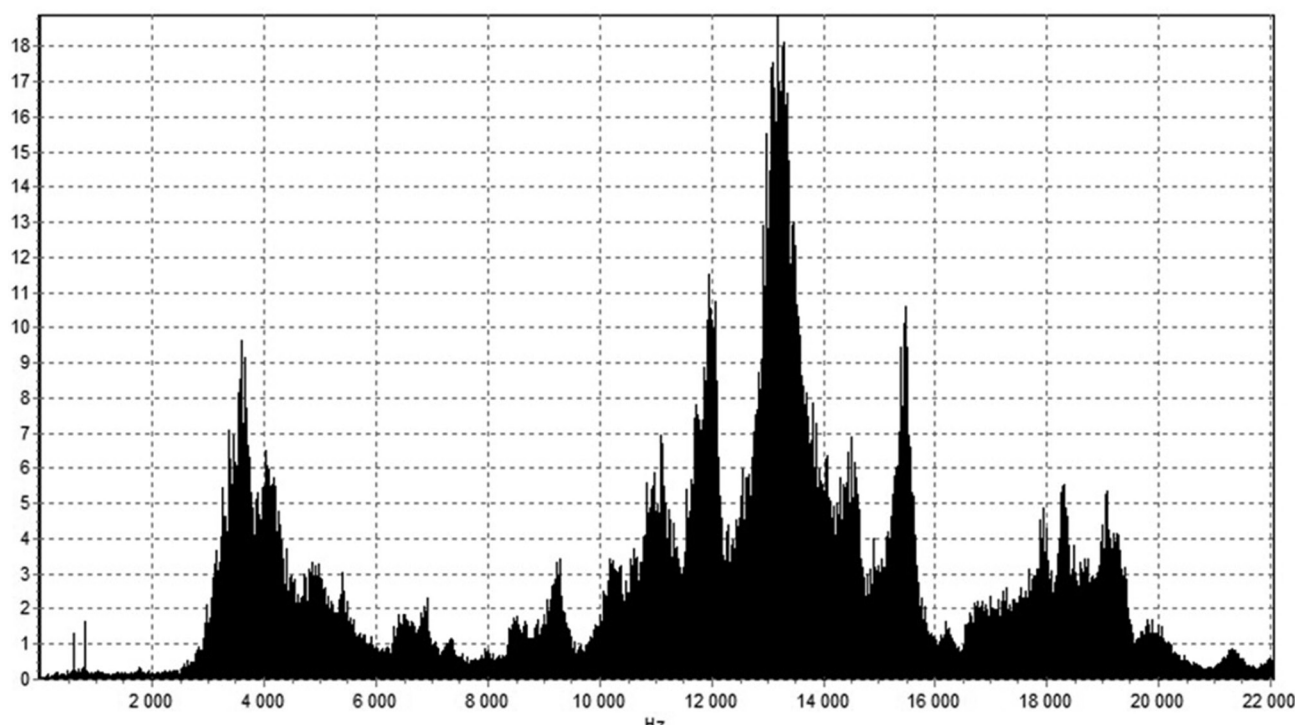


Рис. 3. Спектр вибросигнала
Fig. 3. Vibration signal spectrum

На рис. 3 приведен пример спектра записанного вибросигнала для этих же условий, а на рис. 4 – график амплитуд перемещений резца (полученный экспериментально), который был получен после обработки экспериментальных данных.

Сравнение полученных результатов теоретического моделирования и экспериментальных исследований, которые приведены на рис. 2–4, показало погрешность по амплитуде 8.5 %, по частоте колебаний 12.3 %. В целом погрешности

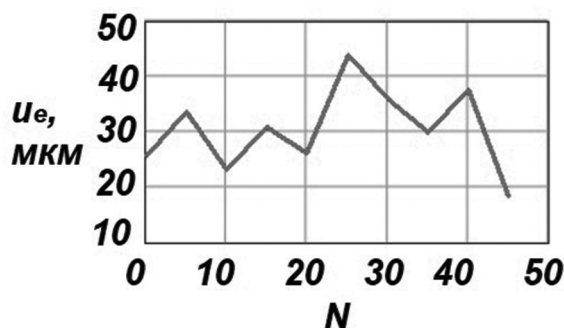


Рис. 4. График амплитуд вершины резца, полученный экспериментально

Fig. 4. Experimental graph of cutter apex amplitudes

не превышали 15 %, что удовлетворительно при решении задачи предварительной оценки колебательных процессов.

Следует отметить, что достоинством разработанной модели является то, что она учитывает все основные технологические факторы, оказывающие значимое влияние в том числе на шероховатость обработанных поверхностей:

- технологические режимы (глубину, скорость резания, подачу);
- геометрию режущего инструмента (главный угол в плане, передний угол, радиус при вершине резца, радиус закругления режущей кромки);
- характер стружкообразования (величину усадки);
- условия контакта стружки и режущего инструмента (длину контакта по передней и задней поверхности инструмента, коэффициент трения);
- износ режущего инструмента;
- физико-механические свойства обрабатываемого материала.

4. Заключение

Проведенные исследования позволили сделать ряд выводов:

1. В качестве методологического аппарата для моделирования колебательных процессов при токарной обработке материалов с обратным распределением твердости целесообразно использовать решение уравнений на основе интегралов Мора.
2. Значения усилий резания целесообразно определять с использованием теоретических зависимостей, периодический характер изменения силы резания, связанный с условиями образования стружки, возможно учесть при помощи интеграла Дюамеля.
3. Погрешность, полученная на основе сравнения полученных результатов теоретиче-

ского моделирования и экспериментальных исследований (рис. 2–4), составила 8.5 % по амплитуде и 12.3 % по частоте колебаний. В целом погрешность моделирования не превысила 15 %, что удовлетворительно при решении задачи предварительной оценки колебательных процессов.

В перспективе авторы планируют выявить закономерности между входными параметрами модели (усадка стружки и т. д.) и технологическими режимами, учитывая, что имеет место обратное распределение твердости в упроченном слое, а также провести экспериментальные исследования по выявлению зависимости фаски износа от условий обработки применительно к рассматриваемому обрабатываемому материалу.

Библиографический список

1. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – Москва : Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2000. – 320 с. – ISBN 5-217-02976-5. – Текст : непосредственный.
2. Безъязычный, В. Ф. Метод подобию в технологии машиностроения : монография / В. Ф. Безъязычный. – Москва : Инфра-инженерия, 2021. – 356 с. – ISBN 978-5-9729-0766-3.
3. Синергетический системный синтез управления динамикой металлорежущих станков с учетом эволюции связей / В. Л. Заковоротный, А. Д. Лукьянов, Д. А. Нгуен, Д. Т. Фам. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2008. – 324 с. – ISBN 5-7890-0278-1. – Текст : непосредственный.
4. Altintas, Yu. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping / Yu. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka. – DOI 10.1016/j.cirp.2008.03.048. – Текст : непосредственный // CIRP Annals. – 2008. – Vol. 57, No. 1. – P. 371–374.
5. Özel, T. Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining / T. Özel, E. Zeren. – DOI 10.1007/s00170-006-0720-2. – Текст : непосредственный // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 35, No. 3. – P. 255–267.
6. Kalpakjian, S. Manufacturing Engineering and Technology / S. Kalpakjian, S. Schmid. – Pearson Education, 2009. – 1197 p. – Текст : непосредственный.
7. Суслов, А. Г. Выбор, назначение и технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхностей деталей машин по ГОСТу 2789-73 : учебное пособие / А. Г. Суслов. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 1983. – 83 с. – Текст : непосредственный.
8. Анализ используемых методик для назначения режимных условий процесса резания / В. Ф. Безъязычный, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко, Э. В. Киселев. – Текст : непосредственный // Технология металлов. – 2017. – № 12. – С. 2–10.
9. Черных, Л. Г. Расчет систематической составляющей первичного профиля при участии вершины резца с радиусом, главной и вспомогательной режущих кромок и подачи / Л. Г. Черных, С. Н. Степанов, М. М. Радкевич. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии в машиностроении : Сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апреля 2023 года. – Новополоцк : Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2023. – С. 38–41.
10. Saindane, G. Experimental investigation of vibration damping in boring operation using passive damper / G. Saindane, A. Jakikore, A. Umbarkar. – Текст : непосредственный // International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology. – 2014. – Vol. 2, Issue 3. – ISSN: 2320-8791. – URL: <http://www.ijreat.org/Papers%202014/Issue9/IJREATV2I3022.pdf> (дата обращения: 13.03.2024).

11. Sortino, M. Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning / M. Sortino, G. Totis, F. Prosperi. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.010. – Текст : непосредственный // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 61. – P. 58–70.
12. Овсянников, В. Е. Исследование геометрических особенностей рельефа шероховатости, волнистости и профиля деталей в поперечном сечении / В. Е. Овсянников, Р. Ю. Некрасов. – Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева, посвященной 15-летию Института промышленных технологий и инжиниринга : Сборник статей конференции. В 3-х томах, Тюмень, 16–18 ноября 2023 года. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024. – С. 144–147.
13. Рогов, Е. Ю. Автоматическое обеспечение точности формы при обработке на станках с ЧПУ / Е. Ю. Рогов, А. К. Остапчук, В. Е. Овсянников. – Курган : Курганский государственный университет, Уральский государственный университет путей сообщения, 2023. – 174 с. – ISBN 978-5-4217-0652-6. – Текст : непосредственный.
14. Дунин-Барковский, И. В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – Москва : Машиностроение, 1978. – 232 с.
15. Исследование текстуры поверхности детали «коленчатый вал», обработанной шлифованием и выглаживанием / И. Н. Бобровский, П. Ф. Зибров, Н. М. Бобровский, Ф. В. Гречников. – Текст : непосредственный // СТИН. – 2020. – № 6. – С. 7–10.
16. Чернов, Ю. Т. К расчету систем виброизоляции с демпферами вязкого трения / Ю. Т. Чернов, М. Зебилина. – Текст : непосредственный // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2018. – № 2. – С. 34–38.
17. Бункин, Н. Ф. Стохастические системы в физике и технике / Н. Ф. Бункин, А. Н. Морозов. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2011. – 368 с. – ISBN 978-5-7038-3368-1. – Текст : непосредственный.
18. Розенберг, Ю. А. Резание материалов : учебник / Ю. А. Розенберг ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Курганский гос. ун-т, Тюменский гос. нефтегазовый ун-т. – Курган : Курганский гос. ун-т : Тюменский гос. нефтегазовый ун-т, 2007. – 294 с.

References

1. Suslov, A. G. (2000). Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin. Moscow, Mashinostroenie Publ., 320 p. (In Russian). ISBN 5-217-02976-5.
2. Bez"yazychnyy, V. F. (2021). Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya: monografiya. Moscow, Infra-inzheneriya Publ., 356 p. (In Russian). ISBN 978-5-9729-0766-3.
3. Zakovorotnyy, V. L., Luk'yanov, A. D., Nguen, D. A., & Fam, D. T. (2008). Sinergeticheskiy sistemnyy sintez upravleniya dinamikoy metallovezhushchikh stankov s uchetom evolyutsii svyazey. Rostov-na-Donu, Don State Technical University Publ., 324 p. (In Russian). ISBN 5-7890-0278-1.
4. Altintas, Yu., Eynian, M., & Onozuka, H. (2008). Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping. CIRP Annals, 57(1), pp. 371-374. (In English). DOI 10.1016/j.cirp.2008.03.048.
5. Özel, T., & Zeren, E. (2007). Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 35(3), pp. 255-267. (In English). DOI 10.1007/s00170-006-0720-2.
6. Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2009). Manufacturing Engineering and Technology. Publ. Pearson Education, 1197 p. (In English).
7. Suslov, A. G. (1983). Vybor, naznachenie i tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sherokhovatosti poverkhnostey detaley mashin po GOSTu 2789-73. Bryansk, Bryansk State Technical University Publ., 83 p. (In Russian).
8. Bezyazychnyy, V. F., Timofeyev, M. V., Fomenko, R. N., & Kiselyov, E. V. (2017). Analysis of used procedures for purpose of regime conditions of cutting process. Tehnologiya Metallov, (12), pp. 2-10. (In Russian).
9. Chernykh, L. G., Stepanov, S. N., & Radkevich, M. M. (2023). Raschet sistematischeskoy sostavlyayushchey pervichnogo profilya pri uchastii vershiny reztsa s radiusom, glavnoy i vspomogatel'noy rezhushchikh kromok i podachi. Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 55-letiyu Polotskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Evfrosinii Polotskoy, Novopolotsk, April, 18-19, 2023. Novopolotsk, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk Publ., pp. 38-41. (In Russian).

10. Saindane, G., Jakikore, A., & Umbarkar, A. (2014). Experimental investigation of vibration damping in boring operation using passive damper. *International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, 2(3). (In English). ISSN: 2320–8791. Available at: <http://www.ijreat.org/Papers%202014/Issue9/IJREATV2I3022.pdf> (accessed 13.03.2024).
11. Sortino, M., Totis, G., & Prosperi, F. (2012). Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 61, pp. 58-70. (In English). DOI 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.010.
12. Ovsyannikov, V. E., & Nekrasov, R. Yu. (2024). Issledovanie geometricheskikh osobennostey rel'efa sherokhovatosti, volnistosti i profilya detaley v poperechnom sechenii. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii im. D.I. Mendeleeva, posvyashchennoy 15-letiyu Instituta promyshlennykh tekhnologiy i inzhiniringa: Sbornik statey konferentsii. V 3-kh tomakh*, Tyumen, November, 16–18 2023. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., pp. 144-147. (In Russian).
13. Rogov, E. Yu., Ostapchuk, A. K., & Ovsyannikov, V. E. (2023). *Avtomaticheskoe obespechenie tochnosti formy pri obrabotke na stankakh s ChPU*. Kurgan, Kurgan State University, & Ural State University of Railway Transport Publ., 174 p. (In Russian). ISBN 978-5-4217-0652-6.
14. Dunin-Barkovskiy, I. V., & Kartashova, A. N. (1978). *Izmereniya i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 232 p. (In Russian).
15. Bobrovskiy, I. N., Zibrov, P. F., Bobrovskiy, N. M., & Grechnikov, F. V. (2020). Issledovanie tekstury poverkhnosti detali "kolenchatyy val", obrabotannoy shlifovaniem i vyglazhivaniem. *STIN*, (6), pp. 7-10. (In Russian).
16. Chernov, Yu. T., & Zebilila, M. D. H. (2018). To the calculation of vibration isolation systems with fluid viscous dampers. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*, (2), pp. 34-38. (In Russian).
17. Bunkin, N. F., & Morozov, A. N. (2011). *Stokhasticheskie sistemy v fizike i tekhnike*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 368 p. (In Russian). ISBN: 978-5-7038-3368-1.
18. Rozenberg, Yu. A. (2007). *Rezanie materialov*. Kurgan, Kurgan State University, & Tyumen State Oil and Gas University Publ., 294 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Овсянников Виктор Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: ovsjannikovve@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-8775-0781

Кузнецова Елена Михайловна, старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов, Курганский государственный университет, e-mail: imk@kgsu.ru. ORCID 0009-0002-0057-8550

Некрасов Роман Юрьевич, канд. техн. наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: syncler@mail.ru. ORCID 0000-0001-7594-6114

Тицкая Снежана Юрьевна, ассистент-стажер кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, e-mail: titskajasj@tyuiu.ru. ORCID 0009-0007-4048-0802

Information about the authors

Viktor E. Ovsyannikov, D.Sc. in Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: ovsjannikovve@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-8775-0781

Elena M. Kuznetsova, Senior Lecturer at the Department of Automation of Production Processes, Kurgan State University, e-mail: imk@kgsu.ru. ORCID 0009-0002-0057-8550

Roman Yu. Nekrasov, Cand. Sc. in Engineering, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: syncler@mail.ru. ORCID 0000-0001-7594-6114

Snezhana Yu. Titskaja, Intern-Assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: titskajasj@tyuiu.ru. ORCID 0009-0007-4048-0802

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 подрисунковой 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 6th 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!**

ВII ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ АРХИТЕКТУРНОЕ НАСЛЕДИЕ 2024

ВII ВСЕРОССИЙСКИЙ ФЕСТИВАЛЬ

**АРХИТЕКТУРНОЕ
НАСЛЕДИЕ**

2024

13 – 15 июня, г. Тюмень

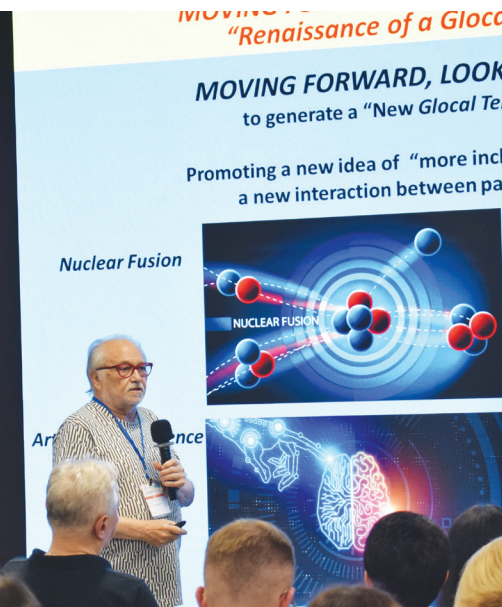


Фото: официальный телеграм-канал VII Всероссийского фестиваля «Архитектурное наследие», журнал «Архитектура, строительство, транспорт»



В июне 2024 года Тюмень принимала VII Всероссийский фестиваль с международным участием «Архитектурное наследие». Как отметил президент Союза архитекторов России Николай Шумаков, впервые фестиваль вышел за Урал (все же не зря Тюмень называют вратами Сибири – прим. ред.).

Круглые столы, лекции, мастер-классы, панельные дискуссии и пленарные сессии – более 40 мероприятий разного формата и масштаба, центральная тема которых звучала так: «Архитектурное наследие и современный город: баланс между прошлым и будущим». Тема очень сложная, деликатная, требующая, с одной стороны, смелых и нестандартных, а с другой, взвешенных и разумных решений, выработать которые можно только сообща. Поэтому к ее обсуждению были приглашены архитекторы, реставраторы, дизайнеры, искусствоведы, строители, представители власти и студенческого сообщества – все, кто неравнодушен к судьбе, облику городов и проблемам, с которыми им приходится сталкиваться в наше стремительно меняющееся время.

Яркими эмоциями одного из главных градостроительных событий этого лета делимся на страницах журнала «Архитектура, строительство, транспорт».





Фото: официальный телеграм-канал VII Всероссийского фестиваля «Архитектурное наследие», журнал «Архитектура, строительство, транспорт»

Подписной индекс журнала "Архитектура, строительство, транспорт"
в объединенном каталоге «Пресса России» 79619 (www.pressa-rf.ru)

