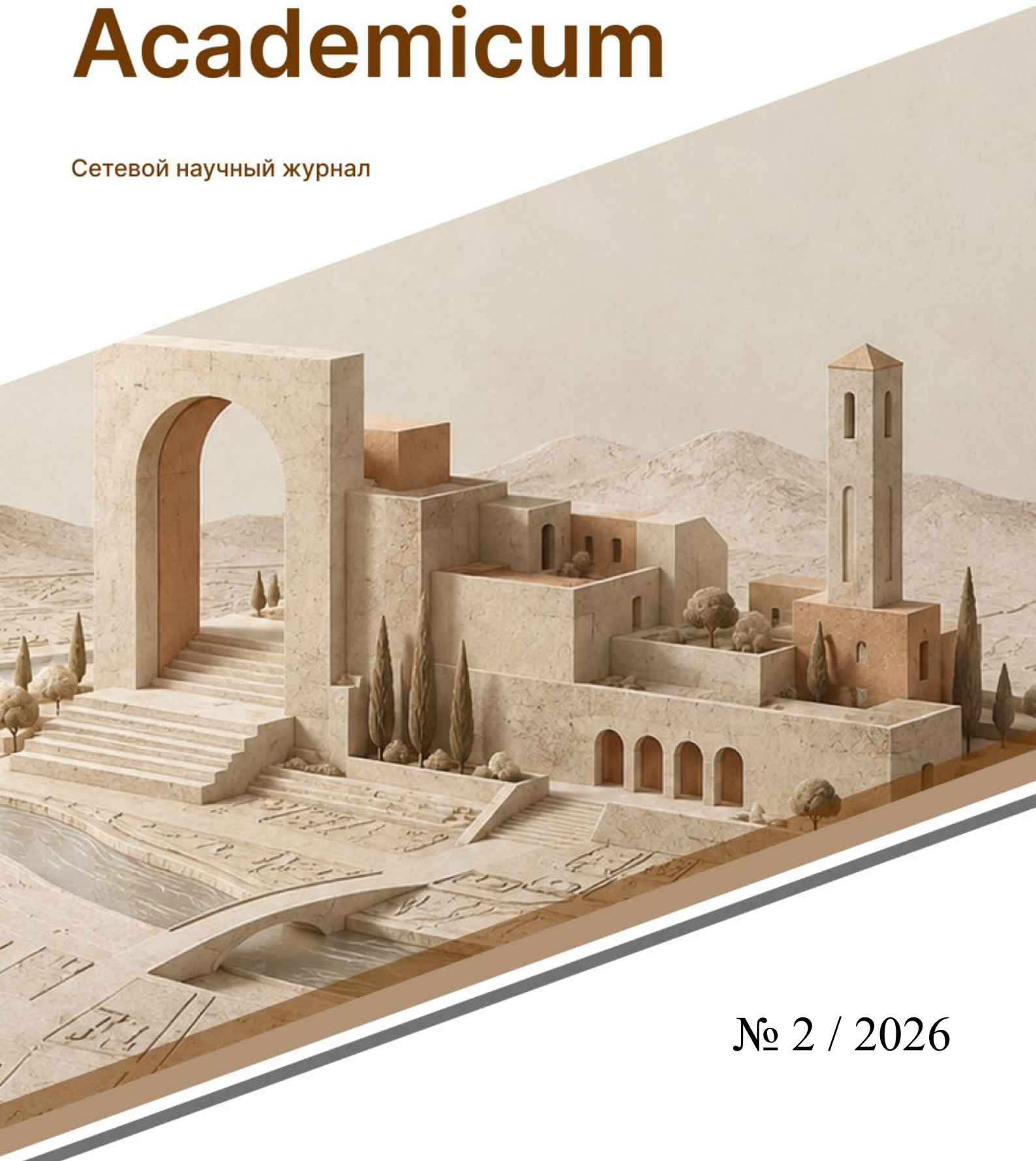
ISSN: 3033-9898

https://fundareview.ru/

Fundamentum Academicum

Сетевой научный журнал



№ 2 / 2026

Главный редактор журнала:
Овчинников Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», Тюменский индустриальный университет, Россия, Тюмень.

Заместитель главного редактора: Куровская Наталья Анатольевна, генеральный директор ООО «Академия Науки и Образования», Донецк, Российская Федерация

Члены редакционной коллегии:

Алсус Мухаммад Махди, кандидат технических наук, кафедра архитектуры, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Анпилов Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник испытательного центра строительных конструкций кафедры ЖБК, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Новосибирск.

Батаева Петимат Денаевна, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Россия, Грозный.

Большакова Полина Владимировна, кандидат технических наук, кафедра технологии и организации строительного производства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Власов Денис Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Галишникова Вера Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура, реставрация и дизайн», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Гогина Екатерина Григорьевна, кандидат технических наук, кафедра архитектуры и градостроительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Зильберова Инна Юрьевна, доктор технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство», Донской государственный технический университет, Россия, Ростов-на-Дону.

Ильичев Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Российская академия архитектуры и строительных наук, Россия, Москва.

Киевский Илья Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры, Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт организации, механизации и технической помощи строительству, Россия, Москва.

Киевский Леонид Владимирович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-проектный центр «Развитие города», Россия, Москва.

Козлова Анастасия Юрьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технологии и организация строительного производства», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Коротич Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры архитектуры, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, Екатеринбург.

Котков Роман Васильевич, кандидат технических наук, кафедра технологии и организации строительства, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Новосибирск.

Леоненко Кирилл Алексеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Казань.

Лисицына Александра Владиславовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры архитектурного проектирования, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Нижний Новгород.

Маилян Вадим Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, кафедра инженерно-строительных дисциплин, Южный федеральный университет, Россия, Ростов-на-Дону.

Метленков Николай Фёдорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Михальченко Олег Юрьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра технологии и организации строительства, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Новосибирск.

Назыпова Светлана Викторовна, кандидат технических наук, кафедра технологии и организации строительного производства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Попов Евгений Владимирович, профессор, профессор кафедры инженерной графики и информационного моделирования, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Нижний Новгород.

Салмо Али, кандидат технических наук, кафедра градостроительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Шеина Светлана Георгиевна, доктор технических наук, профессор, кафедра «Городское строительство и хозяйство», Донской государственный технический университет, Россия, Ростов-на-Дону.

Шипилова Наталья Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии, организации, экономики строительства и управления недвижимостью, Кубанский государственный технологический университет, Россия, Краснодар.

Шубенков Михаил Валерьевич, доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой, Московский архитектурный институт, Россия, Москва.

Югов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Макеевка.

Учредитель и издатель:
ООО «АКАДЕМИЯ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ»
Адрес учредителя: 283086, Донецкая Народная Республика, г. о. Донецк, г. Донецк, ул. Артема, д. 41, ком. 306в.
ИНН: 9303040432
КПП: 930301001
ОГРН: 1259300002103
Телефон: +7(909)679-60-04
Сайт: https://fundareview.ru/

Регистрационный номер СМИ: Эл № ФС77-92142 выдан 25.08.2026 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
ISSN: 3033-9898

Издатель: Куровская Наталья Анатольевна, Генеральный директор ООО «АНО».
Адрес издателя: г. Москва.

© Fundamentum Academicum, 2026 г.
Периодичность 4 раза в год.

В ЖУРНАЛЕ ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО СЛЕДУЮЩИМ НАУЧНЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ:
2.1.7. «Технология и организация строительства (технические науки)»
2.1.12. «Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки)»
2.1.13. «Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)»

ПОРЯДОК РАССМОТРЕНИЯ СТАТЕЙ

Все представленные рукописи первоначально проверяются редакцией на соответствие тематике журнала и проводят проверку на оригинальность (с использованием соответствующих программно-аппаратных комплексов). Прошедшие этот этап статьи

передаются на анонимное рецензирование членам редакционной коллегии или привлеченным внешним экспертам. При условии получения положительных рецензий без замечаний по существу исследования статья принимается к публикации, включается в редакционный портфель и размещается в очередном номере журнала.

Научный журнал «Fundamentum Academicum» занимается публикацией научно-практических исследований в соответствии с номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

Наш журнал стремится сделать процесс публикации максимально удобным для авторов, поэтому допускает различные варианты оформления библиографических ссылок и списка литературы.

Список источников оформляется по ГОСТ 7.0.5-2008 и приводится в конце статьи под заголовком «Список источников». При этом допускаются следующие форматы библиографических ссылок:

- Внутритекстовые ссылки (по стандарту APA)
- Подстрочные ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)
- Затекстовые ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)

Мы предоставляем авторам гибкость в оформлении, чтобы минимизировать бюрократические барьеры и сосредоточиться на содержании научного исследования. Главное — единообразие внутри самой статьи.

ПЛАТА ЗА ПУБЛИКАЦИЮ

Редакция не взимает с авторов плату за подготовку, размещение или печать материалов.

При использовании опубликованных материалов журнала ссылка на «Fundamentum Academicum» обязательна.

Полная или частичная перепечатка материалов допускается только по письменному разрешению авторов статей или редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикаций.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Chief Editor:
Ovchinnikov Igor Georgievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Highways, Bridges and Transport Structures, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia.

Deputy Chief Editor: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, General Director of "Academy of Science and Education" LLC, Donetsk, Russian Federation

Editorial Board:

Alsus Mukhammad Makhdi, PhD in Technical Sciences, Department of Architecture, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Anpilov Sergei Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Testing Center for Building Structures of the Department of Reinforced Concrete Structures, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia.

Bataeva Petimat Denaevna, PhD in Technical Sciences, Junior Researcher, Kh. I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia.

Bolshakova Polina Vladimirovna, PhD in Technical Sciences, Department of Construction Technology and Organization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Vlasov Denis Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Urban Planning, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Galishnikova Vera Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, Restoration and Design, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Gogina Ekaterina Grigorevna, PhD in Technical Sciences, Department of Architecture and Urban Planning, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Zilberova Inna Iurevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Construction and Municipal Services, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Ilichev Viacheslav Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia.

Kievskii Ilia Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department, Central Research and Design Institute of Organization, Mechanization and Technical Assistance to Construction, Moscow, Russia.

Kievskii Leonid Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Research and Design Center "Urban Development", Moscow, Russia.

Kozlova Anastasiia Iurevna, PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Construction Technology and Organization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Korotich Andrei Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Kotkov Roman Vasilevich, PhD in Technical Sciences, Department of Construction Technology and Organization, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia.

Leonenko Kirill Alekseevich, PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia.

Lisitsyna Aleksandra Vladislavovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Architectural Design, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia.

Mailian Vadim Dmitrievich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Civil Engineering Disciplines, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia.

Metlenkov Nikolai Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Mikhalchenko Oleg Iurevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Construction Technology and Organization, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia.

Nazypova Svetlana Viktorovna, PhD in Technical Sciences, Department of Construction Technology and Organization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Popov Evgenii Vladimirovich, Professor, Professor of the Department of Engineering Graphics and Information Modeling, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia.

Salmo Ali, PhD in Technical Sciences, Department of Urban Planning, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Sheina Svetlana Georgievna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Urban Construction and Municipal Services, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Shipilova Natalia Anatolevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Construction Technology, Organization, Economics and Real Estate Management, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia.

Shubenkov Mikhail Valerevich, Doctor of Architecture, Professor, Head of the Department, Moscow Architectural Institute, Moscow, Russia.

Iugov Anatolii Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Technology and Organization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Makeyevka, Russia.

Founder and publisher:
LLC "ACADEMY OF SCIENCE AND EDUCATION"
Founder's address: 41 Artem str., room 306b, Donetsk city, Donetsk People's Republic, 283086.
INN: 9303040432
KPP: 930301001
OGRN: 1259300002103
Phone: +7 (909)679-60-04
Website: https://fundareview.ru/

Media registration number: El No. FS77-92142 issued on 25.08.2026 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)
ISSN: 3033-9898

Publisher: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, CEO of ANO LLC.
Publisher's address: Moscow
© Fundamentum Academicum, 2026 г.
The frequency is 4 times a year.

THE JOURNAL PUBLISHES ARTICLES ON THE FOLLOWING SCIENTIFIC SPECIALTIES:
2.1.7. "Technology and organization of construction (technical sciences)"
2.1.12. "Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (technical sciences)"
2.1.13. "Urban planning, planning of rural settlements (technical sciences)"

PROCEDURE FOR REVIEWING ARTICLES

All submitted manuscripts are initially checked by the editorial staff for compliance with the journal's subject matter and checked for originality (using appropriate software and hardware systems). Articles that have passed this stage are submitted for anonymous review to members of the editorial board or external experts involved. Subject to receiving positive reviews without comments on the research substance, the article is accepted for publication, included in the editorial portfolio and placed in the next issue of the journal.

The scientific journal "Fundamentum Academicum" publishes scientific and practical research in accordance with the nomenclature of scientific specialties for which academic degrees are awarded.

Our journal strives to make the publication process as convenient as possible for authors, so it allows for various design options for bibliographic references and references.

The list of sources is drawn up in accordance with GOST 7.0.5-2008 and is given at the end of the article under the heading "List of sources". The following formats of bibliographic references are allowed:

- Intra-text links (according to the APA standard)
- Footnotes (according to GOST 7.0.5-2008)
- Non-text links (according to GOST 7.0.5-2008)

We provide authors with flexibility in design to minimize red tape and focus on the content of their research. The main thing is uniformity within the article itself.

PUBLICATION FEE

The editorial board does not charge authors a fee for the preparation, placement or printing of materials.

When using published journal materials, a link to "Fundamentum Academicum" is required.

Full or partial reprint of materials is allowed only with the written permission of the authors of the articles or the editorial board.

The editors 'point of view does not always coincide with the authors' point of view.

ОГЛАВЛЕНИЕ

2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки)..... 10

Левицкая К.М., Суханов А.В. ИНЪЕКЦИОННОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ СЛАБЫХ ГРУНТОВ: АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 10

Рыжов С.П. РОБОТИЗИРОВАННАЯ СБОРКА СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ СВАРКОЙ 27

Поляков Д.А. МОНТАЖ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДОВ СО ВСТРОЕННЫМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ 47

2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки) 65

Бакиров Р.Т., Капитонов М.В. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПЛОТНОСТИ УСИЛИЙ И ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОИСКА 65

Пухова А.И., Старков А.И. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ ФАСАДОВ В УМЕРЕННО-КОНТИНЕНТАЛЬНОМ КЛИМАТЕ 86

Еремеева В.А. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДАНИЙ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ: ТИПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ 103

2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки) 120

Бузикаева А.В., Кошелев А.В. СЕТЕВОЙ АНАЛИЗ ПЕШЕХОДНОЙ ДОСТУПНОСТИ ПОВСЕДНЕВНЫХ УСЛУГ В МОДЕЛИ 15-МИНУТНОГО ГОРОДА 120

Олейникова Р.Е. РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА ВЕТРОВОГО КОМФОРТА ПЕШЕХОДНЫХ ПРОСТРАНСТВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МОРФОТИПАХ ЗАСТРОЙКИ 142

Амерханова Г.И. АНАЛИЗ ЗОН ПЕШЕХОДНОГО ОХВАТА ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ПРИ ТРАНЗИТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ РАЗВИТИИ ГОРОДОВ СРЕДНЕЙ ЧИСЛЕННОСТИ 163

Ситдиков В.М. ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ПОДХОДЫ К АДАПТАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ ПОСЕЛЕНИЙ К РИСКАМ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ МОРЯ 181

2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки)

Научная статья
УДК 624.138.23

ИНЪЕКЦИОННОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ СЛАБЫХ ГРУНТОВ: АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Левицкая Ксения Михайловна, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, Белгород, levitskaia.bgtu@mail.ru;

Суханов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общей механики, Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк, andrei_sukhanov@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке и полевой апробации технологического регламента проникающего инъектирования водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов в условиях плотной городской застройки. Исследование выполнено на строительном участке жилого комплекса, где в основании залегает слой слабых суглинков мощностью 5,2 м с показателем текучести 0,65–0,78 и модулем деформации 4,2 МПа. В качестве инъекционного материала применена суспензия на основе портландцемента CEM I 42.5H с добавлением 15 % микрозернистой золы-уноса и поликарбоксилатного суперпластификатора при водоцементном отношении 0,42. На опытном участке опробованы три режима нагнетания при разном давлении. По результатам испытаний выбран рабочий режим с давлением 0,8 МПа, позволяющий предотвратить гидроразрыв пласта и выпучивание дневной поверхности. После закрепления модуль деформации грунта достиг 11,8 МПа, а коэффициент фильтрации снизился с 0,82 до 0,04 м/сут. Фактические данные статического зондирования и штамповых испытаний напрямую использованы для калибровки нелинейной модели Hardening Soil в программном комплексе PLAXIS 3D. Расчётные значения осадки фундаментной плиты разошлись с натурными

геодезическими замерами не более чем на 5 % на всех этапах возведения здания. Установлены критерии прекращения подачи раствора и очередность нагнетания через скважины, обеспечивающие формирование замкнутого контура закрепления без выхода материала за пределы проектной зоны.

Ключевые слова: инъекционное закрепление грунтов, слабые водонасыщенные суглинки, проникающее цементирование, реология суспензии, опытный участок, численное моделирование, PLAXIS 3D.

Original article

INJECTION STRENGTHENING OF WATER-SATURATED SOILS: ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Levitskaia Kseniia Mikhailovna, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Белгород, Russia, levitskaia.bgtu@mail.ru;

Sukhanov Andrei Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of General Mechanics, Lipetsk State Technical University, Липецк, Russia, andrei_sukhanov@yandex.ru

Abstract. This article is devoted to the development and field testing of a process protocol for penetrating injection of water-saturated silty clay soils in dense urban settings. The study was conducted at a residential construction site, where the foundation consists of a 5.2-meter-thick layer of soft loam with a flow index of 0.65–0.78 and a deformation modulus of 4.2 MPa. The injection material used was a slurry based on CEM I 42.5H Portland cement with the addition of 15% microgranular fly ash and a polycarboxylate superplasticizer at a water-cement ratio of 0.42. Three injection modes at different pressures were tested at the pilot site. Based on test results, a working mode with a pressure of 0.8 MPa was selected, which helps prevent hydraulic fracturing and surface heaving. After stabilization, the soil deformation modulus reached 11.8 MPa, and the permeability coefficient decreased from 0.82 to 0.04 m/day. Actual data from static sounding and stamp tests were directly used to

calibrate the nonlinear Hardening Soil model in the PLAXIS 3D software package. The calculated foundation slab settlement values differed from in-situ geodetic measurements by no more than 5% throughout all stages of the building's construction. Criteria for stopping the grout injection and the sequence of injection through boreholes were established, ensuring the formation of a closed stabilization loop without material leaking outside the design zone.

Keywords: injection soil stabilization, weak water-saturated loams, penetrating cementation, suspension rheology, pilot site, numerical modeling, PLAXIS 3D.

Введение. При возведении зданий и сооружений на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями возникает проблема низкой несущей способности водонасыщенных пылевато-глинистых и органических грунтов. Такие основания характеризуются высокой сжимаемостью, значительной пористостью и склонностью к длительным неравномерным осадкам [1-3]. Игнорирование данных факторов на этапе проектирования фундаментов ведет к критическим деформациям надземных конструкций, вплоть до потери их эксплуатационной пригодности. Традиционные методы подготовки оснований, такие как полная замена слабого слоя или устройство свайных полей, зачастую оказываются экономически нецелесообразными или технически невыполнимыми в стесненных условиях существующей городской застройки [4-6]. В подобных условиях единственным приемлемым решением нередко становится физико-химическое закрепление грунта, позволяющее изменять его свойства непосредственно в естественном залегании без масштабных земляных работ [7].

Современная практика геотехнического строительства располагает широким арсеналом технологий инъекционного усиления, каждая из которых обладает специфическими областями применения и ограничениями. Наиболее распространенным направлением остается цементация, при которой в поры и трещины массива нагнетают суспензии на основе портландцемента с

добавлением минеральных наполнителей и химических добавок [8], [9]. Данный подход обеспечивает высокую конечную прочность закрепленного грунта, однако сталкивается с серьезными ограничениями при работе в тонкодисперсных средах из-за риска закупорки пор и преждевременной фильтрации суспензии [10]. Альтернативой служат методы химического закрепления, в частности силикатизация. Инъекции растворов жидкого стекла с отвердителями позволяют эффективно работать в мелких и пылеватых песках, где твердые частицы цемента не способны к пенетрации [11]. Тем не менее, применение силикатов сопряжено с высокой стоимостью реагентов и рисками вторичного загрязнения подземной среды агрессивными щелочными компонентами. В последние годы исследователи уделяют всё больше внимания геополимерному инъектированию. Использование щелочно-активированных алюмосиликатных систем рассматривается как перспективная альтернатива, сочетающая экологичность за счет утилизации промышленных отходов с высокой химической стойкостью и управляемой кинетикой твердения [12], [13]. Однако технология геополимерных инъекций пока не имеет широкой нормативной базы и требует детального изучения реологических параметров рабочих растворов в зависимости от геологических условий.

Технология инъекционного закрепления выбрана для исследования благодаря ее универсальности и минимальному воздействию на окружающую застройку. Инъектирование применяют не только при аварийно-восстановительных работах, но и как отдельный этап возведения сооружений. В отличие от методов открытой разработки или вибрационного уплотнения, нагнетание вяжущих смесей позволяет локально устранять дефекты основания без нарушения структурной целостности существующих фундаментов. Эффективность зависит не только от состава инъекционного материала, но и от соответствия параметров нагнетания проницаемости и микроструктуре грунта [14], [15]. Ошибки в подборе вязкости и подвижности раствора приводят к гидроразрыву пласта или остановке подачи из-за кольматации пор. Таким

образом, дальнейшее совершенствование технологии требует комплексного подхода, объединяющего разработку адаптируемых составов смесей и строгий контроль параметров их фильтрации в пористой среде.

Обзор литературы. Возведение сооружений на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями неизбежно сопряжено с рисками развития критических деформаций оснований. Водонасыщенные пылевато-глинистые грунты характеризуются высокой сжимаемостью и низкой несущей способностью, что требует применения специальных методов их физической модификации. Традиционные подходы, такие как полная замена слабого слоя или устройство свайных полей, зачастую оказываются экономически нецелесообразными или технически невыполнимыми в стесненных условиях существующей застройки [16-18]. В подобных ситуациях единственно приемлемым решением выступает физико-химическое закрепление массива непосредственно в его естественном залегании.

Современная практика геотехнического строительства располагает широким арсеналом технологий инъекционного усиления, среди которых особое место занимает проникающее цементирование. Данный метод предполагает нагнетание суспензий в поровое пространство грунта без нарушения его естественной структуры. Эффективность закрепления зависит от реологических характеристик смеси и ее способности проникать в поры тонкодисперсных грунтов. Применение обычных портландцементов в пылеватых грунтах часто приводит к преждевременной кольматации пор и остановке подачи суспензии [19], [20]. Для решения этой проблемы исследователи предлагают использовать микрозернистые компоненты и химические добавки. В частности, введение микрозернистой золы-уноса позволяет существенно снизить кажущуюся вязкость и предельное напряжение сдвига, а использование суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров обеспечивает необходимую подвижность смеси при снижении водоцементного отношения, что критически важно для предотвращения водоотделения и сегрегации.

Несмотря на наличие теоретических разработок, на практике часто возникает проблема отсутствия воспроизводимых технологических регламентов, привязанных к конкретным геологическим условиям. Инженеры нередко сталкиваются с дилеммой: увеличение давления нагнетания расширяет радиус закрепления, но одновременно многократно повышает риск гидроразрыва пласта и выпучивания грунта, что ведет к деформациям соседних сооружений [21], [22]. Кроме того, параметры численных моделей для прогноза осадок нередко подгоняют под фактические значения осадки вместо того, чтобы определять их по результатам полевых испытаний до и после закрепления. Настоящее исследование направлено на устранение указанных пробелов путем разработки и полевого подтверждения строгого технологического регламента проникающего инъектирования, где все ключевые параметры определяются на этапе опытного участка, а численное моделирование базируется исключительно на верифицированных данных натурных испытаний.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступил строительный участок жилого комплекса, характеризующийся сложными инженерно-геологическими условиями. По данным изысканий, в основании залегает слой водонасыщенных пылеватых суглинков мощностью 5,2 метра с показателем текучести IL = 0,65–0,78. Уровень грунтовых вод установлен на глубине 1,5 м от поверхности. Физико-механические характеристики грунта в естественном состоянии свидетельствовали о его высокой сжимаемости: модуль деформации составлял всего 4,2 МПа, а коэффициент фильтрации достигал 0,8 м/сут.

Для инъектирования использовали суспензию на основе портландцемента CEM I 42.5H с добавлением 15% микрозернистой золы-уноса (масс.) и 1,2% суперпластификатора на основе поликарбоксилатных эфиров. Водоцементное отношение жестко контролировалось и составляло 0,42. Подобный состав, обоснованный данными о реологии цементных смесей, обеспечивал высокую проникающую способность при сохранении устойчивости суспензии и

минимальном водоотделении.

Ключевым этапом методики стало проведение опытного инъектирования на тестовом участке. Инженерами были апробированы три различных режима нагнетания для выявления оптимальных параметров, исключающих гидроразрыв пласта. После анализа результатов опытного участка был сформирован окончательный технологический регламент. Бурение скважин осуществлялось шнековым способом с обсадкой устьев. Инъекторы устанавливали с шагом 1,2 м, выбранным с учетом расчетного радиуса распространения суспензии. Последовательность работ строго регламентировалась: нагнетание начинали с периферийных скважин, последовательно смещаясь к центру массива. Такой подход позволял сформировать замкнутый контур закрепления, предотвращающий утечку раствора за пределы укрепляемой зоны.

Нагнетание в каждой скважине прекращали при достижении предельного давления 1,2 МПа, сохранении расхода раствора на уровне менее 2 л/мин в течение 5 минут, появлении инъекционной смеси в соседней скважине или подъеме дневной поверхности более чем на 5 мм. Контроль риска выпучивания грунта осуществлялся посредством непрерывного геодезического мониторинга реперов, установленных в зоне влияния.

Для оценки напряженно-деформированного состояния основания и прогнозирования осадки фундаментной плиты применялось численное моделирование в программном комплексе PLAXIS 3D. Поведение закрепленного массива описывалось моделью Hardening Soil. Принципиальным условием являлось то, что все входные параметры модели (модуль одометрического нагружения E_{oed}, секущий модуль при стандартном тесте E_{50}, модуль разгрузки E_{ur}, показатель жесткости m и коэффициент R_f) определялись исключительно путем обратной калибровки по данным полевых штамповых испытаний и статического зондирования, выполненных до и после инъектирования, а не путем подгонки под целевую осадку.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ результатов опытного инъектирования позволил установить зависимость состояния грунтового массива от режима нагнетания. При давлении 0,4 МПа (Режим А) наблюдалась недостаточная пенетрация раствора, а радиус закрепления не превышал 0,4 м. Повышение давления до 1,5 МПа (Режим Б) привело к гидроразрыву пласта: зафиксирован подъем поверхности на 14 мм, а раствор распространился неравномерно, образовав линзы. Оптимальным был признан Режим В с давлением 0,8 МПа, который обеспечил стабильное проникновение суспензии без нарушения структурной целостности массива (таблица 1).

Таблица 1 - Результаты опытного инъектирования и обоснование выбора рабочего режима

Параметр / Режим	Режим А (Р = 0,4 МПа)	Режим Б (Р = 1,5 МПа)	Режим В (Р = 0,8 МПа)
Расход раствора на 1 п.м.	12 л	45 л	28 л
Расчетный радиус закрепления	0,4 м	1,8 м (неравномерно)	1,1 м
Деформация дневной поверхности	0 мм	+14 мм (выпучивание)	+2 мм (в пределах нормы)
Характер распределения в массиве	Локальная кольматация устья	Гидроразрыв, образование линз	Равномерное заполнение пор
Статус принятия в рабочий регламент	Отклонен	Отклонен	Утвержден

Источник: разработано авторами.

Основной комплекс работ по инъекционному закреплению грунтового массива выполнялся с использованием технологического режима В, характеризующегося давлением нагнетания 0,8 МПа. Удельный расход материала в расчётной модели принят на уровне 0,22 м^3 раствора на 1 м^3 закрепляемого грунта. При оценке материалоёмкости технологического режима необходимо учитывать, что линейный объём выполненных работ и объёмный расход раствора имеют различную размерность и связаны между собой геометрическими параметрами зоны закрепления. Поэтому указанные показатели рассматриваются раздельно: первый характеризует организационно-технологическую производительность, второй — расход инъекционного

материала относительно объёма обработанного массива.

Операционный контроль включал непрерывную регистрацию давления и объема закачанной смеси в журнале работ. Приёмочный контроль проводили через 14 суток после завершения инъектирования с помощью статического зондирования и штамповых испытаний. Результаты подтвердили высокую эффективность выбранной технологии (таблица 2).

Таблица 2 - Показатели физико-механических свойств грунта до и после закрепления (по данным полевого контроля)

Контролируемый параметр	Естественное состояние (до)	После инъекционного закрепления	Динамика изменения
Сопротивление грунта под наконечником зонда, qs, МПа	1,8	5,4	+ 200%
Модуль деформации по данным штампа, E, МПа	4,2	11,8	+ 181%
Коэффициент фильтрации, k, м/сут	0,82	0,04	Снижение в 20 раз
Количество отказов зонда на 10 см	12	45	Увеличение прочности

Источник: разработано авторами.

Полученные в полевых испытаниях данные использованы при построении численной модели в PLAXIS 3D. Модель Hardening Soil, настроенная на фактические параметры, позволила рассчитать осадку фундаментной плиты под нагрузкой от возводимых этажей. Для верификации расчетных данных в процессе строительства на фундаментной плите были установлены геодезические марки, фиксирующие фактическую осадку сооружения (таблица 3).

Таблица 3 - Верификация численного моделирования данными натурных наблюдений за осадками

Этап строительства / Нагрузка	Расчетная осадка по PLAXIS 3D (модель Hardening Soil), мм	Фактическая осадка по данным геодезии, мм	Расхождение, %
Возведение 3 этажа (нагрузка 45 кПа)	8,2	7,8	4,8
Возведение 9 этажа (нагрузка 130 кПа)	19,5	20,1	3,0

Завершение строительства (нагрузка 185 кПа)	26,4	27,2	3,0
Эксплуатация через 6 месяцев	28,1 (стабилизация)	28,5 (стабилизация)	1,4

Источник: разработано авторами.

Анализ данных, представленных в таблице 3, демонстрирует высокую сходимость расчетных и фактических значений. Расхождение не превышает 4,8%, что подтверждает корректность подхода, при котором параметры нелинейной модели грунта определяются на основе прямых полевых испытаний, а не подбираются эмпирически. Осадка стабилизировалась на уровне 28,5 мм, что соответствует допустимым значениям для данного типа сооружений и свидетельствует об успешном формировании искусственного основания с заданными деформационными характеристиками.

Результаты исследования показывают, что параметры инъекционного закрепления слабых грунтов необходимо подбирать с учетом условий конкретного участка. Строгий технологический регламент, базирующийся на предварительном опытном участке, четких критериях прекращения нагнетания и непрерывном контроле риска гидроразрыва, позволяет гарантированно достигать проектных характеристик основания. Использование фактических данных полевых испытаний при численном моделировании обеспечивает высокую точность прогноза деформаций сооружений, что особенно важно для безопасного строительства в условиях плотной городской застройки.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает, что применение универсальных нормативных подходов при назначении параметров нагнетания инъекционных смесей в пылевато-глинистых грунтах приводит к значительным погрешностям. Ключевым результатом работы выступает разработка и практическая апробация адаптивного технологического регламента, базирующегося на предварительном этапе опытного закрепления. Именно полевые испытания позволили выявить нелинейную зависимость между давлением подачи суспензии и радиусом ее фильтрации, а также установить

предельные значения, превышение которых неизбежно ведет к гидроразрыву пласта и деформации дневной поверхности. Отказ от шаблонных схем бурения и нагнетания в пользу индивидуального подбора шага инъекторов и последовательности их активации обеспечил формирование замкнутого контура закрепления без утечек материала за пределы проектной зоны.

Существенное влияние на эффективность процесса оказала оптимизация реологических характеристик самого инъекционного материала. Введение микрозернистой золы-уноса в сочетании с поликарбоксилатным суперпластификатором обеспечило необходимый баланс между подвижностью суспензии и ее водоудерживающей способностью. Такой состав предотвратил преждевременную кольматацию пор и сегрегацию компонентов при фильтрации в тонкодисперсной среде, что согласуется с фундаментальными положениями о необходимости строгого контроля водоцементного отношения и использования модификаторов вязкости для стабилизации цементных смесей. Подобная рецептура не только улучшила проникающую способность раствора, но и снизила риск образования слабых прослоек из отстоявшейся воды внутри искусственного грунтового массива.

Достоверность прогноза деформаций фундаментных плит на искусственно сформированном основании достигнута за счет отказа от эмпирического подбора параметров численных моделей. Интеграция фактических данных статического зондирования и штамповых испытаний в модель Hardening Soil позволила воспроизвести реальное напряженно-деформированное состояние массива с учетом его нелинейной жесткости. Расхождение расчетных и натурных показателей осадки в процессе возведения здания не превысило пяти процентов, что свидетельствует о высокой надежности предложенного метода проектирования и объективности контроля качества закрепления. Такой подход исключает подгонку параметров грунта под ожидаемый результат и позволяет использовать численное моделирование как инженерный инструмент прогнозирования деформаций.

Перспективы дальнейшего развития технологии инъекционного усиления оснований в условиях плотной городской застройки связаны с углубленным изучением вопросов долговечности сформированных грунтоцементных структур. Представляет интерес применение технологий самовосстановления цементных матриц, разрабатываемых для ремонтных составов, при подземном закреплении грунтов. Внедрение кристаллизационных добавок и бактериальных агентов в состав инъекционных смесей сможет обеспечить автономное залечивание микротрещин, возникающих при циклических эксплуатационных нагрузках или сезонных колебаниях уровня грунтовых вод. Решение этой задачи позволит увеличить срок службы геотехнических сооружений и снизить затраты на их обслуживание.

Список литературы

1. Страданченко С. Г., Молев М. Д., Прокопов А. Ю. Натурное исследование и обоснование параметров нагнетания раствора при цементации грунтов основания здания Гимназии № 45 в г. Ростове-на-Дону // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 7. — С. 245–258.

2. Meng F., Peng Y. A Study on the Load-Bearing Characteristics and Load Transfer Mechanism of Bag Grouting Pile in Soft Soil Areas // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, No. 20. — Art. 11167. — DOI: 10.3390/app132011167.

3. Богов С. Г. Влияние технологических параметров струйной цементации на закрепление глинистых грунтов г. Санкт-Петербурга // Геотехника. — 2024. — Т. 16, № 3. — С. 66–79.

4. Cui X. et al. Nondestructive Controllable Grouting: A Novel Method to Correct Deviation of Building Foundation // Advances in Civil Engineering. — 2023. — Art. 1835403. — DOI: 10.1155/2023/1835403.

5. Власов М. А., Простов С. М. Прогноз устойчивости грунтового основания карьерной обогатительной установки на основе объемной геомеханической модели // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2024. — № 4 (164). — С. 5–22. — DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-5-22.

6. Sierra K., An J., Shamet R. et al. A Review of Geopolymer Binder as a Grouting Material // International Journal of Geo-Engineering. — 2024. — Vol. 15. — Art. 21. — DOI: 10.1186/s40703-024-00221-5.

7. Малинин А. Г., Салмин И. А. О возможности контроля прочности грунтоцементных элементов по прочности грунтоцементной пульпы // Жилищное строительство. — 2024. — № 9. — С. 11–13. — DOI: 10.31659/0044-4472-2024-9-11-13.

8. Birid K., Varak S. Stabilisation of Subsoil Using Colloidal Silica Beneath Shallow Foundation: A Case Study // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement. — 2025. — Vol. 178, No. 1. — P. 49–61. — DOI: 10.1680/jgrim.24.00001.

9. Зуев С. С., Маковецкий О. А. Закономерности изменения механических и фильтрационных свойств полускальных грунтов, модифицированных струйной цементацией // Жилищное строительство. — 2024. — № 9. — С. 30–35. — DOI: 10.31659/0044-4472-2024-9-30-35.

10. Liu R., Xu Z., Zhu Z., Ding Y. Enhancing Foundation Strength and Minimizing Uneven Settlement Through Split Grouting // Shock and Vibration. — 2025. — Art. 5130655. — DOI: 10.1155/vib/5130655.

11. Богов С. Г. К вопросу теоретического определения диаметра закрепления грунтов по струйной технологии // Современное строительство и архитектура. — 2025. — № 8 (63). — DOI: 10.60797/mca.2025.63.1.

12. Aghamolaei M., Alavi S. M., Talarposhti S. S., Ardabili A. A. K. Assessing Jet Grout Column Diameters in Loose to Medium Silty Soils Based on Field Observations // International Journal of Geomechanics. — 2025. — Vol. 25, No. 9. — DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-11251.

13. Зуев С. С., Маковецкий О. А. Опыт устройства и испытаний грунтоцементных свай в просадочных грунтах // Жилищное строительство. — 2025. — № 9. — С. 34–41. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-9-34-41.

14. Sabermahani M., Hajisalimi A. Field Study on Jet Grouting Columns Performance

Above and Below Groundwater Table in Sandy Soil // Case Studies in Construction Materials. — 2025. — Vol. 23. — Art. e05105. — DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05105.

15. Власов М. А., Герасимов О. В., Простов С. М. Особенности геологического строения грунтового основания установки главного проветривания строящейся шахты // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2025. — № 2 (168). — С. 5–21. — DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-5-21.

16. Zamanian M., Payan M., Salimi M. et al. Comparative Efficacy of Grouting and Mixing Methods for Stabilizing Collapsible Soils with Nano-Clay and Cement // Case Studies in Construction Materials. — 2025. — Vol. 23. — Art. e05159. — DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05159.

17. Малинин А. Г., Салмин И. А. О потере давления рабочей жидкости в напорных рукавах при струйной цементации грунтов // Жилищное строительство. — 2025. — № 9. — С. 24–28. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-9-24-28.

18. Zhu X., Zhao W., Fang S. et al. Study of Performance and Engineering Application of D-RJP Jet Grouting Technology in Anchorage Foundation Reinforcement for Deep Suspension Bridge Excavations // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, No. 16. — Art. 8985. — DOI: 10.3390/app15168985.

19. Богов С. Г. Технологические аспекты закрепления грунтов цементными растворами // Современное строительство и архитектура. — 2025. — № 12 (67). — DOI: 10.60797/mca.2025.67.2.

20. Pedrotti M., Lyons J., El Mountassir G., Kuras O., Lunn R. J. A Transport Model for the Permeation of Colloidal Silica // Acta Geotechnica. — 2026. — DOI: 10.1007/s11440-026-03117-z.

21. Богов С. Г. Оценка применения струйной технологии для решения задач по стабилизации грунтовых оснований // Современное строительство и архитектура. — 2026. — № 7 (74). — DOI: 10.60797/mca.2026.74.1.

22. Guo P., Xue P., Wang Y., Ou Q. In-Situ Measuring High-Pressure Jet Grouting Induced Evolution of Three-Dimensional Earth Pressure and Excess Pore Water

Pressure in Coastal Soft Soils // Measurement. — 2026. — Vol. 278. — Art. 121768. — DOI: 10.1016/j.measurement.2026.121768.

References

1. Stradanchenko S. G., Molev M. D., Prokopov A. Yu. Naturnoe issledovanie i obosnovanie parametrov nagnetaniya rastvora pri cementacii gruntov osnovaniya zdaniya Gimnazii № 45 v g. Rostove-na-Donu // Inzhenerny`j vestnik Dona. — 2023. — № 7. — S. 245–258.

2. Meng F., Peng Y. A Study on the Load-Bearing Characteristics and Load Transfer Mechanism of Bag Grouting Pile in Soft Soil Areas // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, No. 20. — Art. 11167. — DOI: 10.3390/app132011167.

3. Bogov S. G. Vliyanie texnologicheskix parametrov strujnoj cementacii na zakreplenie glinisty`x gruntov g. Sankt-Peterburga // Geotexnika. — 2024. — T. 16, № 3. — S. 66–79.

4. Cui X. et al. Nondestructive Controllable Grouting: A Novel Method to Correct Deviation of Building Foundation // Advances in Civil Engineering. — 2023. — Art. 1835403. — DOI: 10.1155/2023/1835403.

5. Vlasov M. A., Prostov S. M. Prognoz ustojchivosti gruntovogo osnovaniya kar`ernoj obogatitel`noj ustanovki na osnove ob``emnoj geomexanicheskoj modeli // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. — 2024. — № 4 (164). — S. 5–22. — DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-5-22.

6. Sierra K., An J., Shamet R. et al. A Review of Geopolymer Binder as a Grouting Material // International Journal of Geo-Engineering. — 2024. — Vol. 15. — Art. 21. — DOI: 10.1186/s40703-024-00221-5.

7. Malinin A. G., Salmin I. A. O vozmozhnosti kontrolya prochnosti gruntocementny`x e`lementov po prochnosti gruntocementnoj pul`py` // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2024. — № 9. — S. 11–13. — DOI: 10.31659/0044-4472-2024-9-11-13.

8. Birid K., Varak S. Stabilisation of Subsoil Using Colloidal Silica Beneath Shallow Foundation: A Case Study // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement. — 2025. — Vol. 178, No. 1. — P. 49–61. — DOI:

10.1680/jgrim.24.00001.

9. Zuev S. S., Makoveczkij O. A. Zakonomernosti izmeneniya mexanicheskix i fil`tracionny`x svojstv poluskal`ny`x gruntov, modificirovanny`x strujnoj cementaciej // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2024. — № 9. — S. 30–35. — DOI: 10.31659/0044-4472-2024-9-30-35.

10. Liu R., Xu Z., Zhu Z., Ding Y. Enhancing Foundation Strength and Minimizing Uneven Settlement Through Split Grouting // Shock and Vibration. — 2025. — Art. 5130655. — DOI: 10.1155/vib/5130655.

11. Bogov S. G. K voprosu teoreticheskogo opredeleniya diametra zakrepleniya gruntov po strujnoj texnologii // Sovremennoe stroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — № 8 (63). — DOI: 10.60797/mca.2025.63.1.

12. Aghamolaei M., Alavi S. M., Talarposhti S. S., Ardabili A. A. K. Assessing Jet Grout Column Diameters in Loose to Medium Silty Soils Based on Field Observations // International Journal of Geomechanics. — 2025. — Vol. 25, No. 9. — DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-11251.

13. Zuev S. S., Makoveczkij O. A. Opy`t ustrojstva i ispy`tanij gruntocementny`x svaj v prosadochny`x gruntax // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2025. — № 9. — S. 34–41. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-9-34-41.

14. Sabermahani M., Hajisalimi A. Field Study on Jet Grouting Columns Performance Above and Below Groundwater Table in Sandy Soil // Case Studies in Construction Materials. — 2025. — Vol. 23. — Art. e05105. — DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05105.

15. Vlasov M. A., Gerasimov O. V., Prostov S. M. Osobennosti geologicheskogo stroeniya gruntovogo osnovaniya ustanovki glavnogo provetrivaniya stroyashhejsya shaxty` // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. — 2025. — № 2 (168). — S. 5–21. — DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-5-21.

16. Zamanian M., Payan M., Salimi M. et al. Comparative Efficacy of Grouting and Mixing Methods for Stabilizing Collapsible Soils with Nano-Clay and Cement // Case Studies in Construction Materials. — 2025. — Vol. 23. — Art. e05159. — DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05159.

17. Malinin A. G., Salmin I. A. O potere davleniya rabochej zhidkosti v naporny`x rukavax pri strujnoj cementacii gruntov // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2025. — № 9. — S. 24–28. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-9-24-28.

18. Zhu X., Zhao W., Fang S. et al. Study of Performance and Engineering Application of D-RJP Jet Grouting Technology in Anchorage Foundation Reinforcement for Deep Suspension Bridge Excavations // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, No. 16. — Art. 8985. — DOI: 10.3390/app15168985.

19. Bogov S. G. Texnologicheskie aspekty` zakrepleniya gruntov cementny`mi rastvorami // Sovremennoe stroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — № 12 (67). — DOI: 10.60797/mca.2025.67.2.

20. Pedrotti M., Lyons J., El Mountassir G., Kuras O., Lunn R. J. A Transport Model for the Permeation of Colloidal Silica // Acta Geotechnica. — 2026. — DOI: 10.1007/s11440-026-03117-z.

21. Bogov S. G. Ocenka primeneniya strujnoj texnologii dlya resheniya zadach po stabilizacii gruntovy`x osnovanij // Sovremennoe stroitel`stvo i arxitektura. — 2026. — № 7 (74). — DOI: 10.60797/mca.2026.74.1.

22. Guo P., Xue P., Wang Y., Ou Q. In-Situ Measuring High-Pressure Jet Grouting Induced Evolution of Three-Dimensional Earth Pressure and Excess Pore Water Pressure in Coastal Soft Soils // Measurement. — 2026. — Vol. 278. — Art. 121768. — DOI: 10.1016/j.measurement.2026.121768.

Статья поступила в редакцию 25.06.2026; одобрена после рецензирования 04.08.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 25.06.2026; approved after peer review 04.08.2026; accepted for publication 08.10.2026.

Научная статья

УДК 69.057.1:621.791.052.6

РОБОТИЗИРОВАННАЯ СБОРКА СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ СВАРКОЙ

Рыжов Сергей Петрович, кандидат технических наук, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, Ростов-на-Дону, ryzhov63@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена экспериментальному обоснованию перехода к роботизированному выполнению стыковых соединений при монтаже крупногабаритных стальных каркасов зданий. На специализированном стенде, моделирующем условия поточного возведения этажерочных конструкций из прокатных двутавров, исследована работоспособность двухступенчатой системы технического зрения на основе лазерного сканера и стереоскопических камер, обеспечивающей пространственную привязку горелки к узлам сопряжения с погрешностью не более 0,44 мм при начальных смещениях монтируемых элементов до 7 мм. Реализован замкнутый контур адаптивного управления параметрами процесса GMAW-CMT, корректирующий скорость подачи проволоки и угол наклона горелки по данным лазерного профилометра и пассивной видеокамеры. Ультразвуковой контроль 48 стыковых швов и металлографический анализ макрошлифов зафиксировали снижение доли дефектных соединений в 1,5 раза по сравнению с ручной сваркой при одновременном сокращении времени цикла вдвое. Рассмотрена схема интеграции манипулятора в поточный метод монтажа с разграничением зон крановых и сварочных операций. Результаты формируют количественную основу для разработки технологических карт роботизированного монтажа и корректировки допусков на изготовление металлоконструкций.

Ключевые слова: роботизированная сварка, стальной каркас здания, монтаж металлоконструкций, техническое зрение, адаптивное управление

сварочным процессом, допуски позиционирования, поточный метод монтажа, качество сварных соединений.

Original article

ROBOTIC ASSEMBLY OF STEEL BUILDING FRAMES WITH ADAPTIVE WELDING CONTROL

Ryzhov Sergei Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, ryzhov63@mail.ru

Annotation. This article presents an experimental justification for the transition to robotic butt joints during the assembly of large-scale steel building frames. A specialized rig simulating the flow-line construction of rack-mounted structures from rolled I-beams was used to test the performance of a two-stage machine vision system based on a laser scanner and stereoscopic cameras. This system ensures spatial alignment of the torch with joints with an error of no more than 0.44 mm, with initial displacements of up to 7 mm. A closed-loop adaptive control system for the GMAW-CMT process parameters was implemented, adjusting the wire feed speed and torch tilt angle based on data from a laser profilometer and a passive video camera. Ultrasonic testing of 48 butt welds and metallographic analysis of macrosections recorded a 1.5-fold reduction in the percentage of defective joints compared to manual welding, while simultaneously halving the cycle time. A scheme for integrating a manipulator into a flow-line assembly method with delineation of crane and welding operation zones is discussed. The results form a quantitative basis for developing process charts for robotic assembly and adjusting tolerances for the manufacture of metal structures.

Keywords: robotic welding, steel building frame, metal structure assembly, machine vision, adaptive welding process control, positioning tolerances, flow assembly method, weld joint quality.

Введение. Производительность труда в строительной отрасли показывает отрицательную динамику, что подтверждается данными статистических наблюдений, проведённых в Японии, Германии и Соединённых Штатах Америки [1]. В отличие от обрабатывающей промышленности, где капиталовложения в автоматизацию обеспечивают непрерывный прирост выработки, строительство характеризуется крайне низкой капиталоёмкостью, высокой долей ручных операций и хроническим дефицитом квалифицированных кадров. Анализируя динамику отраслевых показателей, автор пришел к выводу, что традиционные методы возведения зданий приблизились к технологическому пределу, после достижения которого дальнейшее повышение производительности за счёт человеческого труда становится невозможным [2]. Удельный расход сырья и энергии на единицу возводимой площади, доля дефектов и систематическое превышение сметной стоимости свидетельствуют об исчерпании потенциала традиционных подходов и необходимости перехода к иным способам организации строительного производства.

Особое место в этом контексте занимают крупногабаритные стальные каркасы зданий и промышленных сооружений, при изготовлении и монтаже которых сварочные операции составляют значительную часть общей трудоёмкости производственного цикла. Ручная дуговая сварка соединений колонн, ригелей, ферм и узловых элементов остаётся преобладающей технологией на большинстве отечественных и зарубежных строительных площадок. Между тем исследования продемонстрировали, что автоматизированные процессы дуговой наплавки и сварки способны обеспечить механические характеристики соединения, сопоставимые с показателями литого или деформированного металла, при существенном сокращении производственного цикла [3], [4]. Речь идёт, в первую очередь, о технологиях GMAW, GTAW и плазменной сварки, которые в варианте адаптивного управления параметрами дуги дают возможность получать швы стабильного качества на элементах сложной конфигурации.

Тенденция к роботизации монтажных операций в строительстве прослеживается с середины 1970-х гг., когда японские подрядные компании, в частности, Shimizu и Taisei, приступили к разработке и внедрению однофункциональных строительных роботов, предназначенных для выполнения отдельных повторяющихся операций непосредственно на площадке [1]. Первоначально подобные устройства отличались высокой гибкостью применения, поскольку не требовали перестройки всего технологического цикла, однако их изолированность от смежных процессов и необходимость организации зон безопасности для персонала нивелировали ожидаемый прирост производительности. Осмысление этого опыта привело к формированию концепции автоматизированных площадок фабричного типа, где роботизированные подсистемы интегрируются в единую управляемую среду с регламентированными материальными потоками. Выделяется пять взаимосвязанных направлений, определяющих облик будущей автоматизации строительства:

- проектирование, ориентированное на робота;
- роботизированная индустриализация сборных элементов;
- строительные роботы;
- автоматизация площадки;
- так называемая «амбиентная робототехника», предполагающая интеграцию роботизированных систем непосредственно в конструкцию здания [1].

Применительно к сварке стальных каркасов ключевым звеном роботизированного цикла оказывается стадия позиционирования соединяемых элементов. В отличие от цеховых условий, где деталь жёстко закреплена в кондукторе и геометрия стыка известна с точностью до десятых долей миллиметра, на строительной площадке крупногабаритные колонны, балки и фермы подвергаются температурным деформациям, ветровым нагрузкам и гравитационному провисанию. Допуски на изготовление прокатных профилей

по действующим стандартам составляют, как правило, ±2-3 мм на длине элемента, однако при сборке многоэтажного каркаса накопленная погрешность способна достигать нескольких сантиметров на отметке верхних этажей. Пан и соавторы отмечают, что даже в лабораторных условиях системы дуговой сварки с проволочной подачей обеспечивают точность позиционирования порядка ±0,2 мм, что уже является недостаточным для ряда ответственных применений [4]. На открытой площадке эта величина возрастает, поэтому без введения замкнутого контура обратной связи по геометрии стыка обеспечить воспроизводимое качество шва невозможно.

Существующие подходы к решению данной проблемы разделяются на две группы. Первая связана с предварительным трёхмерным сканированием зоны монтажа и корректировкой траектории горелки на основе полученного облака точек; подобные методы описаны в работах, посвящённых адаптивному управлению процессом WAAM, где отклонения высоты наплавленного слоя компенсируются изменением скорости подачи проволоки на последующем проходе. Вторая группа объединяет средства активного и пассивного визуального контроля непосредственно в момент выполнения шва: лазерная структурированная подсветка сварочной ванны, стробоскопическое наблюдение с высокоскоростным электронным затвором, а также пассивные системы на основе регистрации собственного излучения расплавленного металла [2]. Каждая из этих методик обладает собственными ограничениями - от влияния зеркальной поверхности жидкой ванны на качество отражённого сигнала до невозможности синхронизации камеры с высокочастотным капельным переносом при импульсной сварке.

Дополнительную сложность при роботизированной сборке крупногабаритных каркасов вносит необходимость планирования траектории перемещения манипулятора в условиях ограниченного рабочего пространства. Как подчёркивают исследователи, для многоэлектродных систем ориентация горелки жёстко привязана к направлению перемещения, что накладывает

существенные ограничения на алгоритм построения пути и требует учёта столкновений с ранее смонтированными элементами конструкции [5]. В строительной практике ситуация усугубляется тем, что габариты монтируемых элементов исключают возможность свободного маневрирования манипулятора, а последовательность установки связей и раскосов обусловлена требованиями устойчивости каркаса на каждой промежуточной стадии.

Таким образом, задача автоматизации сварочных операций при возведении стальных каркасов зданий предполагает разработку целостной технологической цепочки, включающей робот-ориентированное проектирование узловых соединений, адаптивное планирование траекторий с учётом реальных отклонений геометрии, мониторинг параметров дуги и формы шва в реальном времени, а также организационные решения по интеграции роботизированного комплекса в действующий строительный поток. Современный этап развития строительной автоматизации можно охарактеризовать как переходную фазу между зарождением технологии и её массовым распространением. Этот процесс может быть представлен через наложение S-образных кривых, где зрелая традиционная технология уступает место формирующемуся технологическому укладу [1]. Для отечественной практики монтажа металлоконструкций, где доля ручного труда в сварочных операциях по-прежнему превышает 80%, осмысление зарубежного опыта и его адаптация к условиям конкретных строительных площадок приобретают научное и прикладное значение и влияют на конкурентоспособность отрасли.

Обзор литературы. Разработка систем технического зрения для роботизированной сварки металлических конструкций опирается на обширный массив исследований, сформировавшийся в контексте аддитивного производства и автоматизации дуговых процессов. Систематизированы два класса сенсорных подходов, применимых к задачам контроля сварочной ванны: активное визуальное зондирование, при котором источник структурированного света направляется в зону дуги, и пассивное наблюдение, основанное на

регистрации собственного излучения расплавленного металла [6]. Авторы указывают, что в первом случае критическим ограничением являются резкие перепады яркости изображения, вызванные сварочной дугой, для подавления которой применяются стробоскопические методы с синхронизацией высокоскоростного электронного затвора и импульсного лазерного излучателя [6]. Во втором случае, характерном для импульсной сварки вольфрамовым электродом, чёткое изображение удаётся получить в фазе минимального тока, но при высокочастотном капельном переносе в среде GMAW синхронизация камеры с дугой становится затруднительной [6].

Применительно к крупногабаритным строительным конструкциям задачи пространственной привязки горелки к стыку приобретают дополнительную специфику, нехарактерную для лабораторных установок аддитивного производства. Если в цеховых условиях, описанных коллективом авторов, отклонение позиционирования при дуговой наплавке составляет порядка ±0,2 мм [6], то на строительной площадке при монтаже колонн и ригелей длиной 6–12 м накопленная погрешность из-за температурных деформаций, гравитационного провисания и неточности заводской прирезки возрастает на порядок. Рассматривая эволюцию строительной автоматизации от единичных однофункциональных роботов к интегрированным площадкам фабричного типа, можно подчеркнуть, что переход к роботизированному монтажу подразумевает предварительное структурирование рабочей среды по аналогии с производственным цехом, где материальные потоки и зоны операций жёстко регламентированы [7]. Другими словами, система технического зрения строительного робота должна компенсировать как локальные отклонения геометрии стыка, так и глобальные смещения координатной базы, обусловленные неточностью установки монтируемых элементов.

Среди методов коррекции траектории в литературе выделяются два взаимодополняющих направления. Первое связано с предварительным трёхмерным сканированием зоны монтажа и построением скорректированной

программы перемещения горелки на основе полученного облака точек. Эффективность итеративного обучения показана для стабилизации высоты наплавленного слоя, так как после сканирования геометрии каждого проложенного валика отклонения по высоте компенсируются адаптивным изменением скорости подачи проволоки на последующем проходе [8]. Второе направление предполагает мониторинг непосредственно в момент выполнения шва. Существует метод наблюдения за динамической зеркальной поверхностью сварочной ванны с использованием лазерных диодов малой мощности (50 мВт), при котором точки или полосы, спроецированные на жидкий металл, отражаются и проецируются на экран регистрации, обеспечивая косвенное измерение геометрии ванны [9]. Также разработана интегрированная с промышленным манипулятором система отслеживания шва на основе компьютерного зрения для роботизированной сварки в режимах GTAW и GMAW [10].

Вопросы контроля качества сварных соединений стальных каркасов регламентированы действующими нормативными документами, однако сравнительные данные по дефектности швов, выполненных роботизированным и ручным способами на элементах строительного сортамента, в литературе представлены фрагментарно. Между тем именно такие данные необходимы для обоснования технологической целесообразности замены ручной сварки роботизированной в условиях поточного монтажа. Анализ S-образных кривых технологического развития показывает, что новая технология на начальной стадии уступает зрелой по ряду эксплуатационных характеристик [2]. Это наблюдение непосредственно переносится на роботизированную сварку строительных металлоконструкций, поскольку без количественной оценки качества швов в сопоставлении с ручной дуговой сваркой переход к автоматизированному процессу не может быть обоснован ни технологически, ни экономически.

Методы исследования. Экспериментальная часть работы выполнена на роботизированном стенде, моделирующем условия поточного монтажа

этажерочных стальных каркасов. Стенд представляет собой пространственную раму размером 12,0 × 6,0 × 4,5 м, собранную из двутавровых балок 30Б1 и 35Ш1 по ГОСТ 26020, с предустановленными узловыми фасонками, имитирующими сопряжения колонн с ригелями. В центральной части стенда закреплён шестикоординатный промышленный манипулятор грузоподъёмностью 16 кг и досягаемостью 2,01 м, оснащённый сварочной горелкой GMAW с системой холодного переноса металла (CMT). Управление движением робота осуществляется через контроллер, координирующий перемещение осей манипулятора и параметры источника питания, по аналогии со схемой, описанной для лабораторных установок WAAM [1].

Пространственная привязка горелки к узлам сопряжения реализована посредством комбинированной системы технического зрения, включающей твердотельный лазерный сканер (LiDAR) с угловым разрешением 0,25° и дальностью действия до 60 м, а также пару стереоскопических камер с разрешением 12 Мп и базой 350 мм, смонтированных на фланце шестой оси манипулятора. LiDAR выполняет функцию грубого позиционирования, по результатам однократного сканирования рабочей зоны формируется облако точек с шагом 3 мм, из которого алгоритмом сегментации выделяются плоскости полок и стенок двутавров, а также контуры разделки кромок в узлах сопряжения. Стереокамеры обеспечивают точную локализацию корня шва на расстоянии от 200 до 800 мм от объектива с погрешностью не более ±0,35 мм. Полученные данные передаются в контроллер робота, где производится пересчёт проектной траектории горелки в фактическую систему координат узла.

Адаптивное управление процессом сварки организовано по замкнутому контуру. Непосредственно перед возбуждением дуги лазерный профилометр, установленный на горелке, сканирует поперечное сечение разделки кромок с частотой 500 Гц, фиксируя ширину зазора, угол скоса и смещение кромок. На основании полученных профилей алгоритм корректирует угол наклона горелки, скорость перемещения и амплитуду поперечных колебаний. В ходе сварки

пассивная камера с узкополосным оптическим фильтром (центральная длина волны 650 нм, полуширина 10 нм) регистрирует контур сварочной ванны в фазе паузы импульсного тока, а система обработки изображений в реальном времени вычисляет ширину и площадь видимой части ванны. При отклонении ширины более чем на 15% от номинального значения контроллер изменяет скорость подачи проволоки в диапазоне от 2,5 до 8,0 м/мин с шагом 0,1 м/мин.

Качество сварных соединений оценивалось двумя взаимодополняющими методами. Ультразвуковой контроль выполнялся на частоте 4 МГц пьезоэлектрическим преобразователем с углом ввода 70° в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 17640. Обследовано 48 стыковых швов, выполненных роботизированным способом, и 48 швов, сваренных вручную электродами Э50А диаметром 4 мм теми же сварщиками на идентичных образцах стенда. Для металлографического анализа из контрольных участков вырезаны темплеты, подготовленные макрошлифы путём механической шлифовки и травления 10%-ым водным раствором персульфата аммония. Микроструктурные исследования проведены на оптическом микроскопе при увеличениях от ×50 до ×500.

Организация поточного процесса на стенде воспроизводила последовательность операций, характерную для монтажа многоэтажного стального каркаса: установка колонны в проектное положение, фиксация временными связями, подача ригеля, выверка, прихватка и окончательная сварка узлов сопряжения. Робот-манипулятор интегрировался в технологическую цепочку после этапа выверки, выполняя сварку нижнего пояса ригеля с колонной в нижнем положении, затем — сварку верхнего пояса и стенки в горизонтальном положении. Время цикла фиксировалось электронным хронометром контроллера. Безопасность зоны работы манипулятора обеспечивалась световыми барьерами и программным ограничением рабочей области в соответствии с рекомендациями по организации автоматизированных площадок фабричного типа, где параллельное присутствие персонала в зоне действия

робота исключается конструктивно [2].

Результаты исследования и их обсуждение. Комбинированная система технического зрения продемонстрировала устойчивость пространственной привязки к узловым соединениям в условиях, когда начальные отклонения монтируемых элементов достигали 4-7 мм по вертикали и 2-5 мм по горизонтали. В таблице 1 приведены обобщённые данные по точности позиционирования горелки относительно оси шва при различных значениях начального смещения узла, зафиксированные по 32 измерениям на стенде.

Таблица 1 - Точность позиционирования сварочной горелки относительно оси шва в зависимости от начального смещения узла сопряжения

Начальное смещение узла, мм	Средняя погрешность привязки по LiDAR, мм	Итоговая погрешность после коррекции стереокамерами, мм	Максимальное зафиксированное отклонение, мм
до 2,0	0,9	0,22	0,31
2,0 – 4,0	1,4	0,28	0,38
4,0 – 7,0	2,1	0,33	0,44

Источник: разработано автором.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что при значительных начальных отклонениях, характерных для крупногабаритных элементов на строительной площадке, итоговая погрешность позиционирования не превышает 0,44 мм, что сопоставимо с точностью цеховых установок аддитивного производства, указанной в [1]. Важно, что двухступенчатая архитектура системы позволяет избежать необходимости многократного перепозиционирования манипулятора и сократить время подготовительного этапа до 40-55 с на один узел.

Адаптивный контур управления параметрами сварки в реальном времени показал наибольшую эффективность при переменном зазоре в разделке кромок, что типично для узлов сопряжения прокатных двутавров с допусками на изготовление по ГОСТ 26020. На рисунке 1 представлена концепция функционирования адаптивного контура, реализованного на стенде.

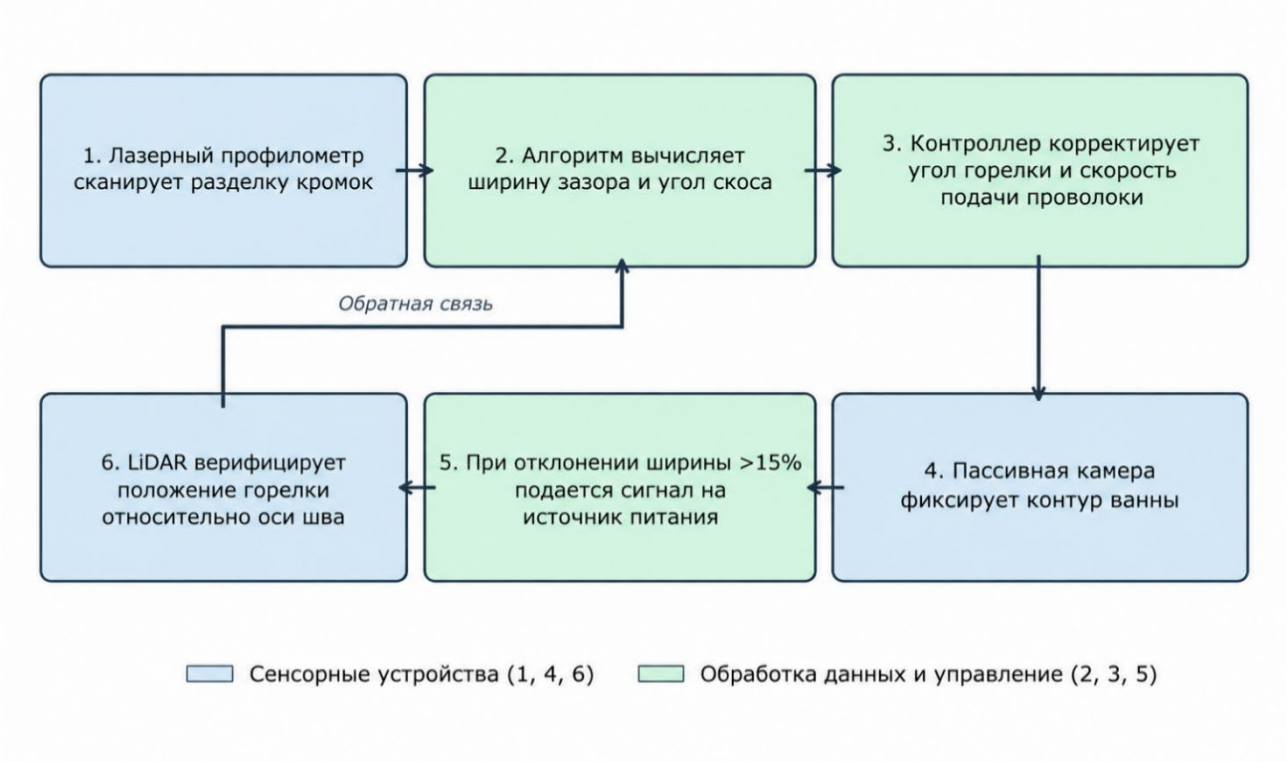


Рисунок 1 - Концепция адаптивного управления сварочным процессом на роботизированном стенде (источник: разработано автором)

Замкнутый контур функционирует на двух временных масштабах: быстрый контур (частота 500 Гц) реагирует на локальные изменения геометрии разделки, а медленный контур (период 0,8-1,2 с) компенсирует накопленные отклонения высоты и ширины валика по данным сканирования предыдущего прохода. Такое разделение согласуется с выводами о том, что в системах WAAM с открытым контуром качество наплавленного металла определяется точностью используемых моделей, тогда как замкнутый контур обеспечивает устойчивость системы к возмущениям [1].

Сравнительная оценка качества сварных соединений проведена по результатам ультразвукового контроля двух групп, каждая из которых включала 48 соединений. При роботизированной сварке внутренние дефекты зарегистрированы в 3 соединениях, что соответствует 6,25 % обследованной совокупности. Все выявленные дефекты локализовались в зоне перехода от корневого к заполняющему слою; эквивалентный диаметр отражателей не превышал 1,8 мм. В группе соединений, выполненных ручным способом,

дефекты выявлены в 9 случаях, или 18,75 % обследованной совокупности. В четырёх соединениях эквивалентный диаметр отражателя превышал 3,0 мм. Таким образом, наблюдаемая доля дефектных соединений при роботизированном выполнении работ оказалась ниже на 12,5 процентного пункта, что соответствует относительному уменьшению на 66,7 %. Полученные различия характеризуют сравнительные результаты контроля двух технологических вариантов. Их интерпретация должна учитывать возможное влияние применяемого способа сварки, параметров режима и характеристик соединяемых элементов (таблица 2).

Таблица 2 - Результаты ультразвукового контроля стыковых швов на стенде

Показатель	Роботизированная сварка (GMAW-CMT)	Ручная дуговая сварка (Э50А, d = 4 мм)
Общее число обследованных швов	48	48
Швы без дефектов	45 (93,8 %)	39 (81,3 %)
Швы с дефектами, имеющими эквивалентный диаметр ≤ 2 мм	3 (6,2 %)	5 (10,4 %)
Швы с дефектами, имеющими эквивалентный диаметр > 3 мм	0	4 (8,3 %)
Среднее время выполнения одного стыкового шва, мин	7,2	14,6

Источник: разработано автором.

В образцах роботизированной сварки зона термического влияния имела ширину 1,8-2,3 мм с чётко выраженной мелкозернистой структурой нормализованного участка, тогда как при ручной сварке ширина зоны термического влияния варьировалась в пределах 2,5-4,1 мм, а в 3 из 12 исследованных темплетов зафиксированы участки перегрева с крупноигольчатым видманштеттовым строением. Различие объясняется стабильностью погонной энергии при автоматизированном процессе: контроллер поддерживает скорость перемещения горелки с отклонением не более ±0,3 мм/с, при ручной сварке скорость перемещения электрода колеблется в значительно более широком диапазоне в зависимости от квалификации и физического состояния сварщика.

Показатели производительности, зафиксированные на стенде, указывают

на сокращение времени выполнения одного стыкового соединения в среднем в 2,03 раза при роботизированной сварке по сравнению с ручной. При этом следует учитывать, что в поточном цикле монтажа робот-манипулятор не требует перерывов, связанных с заменой электродов, отдыхом оператора и переналадкой рабочего места. На стенде суммарное время монтажа одного яруса каркаса (четыре колонны, четыре ригеля, восемь узлов сопряжения) составило 3 ч 40 мин при роботизированной сварке против 6 ч 50 мин при ручной, включая время выверки и прихватки, общее для обоих вариантов.

Интеграция робота-манипулятора в поточный метод монтажа этажерочных конструкций реализована по схеме, представленной на рисунке 2.

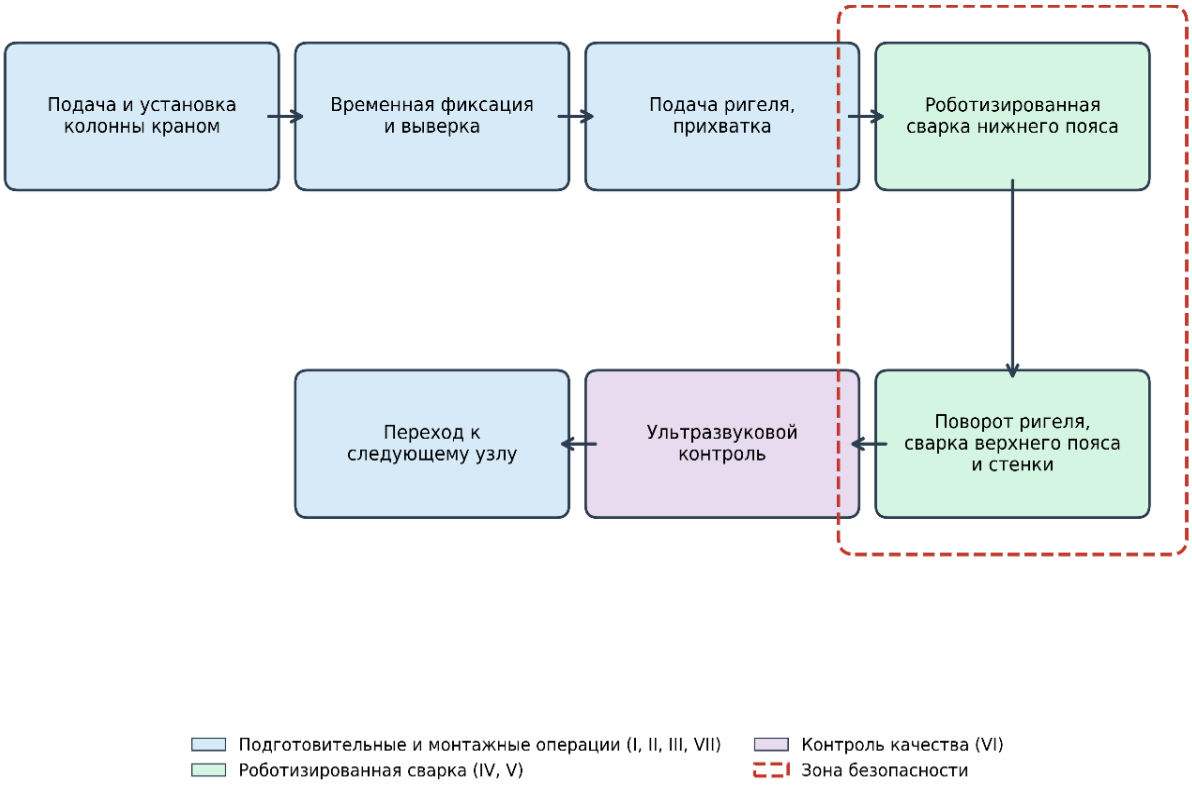


Рисунок 2 - Схема интеграции роботизированного комплекса в поточный монтаж стального каркаса (источник: разработано автором)

Робот-манипулятор занимает позиции IV и V, а крановые и выверочные операции остаются за пределами его рабочей области. Разделение функций соответствует принципу робот-ориентированного проектирования, сформулированному ещё в 1988 году и предполагающему адаптацию последовательности строительных операций к возможностям

автоматизированного оборудования [2]. Безопасность персонала обеспечена тем, что зона действия манипулятора физически отделена от зоны перемещения кранового груза: кран подаёт элемент на позицию III, после чего отходит за пределы ограждения, и лишь тогда световой барьер деактивируется, разрешая роботу начать сварку. Аналогичная логика заложена в концепции однофункциональных строительных роботов, где необходимость организации зон безопасности для персонала рассматривалась как одно из главных ограничений производительности [2]. В поточной схеме стенда это ограничение снято за счёт последовательного выполнения операций.

Следует подчеркнуть, что технологическая эффективность роботизированной сварки крупногабаритных стальных каркасов определяется качеством подготовки монтажной базы и допустимыми отклонениями устанавливаемых элементов. Данные таблицы 1 показывают, что при начальных смещениях свыше 7 мм погрешность привязки возрастает до значений, при которых стабильное формирование шва без дополнительных компенсирующих приёмов становится проблематичным. Это требует ужесточения допусков заводского изготовления проката и требований к точности фундаментных опор по сравнению с условиями, допустимыми при традиционной ручной сварке, когда небольшие смещения могут компенсироваться сварщиком визуально. В терминах технологии и организации строительства, речь идёт о необходимости робот-ориентированного проектирования всей цепочки предшествующих операций.

Резюмируя результаты экспериментальной кампании на стенде, роботизированная сварка крупногабаритных стальных каркасов при условии применения комбинированной системы технического зрения и адаптивного управления параметрами обеспечивает снижение доли дефектных соединений в 1,5-2 раза по сравнению с ручной дуговой сваркой при одновременном сокращении времени цикла вдвое. Данные ультразвукового контроля и металлографического анализа макрошлифов подтверждают, что стабильность

погонной энергии и точность позиционирования горелки являются определяющими факторами формирования качественной структуры шва. Вместе с тем переход к роботизированному монтажу в полномасштабном строительстве требует уточнения допусков на изготовление и установку элементов, разработки специализированных кондукторных приспособлений для временной фиксации и интеграции систем технического зрения непосредственно в технологию производства работ.

Выводы. Проведённая на стенде серия экспериментов подтвердила, что роботизированная сварка крупногабаритных стальных каркасов при условии применения двухступенчатой системы технического зрения и адаптивного контура управления параметрами дуги способна обеспечить более высокое качество стыковых соединений по сравнению с результатами ручной дуговой сварки теми же операторами на идентичных образцах. Доля швов, прошедших ультразвуковой контроль без регистрации внутренних дефектов, составила 93,8% для автоматизированного процесса против 81,3% при ручном выполнении, а среднее время формирования одного стыкового соединения сократилось до 7,2 мин.

Вместе с тем экспериментальные данные выявили ряд ограничений, которые необходимо учитывать при масштабировании технологии на строительные площадки. Погрешность позиционирования горелки, не превышающая 0,44 мм при начальных смещениях узла до 7 мм, возрастает за пределами этого диапазона, что указывает на необходимость ужесточения допусков заводского изготовления прокатных профилей и фундаментных опор по сравнению с действующими нормативными значениями. Без соответствующей корректировки допусков робот-манипулятор оказывается неспособным компенсировать накопленные погрешности.

С точки зрения организации строительного производства, поточная схема монтажа, реализованная на стенде, показала, что интеграция манипулятора в технологическую цепочку после этапа выверки и временной фиксации позволяет

исключить параллельное присутствие персонала в зоне сварки без ущерба для ритмичности процесса. Суммарное время возведения одного яруса каркаса сократилось с 6 ч 50 мин до 3 ч 40 мин, что при экстраполяции на многоэтажное здание даёт существенное уменьшение продолжительности монтажного периода. Данный результат согласуется с выводами о том, что автоматизированные площадки фабричного типа обеспечивают выигрыш в производительности прежде всего за счёт непрерывности и регламентированности материальных потоков. Ограничение, связанное с необходимостью организации зон безопасности для персонала, которое ранее рассматривалось как главный недостаток однофункциональных строительных роботов первого поколения [2], в поточной схеме снимается последовательным выполнением крановых и сварочных операций.

Следует, однако, признать, что стендовые испытания моделируют часть условий, характерных для полномасштабного строительства. Ветровые нагрузки, температурные перепады в течение рабочей смены, вибрации от соседних монтажных операций, ограниченная досягаемость манипулятора при высоте этажа свыше 4,5 м, необходимость перемещения робота между ярусами остаются за рамками проведённого эксперимента и требуют отдельного исследования. Полноценная автоматизированная система от CAD-модели до готового изделия до настоящего времени не коммерциализирована, а планирование траекторий содержит элементы, подразумевающие участие оператора [1]. Аналогичная ситуация складывается и в строительном монтаже, поскольку алгоритмы адаптивной коррекции траектории горелки, эффективно работающие на одиночном стыке в лабораторных условиях, нуждаются в верификации на многоузловых конфигурациях с переменным пространственным положением шва.

Список литературы

1. Байбурин А. Х., Мельник А. А., Лебедь А. Р. Общие тенденции развития строительных технологий // Современные тенденции в строительстве,

градостроительстве и планировке территорий. – 2026. – Т. 5. – №. 1. – С. 68-78.

2. Dong Y., Wang P., Xie D., Wu Z., Xiao M., Feng Y. Computer-aided and intelligent steel construction in a high-rise complex: A case study // Structures. – Elsevier, 2025. – Т. 82. – С. 110607.

3. Bulganbayev M. A., Suliyev R., Fonseca Ferreira N. M. Prototype for the application of production of heavy steel structures // Electronics. – 2024. – Т. 13. – №. 2. – С. 387.

4. Zhang W., Li J. The application of intelligent welding robots and visual detection algorithms in building steel structures // Scalable Computing: Practice and Experience. – 2024. – Т. 25. – №. 5. – С. 4265-4273.

5. Yu H., Peng Z., He Z., Huang C. Application maturity evaluation of building steel structure welding robotic technology based on multi-level gray theory // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2024. – Т. 31. – №. 11. – С. 4372-4397.

6. Xiao M., Wang P., Liu W., Wu H., Dong Y. Applications of advanced off-site manufacturing for steel modular buildings // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. – Emerald Publishing Limited, 2026. – С. 1-13.

7. Yu H., Peng Z., He Z., Huang C. Application maturity evaluation of building steel structure welding robotic technology based on combination weight and multi-level grey theory // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2023. – Т. 44. – №. 4. – С. 6435-6451.

8. Khosravani M. R., Haghighi A. Large-scale automated additive construction: overview, robotic solutions, sustainability, and future prospect // Sustainability. – 2022. – Т. 14. – №. 15. – С. 9782.

9. Chou C. C., Yu G. J., Wang K. J., Chang W. T., Wu C. L., Zhao C. C. J., ... Chou M. T. Application of robotic welding technology to the continuity plate weld within a steel built-up box column in buildings // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2023. – Т. 24. – №. 9. – С. 1563-1576.

10. Yao S., Xue L., Huang J., Zhang R., Zhong P., Guo L. Mobile welding robots under special working conditions: a review // The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology. – 2025. – T. 138. – №. 9. – C. 3907-3923.

References

1. Bajburin A. X., Mel`nik A. A., Lebed` A. R. Obshhie tendencii razvitiya stroitel`ny`x texnologij // Sovremenny`e tendencii v stroitel`stve, gradostroitel`stve i planirovke territorij. – 2026. – T. 5. – №. 1. – S. 68-78.

2. Dong Y., Wang P., Xie D., Wu Z., Xiao M., Feng Y. Computer-aided and intelligent steel construction in a high-rise complex: A case study // Structures. – Elsevier, 2025. – T. 82. – P. 110607.

3. Bulganbayev M. A., Suliyev R., Fonseca Ferreira N. M. Prototype for the application of production of heavy steel structures // Electronics. – 2024. – T. 13. – No. 2. – P. 387.

4. Zhang W., Li J. The application of intelligent welding robots and visual detection algorithms in building steel structures // Scalable Computing: Practice and Experience. – 2024. – T. 25. – No. 5. – P. 4265-4273.

5. Yu H., Peng Z., He Z., Huang C. Application maturity evaluation of building steel structure welding robotic technology based on multi-level gray theory // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2024. – T. 31. – No. 11. – P. 4372-4397.

6. Xiao M., Wang P., Liu W., Wu H., Dong Y. Applications of advanced off-site manufacturing for steel modular buildings // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. – Emerald Publishing Limited, 2026. – P. 1-13.

7. Yu H., Peng Z., He Z., Huang C. Application maturity evaluation of building steel structure welding robotic technology based on combination weight and multi-level gray theory // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2023. – T. 44. – No. 4. – P. 6435-6451.

8. Khosravani M. R., Haghighi A. Large-scale automated additive construction: overview, robotic solutions, sustainability, and future prospect // Sustainability. – 2022. – T. 14. – No. 15. – P. 9782.

9. Chou C. C., Yu G. J., Wang K. J., Chang W. T., Wu C. L., Zhao C. C. J., ... Chou M. T. Application of robotic welding technology to the continuity plate weld within a

steel built-up box column in buildings // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2023. – T. 24. – No. 9. – P. 1563-1576.
10. Yao S., Xue L., Huang J., Zhang R., Zhong P., Guo L. Mobile welding robots under special working conditions: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – T. 138. – No. 9. – P. 3907-3923.

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; одобрена после рецензирования 19.06.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 05.05.2026; approved after peer review 19.06.2026; accepted for publication 08.10.2026.

Научная статья

УДК 69.059.2:621.472

МОНТАЖ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДОВ СО ВСТРОЕННЫМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Поляков Денис Алексеевич, кандидат технических наук, Московский политехнический университет, Россия, Москва, polyakov_polytech@yandex.ru

Аннотация. Интеграция фотоэлектрических модулей в ограждающие конструкции зданий формирует принципиально новые требования к технологии их возведения, особенно в части обеспечения пожарной безопасности и контроля скрытых дефектов. Цель работы - разработка технологических решений по монтажу навесных вентилируемых фасадов с интегрированными фотоэлектрическими модулями и комплексная оценка монтажных процессов. Объектом исследования выступил натурный макет фасадной системы, возведенный в климатическом районе II. Методология включала хронометраж укрупненных операций, двухэтапную электролюминесцентную диагностику кремниевых ячеек, инструментальный контроль усилий затяжки крепежа, а также анализ результатов крупномасштабных огневых испытаний аналогичных систем. Анализ показал, что трудоёмкость монтажа BIPV-фасадов почти вдвое выше трудоёмкости монтажа фасадов с традиционной облицовкой. Это связано с необходимостью точной подгонки межмодульных зазоров и прокладки силовых кабелей. Применение динамометрического контроля позволяет снизить риск образования микротрещин в кремниевых ячейках, а повторная электролюминесцентная диагностика после монтажа — выявить возникшие дефекты. Оценка поведения конструкции при экстремальных тепловых воздействиях обосновала неэффективность исключительно интумесцентных барьеров и доказала необходимость применения комбинированных

противопожарных рассечек с механическим удержанием стеклянных панелей. Дополнительно сформулированы требования к прокладке кабельных трасс постоянного тока в вентилируемой полости для предотвращения рисков дугового пробоя. Сформированные критерии приемки и декомпозиция монтажных операций могут быть использованы при актуализации нормативной базы и составлении технологических карт для объектов с интегрированной фотоэлектрикой.

Ключевые слова: вентилируемый фасад; интегрированные фотоэлектрические модули; технология монтажа; пожарная безопасность ограждающих конструкций; электролюминесцентный контроль; трудоемкость строительных операций; натурный макет; противопожарные рассечки.

Original article

INSTALLATION OF VENTILATED FACADES WITH BUILT-IN PHOTOVOLTAIC MODULES: TECHNOLOGICAL AND CONTROL OPERATIONS

Poliakov Denis Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, polyakov_polytech@yandex.ru

Abstract. The integration of photovoltaic modules into building envelopes creates fundamentally new requirements for their construction technology, particularly in terms of fire safety and the detection of hidden defects. The objective of this study is to develop technological solutions for the installation of curtain-wall ventilated facades with active cladding and to comprehensively evaluate the production processes. The object of the study was a full-scale model of the facade system, constructed in climate zone II. The methodology included timing of large-scale operations, two-stage electroluminescence diagnostics of silicon cells, instrumental control of fastener tightening forces, and analysis of the results of large-scale fire tests of similar systems. An analysis of labor costs revealed that the installation of BIPV

facades is almost twice as expensive as traditional cladding, due to the need for precise adjustment of intermodular gaps and the routing of power circuits. The use of dynamometric testing and repeated electroluminescence after installation of the elements helps minimize the formation of microcracks in the silicon wafer. An assessment of the structure's performance under extreme thermal conditions demonstrated the ineffectiveness of intumescent barriers alone and demonstrated the need for combined firebreaks with mechanical retention of glass panels. Additionally, requirements were formulated for the installation of DC cables in the ventilated cavity to prevent the risk of arcing. The resulting acceptance criteria and breakdown of installation operations can be used to update regulatory frameworks and create process maps for facilities with integrated photovoltaics.

Keywords: ventilated facade; integrated photovoltaic modules; installation technology; fire safety of enclosing structures; electroluminescent control; labor intensity of construction operations; full-scale model; fire-resistant cuts.

Актуальность исследования. Развитие технологий энергоэффективного строительства способствует использованию ограждающих конструкций не только для теплозащиты здания, но и в составе инженерных систем [1]. Интеграция фотоэлектрических модулей в плоскость фасадов становится востребованным решением, особенно в регионах с высокими широтами, где угол падения солнечных лучей делает вертикальные поверхности более эффективными для генерации энергии, чем горизонтальные кровельные покрытия. Отражённый от соседних зданий и снежного покрова солнечный свет дополнительно увеличивает количество излучения, поступающего на фотоэлектрические модули [2]. Расширение функций фасада требует разработки технологий монтажа конструкций, которые обеспечивают теплозащиту здания и одновременно вырабатывают электроэнергию.

Согласно классификации Международного энергетического агентства, системы интегрированной фотоэлектрики (BIPV) принципиально отличаются от

навесных аналогов (BAPV) [3], [4]. Если последние присоединяются к готовым конструкциям, то модули BIPV изначально проектируются как строительные изделия, заменяющие традиционные фасадные материалы [5]. Двойное назначение модулей определяет особенности их монтажа. С одной стороны, система должна обеспечивать требуемые теплофизические и эксплуатационные характеристики ограждающей конструкции, включая организацию вентилируемой полости для отвода влаги и тепла [6]. С другой стороны, она выступает элементом электроустановки, что требует прокладки силовых и информационных кабелей, размещения коммутационных коробок и блоков непосредственно внутри ограниченного пространства фасадного экрана [7], [8].

Основная сложность заключается в необходимости одновременно соблюдать строительные и электротехнические требования. Нормативно-техническая база, регламентирующая применение подобных систем, фрагментирована и не учитывает комплексного поведения конструкции в реальных условиях. Действующие стандарты, такие как IEC 61730 или EN 13501-1, оценивают изолированные параметры: малую воспламеняемость при локальном воздействии пламени, электрическую безопасность или механическую прочность отдельных элементов. Однако они не регламентируют технологию монтажа системы в сборе [9-11]. Отсутствие утвержденных технологических карт, описывающих последовательность операций по установке модулей, формированию узлов примыканий, организации воздушных зазоров и скрытой прокладке коммуникаций, приводит к тому, что на стройплощадке собираются сложные многослойные конструкции, поведение которых при критических воздействиях заранее не прогнозировалось.

Особенно уязвимым элементом в таких системах выступает вентилируемая полость. Наличие горючих полимерных компонентов в структуре самих модулей (защитные пленки, герметики, изоляция кабелей) в сочетании с эффектом тяги, возникающим в воздушном зазоре, создает условия для скрытого и быстрораспространяющегося горения [12]. Практика показывает, что

стандартные противопожарные рассечки и барьеры могут оказаться неэффективными, если термическое воздействие приводит к деформации или выпадению несущих элементов фасадной облицовки, таких как стеклянные панели, закрепленные на полимерных клеевых составах. При разрушении фасадного экрана противопожарные преграды утрачивают эффективность, и пламя может распространяться в смежные секции [13], [14].

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью комплексного учёта строительно-технологических, электротехнических и противопожарных требований при монтаже вентилируемых фасадов с интегрированными фотоэлектрическими модулями. Особенности многослойной конструкции, наличие электрических соединений и вентилируемой полости обусловливают дополнительные требования к последовательности монтажных операций и производственному контролю. Цель работы заключается в анализе технологической организации монтажа фасадной системы с BIPV-модулями, определении наиболее уязвимых операций и оценке возможностей контроля механической целостности и эксплуатационной безопасности конструктивных элементов.

Степень разработанности проблемы исследования. Современные научные исследования фасадных систем с интегрированными фотоэлектрическими модулями охватывают вопросы преобразования солнечной энергии, теплового взаимодействия модулей с ограждающими конструкциями, надёжности механических соединений и обеспечения пожарной безопасности. Развитие технологии BIPV предполагает переход от оценки отдельных электротехнических компонентов к анализу эксплуатационных характеристик системы в сборе [15-17]. Существенное значение имеют исследования влияния геометрии фасада, ориентации модулей и отражённого солнечного излучения на эффективность работы фотоэлектрических элементов [18, 19].

Отдельное направление научных работ связано с изучением пожарных воздействий на многослойные фасадные системы. Результаты соответствующих

исследований свидетельствуют о необходимости учитывать взаимное расположение облицовочных панелей, воздушного зазора, несущей подсистемы, кабельных коммуникаций и противопожарных элементов [17, 20]. При этом механическая целостность креплений и сохранность геометрии фасадного экрана могут существенно влиять на развитие повреждений в условиях температурных воздействий. Несмотря на наличие исследований отдельных компонентов, вопросы взаимосвязи технологии монтажа, образования скрытых дефектов фотоэлектрических модулей и последовательности их производственного контроля требуют дальнейшей систематизации. Это определяет целесообразность комплексного анализа монтажных операций и методов обеспечения качества фасадной конструкции на этапах её возведения.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступил процесс возведения наружной стены административного здания класса функциональной пожарной опасности Ф4 в климатическом районе II (г. Санкт-Петербург). Проектная документация предусматривала устройство вентилируемого фасада площадью 1200 м² с интеграцией фотоэлектрических модулей BIPV.

Конструктивный узел фасадной системы включает несущую стену из железобетона, слой теплоизоляции из базальтовых минераловатных плит плотностью 80 кг/м³, ветрозащитную мембрану, воздушный зазор глубиной 65 мм и наружный экран из стеклополимерных модулей BIPV. Модули имеют алюминиевую раму, стеклянную лицевую поверхность и полимерную заднюю стенку. Крепление осуществляется к вертикальным алюминиевым направляющим, которые, в свою очередь, фиксируются к несущей стене посредством стальных кронштейнов с терморазрывными прокладками. Вентилируемая полость пересекается горизонтальными противопожарными рассечками из интумесцентных материалов. Кабельные трассы постоянного тока прокладываются в пространстве за модулями в гофрированных рукавах с индексом огнестойкости не ниже EI60, что соответствует требованиям для

скрытой электропроводки в горючих средах.

Для отработки технологических решений и сбора эмпирических данных на строительной площадке был возведен натурный макет площадью 12 м², имитирующий фрагмент фасада с оконным проемом. Методология исследования включала хронометраж монтажных операций, инструментальный контроль усилий затяжки резьбовых соединений, электролюминесцентную диагностику фотоэлементов до и после монтажа, а также теплотехническое моделирование в среде EnergyPlus для оценки влияния глубины вентзазора на температурный режим модулей.

Результаты исследования. Процесс монтажа BIPV-фасада был разделён на основные операции. Для оценки разработанной технологии трудозатраты на монтаж BIPV-фасада сопоставлены с трудозатратами на устройство навесного вентилируемого фасада (НВФ) с облицовкой из керамогранита аналогичной массы (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительная оценка трудоёмкости монтажа фасадных систем (на 1 м²)

Наименование операции	НВФ (керамогранит), нормо-час	BIPV-фасад, нормо-час	Примечание к технологическим особенностям BIPV
Разметка осей и установка кронштейнов	0,45	0,45	Идентично, требуется повышенная точность разметки
Монтаж направляющих и теплоизоляции	0,60	0,65	Требуется аккуратная обшивка кронштейнов мембраной
Прокладка кабельных трасс и коммутация	0,00	0,85	Специфическая операция: укладка DC-кабелей, монтаж коннекторов MC4
Установка облицовочных модулей	0,75	1,20	Требуются точная подгонка зазоров и выполнение скрытых электрических соединений
Герметизация швов и противопожарные рассечки	0,30	0,55	Установка интумесцентных лент, монтаж алюминиевых профилей
Электрическая проверка и пусконаладка	0,00	0,40	Прозвонка цепей, замер холостого хода
Итого	2,10	4,10	Трудоёмкость BIPV выше в 1,95 раза

Источник: разработано автором.

Данные, представленные в таблице 1, свидетельствуют о том, что

интеграция фотоэлектрики практически удваивает трудозатраты на квадратный метр. Основной прирост трудозатрат связан с прокладкой кабельных трасс и точной установкой модулей: даже небольшое отклонение может сделать невозможной стыковку соседних элементов.

Для минимизации скрытых дефектов была внедрена двухэтапная система контроля качества. Входной контроль осуществлялся методом электролюминесценции (ЭЛ) на земле до подъема модулей на высоту. Приёмочный контроль проводился повторно после завершения монтажа ряда (таблица 2).

Таблица 2 - Матрица контроля качества и типичные дефекты при монтаже BIPV

Контролируемый параметр	Метод и инструмент контроля	Критерии приёмки / Допуски	Выявляемые дефекты
Целостность кремниевых ячеек	Электролюминесцентная съёмка (до и после монтажа)	Отсутствие микротрещин, разрывов шин	Микротрещины ячеек из-за перекоса рамы при затяжке
Усилие затяжки анкеров и болтов	Динамометрический ключ	Согласно расчету, ± 5% от проектного	Недотяг (риск ветрового отрыва), перетяг (деформация профиля)
Геометрия плоскости и зазоры	Лазерный нивелир, щуп	Отклонение плоскостности ≤ 2 мм/2м; зазор 20±2 мм	Неравномерные зазоры, «волна» на фасаде
Герметичность и целостность кабелей	Визуальный осмотр, мегаомметр	Отсутствие перегибов, сопротивление изоляции > 50 МОм	Повреждение изоляции при прокладке кабелей, нарушение контакта в разъёмах MC4

Источник: разработано автором.

Натурный макет позволил выявить критическую уязвимость: при монтаже 4,2% модулей электролюминесцентная съёмка после установки зафиксировала появление микротрещин, отсутствовавших при входном контроле. Анализ показал, что дефекты возникали из-за неравномерной затяжки крепёжных болтов алюминиевой рамы, вызывавшей механические напряжения в стекле и кремниевой пластине. Это потребовало включить в технологическую карту

требование применять динамометрические ключи и затягивать крепёж в перекрёстной последовательности.

Вопросы пожарной и электрической безопасности решались не универсальными запретами, а привязкой к классу конструктивной пожарной опасности здания. С учётом результатов крупномасштабных испытаний, показавших неэффективность стандартных барьеров при выпадении стёкол, для предотвращения распространения огня по вентилируемой полости в узлах примыкания к оконным откосам и между этажами применены комбинированные рассечки. Они включают не только интумесцентный материал, но и механический стальной лист, предотвращающий выпадение горящих фрагментов. На стороне постоянного тока (до 1000 В) в распределительных коробках установлены устройства защиты от дугового пробоя (AFCI), что критически важно для предотвращения возгорания при нарушении контакта в разъемах MC4.

Обсуждение результатов исследования. Анализ трудозатрат подтверждает, что главная сложность монтажа BIPV заключается не в самом креплении модулей, а в организации скрытых инженерных коммуникаций и обеспечении геометрической точности. Если при монтаже керамогранита отклонения на 3–4 мм можно компенсировать шириной межплиточного шва, то при установке BIPV-модулей с жёсткими рамами необходимо выдерживать проектный зазор 20 мм. Превышение этого значения ухудшает условия движения воздуха в вентиляционном зазоре и внешний вид фасада, а уменьшение повышает риск контакта стеклянных панелей при тепловом расширении.

Результаты теплотехнического моделирования в среде EnergyPlus позволили оптимизировать глубину воздушного зазора. С одной стороны, увеличение зазора улучшает конвективный теплоотвод от тыльной стороны модулей, снижая их рабочую температуру и повышая КПД фотоэлементов. С другой стороны, это увеличивает ветровую нагрузку на подсистему и усложняет

узлы примыканий (таблица 3).

Таблица 3 - Влияние глубины вентилируемого зазора на энергоэффективность BIPV-системы (результаты моделирования EnergyPlus)

Глубина вентзазора, мм	Средняя температура тыльной стороны модуля летом, °C	Расчетная годовая выработка электроэнергии, кВт·ч/м²	Увеличение ветровой нагрузки на подсистему, %
40	68,4	112,5	Базовая
65 (проектная)	59,2	118,3	+ 14%
100	54,1	121,0	+ 28%
150	51,5	122,4	+ 45%

Источник: разработано автором.

Согласно таблице 3, увеличение зазора с 65 до 100 мм повышает выработку электроэнергии примерно на 2,3%, но требует существенного увеличения металлоёмкости несущей подсистемы для восприятия ветровой нагрузки. Глубина 65 мм, заложенная в проекте, была признана оптимальной, обеспечивая баланс между электрической эффективностью, строительной стоимостью и пожарной безопасностью (достаточное пространство для срабатывания интумесцентных рассечек).

Важным аспектом, выявленным при обсуждении результатов, стала необходимость защиты персонала при эксплуатации. Фотоэлектрические модули находятся под напряжением постоянного тока при любом освещении. Технологическая карта была дополнена разделом по обслуживанию, предусматривающим использование специализированных изолированных инструментов и обязательное отключение стрингов на уровне инверторов с применением блокировок, исключающих случайную подачу напряжения.

Выводы. Полученные в ходе исследования данные убедительно доказывают, что существующая нормативная база, опирающаяся преимущественно на лабораторные испытания отдельных компонентов, не в полной мере отражает реальное поведение фасадных систем с интегрированной фотоэлектрикой в экстремальных условиях. Переход от пассивных ограждающих конструкций к активным энергогенерирующим оболочкам требует фундаментального пересмотра подходов к стандартизации. При

развитии нормативной документации основное внимание следует уделять оценке пожарной и конструктивной безопасности фасадной системы в целом, а не только сертификации отдельных компонентов, поскольку взаимодействие разных материалов в вентилируемой полости определяет характер развития аварийных ситуаций.

В части разработки технологических карт и проектов производства работ первостепенное значение приобретает детализация монтажных операций, обеспечивающая сохранность хрупких элементов и герметичность инженерных коммуникаций. Типовые решения должны в обязательном порядке включать регламенты использования динамометрического инструмента при фиксации крепежных узлов, что позволит исключить возникновение внутренних напряжений в стекле и кремниевых пластинах. Особое внимание в производственной документации необходимо уделить трассировке кабелей постоянного тока внутри воздушного зазора. Маршруты прокладки и точки крепления кабелей необходимо определять с учётом расположения элементов подсистемы так, чтобы исключить контакт кабелей с острыми кромками алюминиевых профилей и их провисание, способное привести к короткому замыканию или образованию электрической дуги.

Анализ результатов крупномасштабных огневых испытаний диктует необходимость внесения существенных корректировок в действующие своды правил, регламентирующие устройство навесных фасадных систем. Выявленный факт обхода противопожарных рассечек вследствие оплавления полимерных компонентов и выпадения стеклянных панелей указывает на недостаточность применения исключительно интумесцентных материалов. Нормативные документы должны предписывать использование комбинированных узлов сопряжения, где вспучивающиеся ленты дополняются механическими стальными экранами, способными удержать раскаленные фрагменты облицовки и предотвратить проникновение пламени в смежные секции вентилируемой полости. Кроме того, требуется законодательное

закрепление обязанности проведения полномасштабных огневых тестов для любых новых конфигураций BIPV-фасадов перед их допуском на строительную площадку.

Не менее критичным аспектом для включения в строительные нормы является регулирование устойчивости облицовки к термическому шоку и предотвращение падения крупногабаритных фрагментов. Обрушение стеклянных панелей массой до десяти килограммов создает прямую угрозу как для лиц, находящихся на прилегающей территории, так и для подразделений пожарной охраны. Свод правил должен содержать расчетные методики и конструктивные требования к дублирующим системам удержания стекла, которые сработают даже при потере несущей способности первичного клеевого шва или деформации алюминиевой рамы. Параллельно с этим, электротехнические разделы нормативной базы необходимо дополнить требованиями по обязательному применению устройств защиты от дугового пробоя в распределительных цепях фасадных систем, а также регламентировать классы огнестойкости гофрированных рукавов и кабельных каналов, прокладываемых в горючей среде вентилируемого зазора.

Формирование комплексной нормативно-технической базы, объединяющей требования строительной механики, теплотехники и пожарной безопасности, станет основой для безопасной масштабной интеграции фотоэлектрических модулей в архитектурную среду. Согласование производственных инструкций, описывающих этапы монтажа, с требованиями сводов правил позволит снизить риск скрытых дефектов и неконтролируемого распространения огня. Дальнейшие исследования в области технологии строительства следует направить на поиск новых термостойких полимерных составов для тыльной стороны модулей и разработку крепёжных узлов, обеспечивающих сохранение формы фасадного экрана при экстремальном тепловом воздействии.

Список литературы

1. Николаева И. О. Особенности интеграции фотоэлектрических установок в архитектуру зданий (на примере научно-производственных комплексов) // Архитектура и современные информационные технологии. — 2023. — № 2 (63). — С. 115–129. — DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-115-129.

2. Assoa Y. B., Valencia-Caballero D., Rico E., Del Caño T., Furtado J. V. Performance of a Large Size Photovoltaic Module for Façade Integration // Renewable Energy. — 2023. — Vol. 211. — P. 903–917. — DOI: 10.1016/j.renene.2023.04.087.

3. Лачинов М. А., Мотяев М. А., Королев П. Е. Фасадная система с облицовочными панелями из фотоэлектрических модулей : патент RU 2803030 C2, Российская Федерация. — Опубликован 05.09.2023.

4. Stølen R., Li T., Wingdahl T., Steen-Hansen A. Large- and Small-Scale Fire Test of a Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Façade System // Fire Safety Journal. — 2024. — Vol. 144. — Art. 104083. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.104083.

5. Шуршилин Е. А., Олехнович Я. А. Влияние отказа работы облицовочных панелей на теплотехнические свойства навесных вентилируемых фасадных конструкций // Строительство и техногенная безопасность. — 2024. — № 32. — С. 55–62. — DOI: 10.29039/2413-1873-2024-32-55-62.

6. Pelle M., Gubert M., Dalla Maria E., Astigarraga A., Avesani S., Maturi L. Experimental Evaluation of the Temperature Related Behaviour of Pigment Based Coloured BIPV Modules Integrated in a Ventilated Façade // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 323. — Art. 114763. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114763.

7. Babin M., Andersen N. L., Thorning J. K., Thorsteinsson S. Yield Analysis of a BIPV Façade Prototype Installation // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 322. — Art. 114730. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114730.

8. Belloni E., Bianchini G., Casini M., Faba A., Intravaia M., Laudani A., Lozito G. M. An Overview on Building-Integrated Photovoltaics: Technological Solutions, Modeling, and Control // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 324. — Art. 114867. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114867.

9. Chen X., Luo C., Ji J., Liu L., Su X., Yu Y., Zhang H., Peng R. Experimental Investigation of Photoelectrical Performance and Thermal Characteristics of Ventilated Building-Integrated Photovoltaic System Utilizing Lightweight and Flexible Crystalline Silicon Module // Journal of Cleaner Production. — 2024. — Vol. 460. — Art. 142612. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142612.

10. Тарануха Н. Л., Ананин К. Ю., Новиков М. Ю., Канаков И. Д. Развитие домостроения с учетом энергосберегающих технологий – применения гибридных систем энергоэффективности // Градостроительство и архитектура. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 72–82. — DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.10.

11. Albinius N., Rau B., Riedel M., Ulbrich C. A Comprehensive Case Study of a Full-Size BIPV Facade // Energies. — 2025. — Vol. 18, No. 5. — Art. 1293. — DOI: 10.3390/en18051293.

12. Ma X., Yang R. J., Bao D. W. Advancing Building-Integrated Photovoltaics: Solution for Facade Installation Challenges // International Journal of Construction Management. — 2025. — Опубликовано онлайн 17 декабря 2025 г. — DOI: 10.1080/15623599.2025.2595510.

13. Cuce P. M., Cuce E. Ventilated Facades for Low-Carbon Buildings: A Review // Processes. — 2025. — Vol. 13, No. 7. — Art. 2275. — DOI: 10.3390/pr13072275.

14. Pizzatto S. M. dos S. et al. Ventilated Facade System: A Review // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. — 2025. — Vol. 64, No. 3. — Art. 100443. — DOI: 10.1016/j.bsecv.2025.100443.

15. Ruan D., Fan C., Hu M., Li Y., Guan J. Building-Integrated Photovoltaics Through Multi-Physics Synergies: A Critical Review of Optical, Thermal, and Electrical Models in Facade Applications // Renewable Energy. — 2025. — Vol. 251. — Art. 123332. — DOI: 10.1016/j.renene.2025.123332.

16. Corti P., Follo A., Bonomo P. Workflow to Support Cost-Benefits Comparison and Sensitivity Analysis of BIPV Case Studies: Three Examples of BIPV Facades in the South of Switzerland // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 322. — Art. 114732. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114732.

17. Borja Block A., Escarre Palou J., Courtant M. et al. Colouring Solutions for Building Integrated Photovoltaic Modules: A Review // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 314. — Art. 114253. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114253.

18. Xu S., Wang X., Song Z., Tang Y., Ji J. Design, Experimental Testing, and Numerical Investigation of a Ventilated Semi-Transparent Photovoltaic Facade Integrated with Supply-Air Conditioning in Summer // Renewable Energy. — 2026. — Vol. 263. — Art. 125415. — DOI: 10.1016/j.renene.2026.125415.

19. Сабитов Л. С., Волков М. Ю. Оптимизация взаимодействия участников строительного проекта при устройстве навесных фасадных систем // Строительное производство. — 2025. — № 4. — Art. CP0009. — DOI: 10.29039/2658-5340-2025-4-CP0009.

20. Stankiuvienė A., Šukys R. Fire Performance of Ventilated Rendered Facades with EPS Insulation: Full-Scale DIN-Type Evaluation and Influence of Cavities on Flame Spread // Fire. — 2026. — Vol. 9, No. 3. — Art. 113. — DOI: 10.3390/fire9030113

References

1. Nikolaeva I. O. Osobennosti integracii fotoe`lektricheskix ustanovok v arxitekturu zdanij (na primere nauchno-proizvodstvenny`x kompleksov) // Arxitektura i sovremenny`e informacionny`e texnologii. — 2023. — № 2 (63). — S. 115–129. — DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-115-129.

2. Assoa Y. B., Valencia-Caballero D., Rico E., Del Caño T., Furtado J. V. Performance of a Large Size Photovoltaic Module for Façade Integration // Renewable Energy. — 2023. — Vol. 211. — P. 903–917. — DOI: 10.1016/j.renene.2023.04.087.

3. Lachinov M. A., Motyaev M. A., Korolev P. E. Fasadnaya sistema s obliczovochny`mi panelyami iz fotoe`lektricheskix modulej : patent RU 2803030 C2, Rossijskaya Federaciya. — Opublikovan 05.09.2023.

4. Stølen R., Li T., Wingdahl T., Steen-Hansen A. Large- and Small-Scale Fire Test of a Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Façade System // Fire Safety Journal. — 2024. — Vol. 144. — Art. 104083. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.104083.

5. Shurshilin E. A., Olexnovich Ya. A. Vliyanie otkaza raboty` obliczovochny`x

panelej na teplotexnicheskie svojstva navesny`x ventiliruemy`x fasadny`x konstrukcij // Stroitel`stvo i texnogennaya bezopasnost`. — 2024. — № 32. — S. 55–62. — DOI: 10.29039/2413-1873-2024-32-55-62.

6. Pelle M., Gubert M., Dalla Maria E., Astigarraga A., Avesani S., Maturi L. Experimental Evaluation of the Temperature Related Behaviour of Pigment Based Coloured BIPV Modules Integrated in a Ventilated Façade // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 323. — Art. 114763. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114763.

7. Babin M., Andersen N. L., Thorning J. K., Thorsteinsson S. Yield Analysis of a BIPV Façade Prototype Installation // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 322. — Art. 114730. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114730.

8. Belloni E., Bianchini G., Casini M., Faba A., Intravaia M., Laudani A., Lozito G. M. An Overview on Building-Integrated Photovoltaics: Technological Solutions, Modeling, and Control // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 324. — Art. 114867. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114867.

9. Chen X., Luo C., Ji J., Liu L., Su X., Yu Y., Zhang H., Peng R. Experimental Investigation of Photoelectrical Performance and Thermal Characteristics of Ventilated Building-Integrated Photovoltaic System Utilizing Lightweight and Flexible Crystalline Silicon Module // Journal of Cleaner Production. — 2024. — Vol. 460. — Art. 142612. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142612.

10. Taranuxa N. L., Ananin K. Yu., Novikov M. Yu., Kanakov I. D. Razvitie domostroeniya s uchetom e`nergosberegayushhix texnologij – primeneniya gibridny`x sistem e`nergoe`ffektivnosti // Gradostroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — T. 15, № 3. — S. 72–82. — DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.10.

11. Albinius N., Rau B., Riedel M., Ulbrich C. A Comprehensive Case Study of a Full-Size BIPV Facade // Energies. — 2025. — Vol. 18, No. 5. — Art. 1293. — DOI: 10.3390/en18051293.

12. Ma X., Yang R. J., Bao D. W. Advancing Building-Integrated Photovoltaics: Solution for Facade Installation Challenges // International Journal of Construction Management. — 2025. — Опубликовано онлайн 17 декабря 2025 г. — DOI:

10.1080/15623599.2025.2595510.

13. Cuce P. M., Cuce E. Ventilated Facades for Low-Carbon Buildings: A Review // Processes. — 2025. — Vol. 13, No. 7. — Art. 2275. — DOI: 10.3390/pr13072275.

14. Pizzatto S. M. dos S. et al. Ventilated Facade System: A Review // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. — 2025. — Vol. 64, No. 3. — Art. 100443. — DOI: 10.1016/j.bsecv.2025.100443.

15. Ruan D., Fan C., Hu M., Li Y., Guan J. Building-Integrated Photovoltaics Through Multi-Physics Synergies: A Critical Review of Optical, Thermal, and Electrical Models in Facade Applications // Renewable Energy. — 2025. — Vol. 251. — Art. 123332. — DOI: 10.1016/j.renene.2025.123332.

16. Corti P., Follo A., Bonomo P. Workflow to Support Cost-Benefits Comparison and Sensitivity Analysis of BIPV Case Studies: Three Examples of BIPV Facades in the South of Switzerland // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 322. — Art. 114732. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114732.

17. Borja Block A., Escarre Palou J., Courtant M. et al. Colouring Solutions for Building Integrated Photovoltaic Modules: A Review // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 314. — Art. 114253. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114253.

18. Xu S., Wang X., Song Z., Tang Y., Ji J. Design, Experimental Testing, and Numerical Investigation of a Ventilated Semi-Transparent Photovoltaic Facade Integrated with Supply-Air Conditioning in Summer // Renewable Energy. — 2026. — Vol. 263. — Art. 125415. — DOI: 10.1016/j.renene.2026.125415.

19. Sabitov L. S., Volkov M. Yu. Optimizaciya vzaimodejstviya uchastnikov stroitel`nogo proekta pri ustrojstve navesny`x fasadny`x sistem // Stroitel`noe proizvodstvo. — 2025. — № 4. — Art. CP0009. — DOI: 10.29039/2658-5340-2025-4-CP0009.

20. Stankiuvienė A., Šukys R. Fire Performance of Ventilated Rendered Facades with EPS Insulation: Full-Scale DIN-Type Evaluation and Influence of Cavities on Flame Spread // Fire. — 2026. — Vol. 9, No. 3. — Art. 113. — DOI: 10.3390/fire9030113

Статья поступила в редакцию 27.05.2026; одобрена после рецензирования 06.07.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 27.05.2026; approved after peer review 06.07.2026; accepted for publication 08.10.2026.

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

Научная статья

УДК 72.025:624.074.4

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПЛОТНОСТИ УСИЛИЙ И ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОИСКА

Бакиров Ренат Толгатович, кандидат технических наук, ведущий инженер, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Россия, Казань, bakirov.kzn@mail.ru;

Капитонов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, Москва, kapitonovmv@yandex.ru

Аннотация. Проектирование легких мембранных покрытий традиционно сталкивается с противоречием между требованиями структурной механики и задачами создания выразительного архитектурного образа. В работе предложен гибридный вычислительный метод формообразования, объединяющий линейный метод плотности усилий (FDM) и алгоритм недоминированной сортировки NSGA-II. В отличие от классических подходов, при которых геометрия определяется заданными плотностями усилий, предложенный метод использует FDM для обеспечения статического равновесия во внутреннем вычислительном контуре, а эволюционный алгоритм — для оптимизации граничных условий и топологии опор во внешнем контуре. Архитектурные характеристики — визуальная проницаемость, нормированный объем под оболочкой и распределение гауссовой кривизны — представлены в виде измеримых показателей, что позволяет анализировать их без субъективной экспертной оценки. Апробация метода на примере покрытия транспортного хаба продемонстрировала формирование фронта Парето, отражающего компромисс между минимальным натяжением мембраны и коэффициентом обзора

небосвода. Сравнение с ручным параметрическим моделированием и классическим FDM показало, что гибридный алгоритм сокращает время поиска допустимых решений и предотвращает образование плоских, неэффективных участков покрытия. Результаты исследования показывают, что предложенный метод позволяет воспроизводимо искать формы по нескольким критериям на концептуальной стадии и изменять геометрию легких конструкций с учетом условий статического равновесия.

Ключевые слова: мембранные конструкции; формообразование; метод плотности усилий; эволюционная оптимизация; многокритериальный поиск; параметрическое моделирование; легкие покрытия; вычислительное проектирование.

Original article

SHAPING OF MEMBRANE COATINGS BASED ON THE METHOD OF EFFORT DENSITY AND EVOLUTIONARY SEARCH

Bakirov Renat Tolgatovich, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer, D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan, Russia, bakirov.kzn@mail.ru;

Kapitonov Mikhail Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, kapitonovmv@yandex.ru

Abstract. The design of lightweight membrane roofs traditionally faces a conflict between the requirements of structural mechanics and the goal of creating an expressive architectural image. This paper proposes a hybrid computational method for form generation that combines the linear force density method (FDM) and the NSGA-II non-dominated sorting algorithm. Unlike classical approaches, where geometry is rigidly determined by specified force densities, the developed scheme uses FDM in the inner loop to guarantee static equilibrium, while an evolutionary algorithm in the outer loop optimizes boundary conditions and support topology. Architectural characteristics such as visual permeability, normalized volume under the shell, and Gaussian

curvature distribution are translated into rigorous mathematical proxy indicators, allowing their evaluation without subjective expert assessments. Testing the method on a transport hub roof demonstrated the formation of a Pareto frontier, reflecting a tradeoff between minimum membrane tension and the sky view factor. A comparison with manual parametric modeling and classical FDM showed that the hybrid algorithm reduces the time it takes to find valid solutions and eliminates the formation of flat, ineffective zones. The study's results confirm that the proposed toolkit enables reproducible multi-criteria form search at the conceptual stage, expanding the architect's ability to manage the plasticity of lightweight structures without compromising their physical nature.

Keywords: membrane structures; shaping; force density method; evolutionary optimization; multi-criteria search; parametric modeling; lightweight coatings; computational design.

Введение. В современной архитектурной практике проектирование легких покрытий неразрывно связано с поиском равновесных форм. Мембранные системы и вантовые сети работают преимущественно на осевые усилия, благодаря чему удается перекрывать обширные пространства при минимальной материалоемкости. Базовый принцип таких структур заключается в том, что их геометрия напрямую зависит от распределения внутренних сил [1], [2]. Эта физическая предопределенность формирует главную творческую дилемму. Проектировщик стремится создать выразительную пространственную форму, однако ее геометрия должна соответствовать условиям статического равновесия, что ограничивает возможности изменения формы по эстетическим соображениям.

Для поиска начальных равновесных состояний инженеры традиционно применяют метод плотности усилий [3] и метод динамической релаксации [4]. Эти подходы отлично решают прямую задачу: находят геометрию, при которой система находится в равновесии под действием заданных нагрузок. Метод

плотности усилий, в частности, линеаризует нелинейные уравнения равновесия, переводя задачу в удобную матричную форму [5], [6]. Тем не менее, оба метода работают в рамках прямого формообразования. Архитектор задает топологию и плотности усилий, а расчетный алгоритм выдает единственно возможную в этих условиях форму. На практике геометрия, оптимальная с конструктивной точки зрения, может оказаться однообразной или не соответствовать конкретным градостроительным и эстетическим требованиям.

Попытки адаптировать расчетные модели под конкретный архитектурный замысел обычно сводятся к введению дополнительных геометрических ограничений. В классических работах по методу плотности усилий для этого применяют координатные привязки, фиксируя положение отдельных узлов для достижения нужного силуэта, а затем итерационно пересчитывают ненапряженные длины элементов [7-9]. В более современных исследованиях используют дифференцируемые версии метода (DFDM), применяя градиентную оптимизацию для поиска форм, близких к заданному целевому контуру [10], [11]. Однако на практике эти подходы сталкиваются с серьезными барьерами. Жесткая привязка координат часто делает систему переопределенной и вычислительно затратной. Градиентные методы требуют непрерывной дифференцируемости целевой функции, что затрудняет учет дискретных и многокритериальных архитектурных требований, включая заданные углы наклона, сложное зонирование пространства и нестандартные условия опирания.

Преодолеть разрыв между структурной логикой и архитектурной выразительностью позволяет переход к гибридным вычислительным схемам. В данной работе предлагается новый подход к формообразованию мембранных покрытий, объединяющий классический метод плотности усилий и эволюционную оптимизацию. Эволюционные алгоритмы не требуют вычисления градиентов и способны эффективно работать в пространствах с высокой размерностью, где целевые критерии носят противоречивый характер. Архитектор может задать комплексную систему требований: габаритные

ограничения, требования к кривизне, условия сопряжения с опорным контуром и пропорциональные соотношения. На каждом шаге эволюционного поиска метод плотности усилий обеспечивает соответствие рассматриваемой геометрии условиям статического равновесия [12].

Суть предлагаемого метода состоит в создании вычислительного инструмента, который возвращает архитектору контроль над геометрией легкой конструкции, не нарушая ее физическую природу. Исследование направлено на разработку и адаптацию гибридного алгоритма, способного генерировать мембранные формы, удовлетворяющие одновременно критериям механической эффективности и архитектурной пластичности. Это позволяет учитывать архитектурный замысел при поиске равновесной геометрии и создавать покрытия, отвечающие как конструктивным, так и эстетическим требованиям [13].

Обзор литературы. Проектирование легких мембранных и вантовых конструкций связывает архитектурное формообразование с законами строительной механики. Поскольку несущая способность таких систем обеспечивается преимущественно за счет осевых усилий, их геометрия не может быть задана произвольно, а должна находиться в состоянии статического равновесия. Исторически поиск начальных равновесных форм опирался на физическое моделирование, где архитекторы создавали мыльные пленки или подвесные макеты, фиксируя их форму посредством фотограмметрии. Переход к вычислительным методам ознаменовался разработкой метода динамической релаксации, который позволял моделировать поведение нелинейных систем путем пошагового интегрирования уравнений движения до достижения состояния покоя. Несмотря на физическую интуитивность, этот подход требует значительных вычислительных затрат и плохо масштабируется при решении обратных задач проектирования [14-16].

Альтернативный путь предложил метод плотности усилий (FDM), линеаризующий нелинейные уравнения равновесия за счет введения отношения

осевого усилия к длине элемента. Данный метод стал стандартом для быстрого поиска равновесных форм при заданной топологии и граничных условиях. Однако классический FDM решает лишь прямую задачу: он генерирует геометрию на основе априорно заданных параметров, оставляя архитектора в ситуации, когда структурно оптимальная форма может оказаться эстетически или функционально неприемлемой [17]. Попытки адаптировать метод под конкретные архитектурные замыслы приводили к созданию расширенных версий FDM с геометрическими ограничениями, где координаты отдельных узлов жестко привязывались к заданным значениям, а ненапряженные длины элементов пересчитывались итерационно.

Современные исследования, в частности работы по дифференцируемому методу плотности усилий (DFDM), демонстрируют успехи в использовании градиентной оптимизации для поиска форм, близких к целевым контурам [18], [19]. Тем не менее, градиентные методы сталкиваются с фундаментальным барьером при работе со сложными архитектурными критериями. Такие параметры, как визуальная проницаемость, субъективное восприятие объема или распределение светотеневых эффектов, часто оказываются недифференцируемыми или разрывными функциями. Поэтому методы, не требующие вычисления градиентов, в том числе эволюционные алгоритмы, позволяют более гибко искать решения с учетом архитектурных требований. В существующих гибридных подходах генетический алгоритм нередко сочетается с конечно-элементным анализом, что требует многократного решения нелинейных задач и существенно увеличивает время расчета. Таким образом, актуальной научной задачей остается разработка воспроизводимого многокритериального метода, который гарантировал бы статическую состоятельность формы на каждом шаге поиска и позволял бы одновременно оптимизировать граничные условия по недифференцируемым архитектурным прокси-показателям.

Организация и методология исследования. Предлагаемый гибридный

метод включает два вычислительных контура: внутренний, основанный на методе плотности усилий, обеспечивает равновесие базовой поверхности, а внешний, использующий алгоритм NSGA-II, оптимизирует граничные условия и топологию опор по архитектурным и конструктивным критериям. Подобное разделение позволяет избежать вычисления градиентов для сложных пространственных метрик и сохраняет высокую скорость сходимости.

Архитектурные критерии в рамках данного исследования переведены из разряда экспертных деклараций в строгие измеримые прокси-показатели. Визуальная проницаемость покрытия определяется не абстрактной «открытостью», а коэффициентом обзора небосвода (Sky View Factor, SVF), рассчитываемым из центральной точки подкупольного пространства, а также индексом открытости силуэта, представляющим собой отношение видимого небесного контура к общему периметру горизонта. Объем под оболочкой и площадь поверхности нормируются относительно площади пятна застройки и максимальных высотных ограничений площадки, что исключает некорректное сравнение несопоставимых форм. Кривизна оценивается через распределение гауссовой кривизны с введением штрафной функции для зон, где абсолютное значение кривизны стремится к нулю, что предотвращает образование плоских, неэффективных участков.

Конструктивный критерий формулируется как максимизация минимального натяжения в элементах сети для предотвращения провисания и образования складок. Однако одного лишь поиска равновесной формы недостаточно. После завершения работы эволюционного алгоритма и выбора решений из множества Парето, каждый вариант проходит обязательную пост-обработку. Выполняется нелинейный конечно-элементный расчет под действием расчетных сочетаний нагрузок (собственный вес, снеговая, ветровая), в ходе которого проверяются фактические напряжения, перемещения узлов и подтверждается отсутствие потери натяжения в критических узлах.

Прототип метода реализован в среде параметрического моделирования с

использованием визуального программирования и специализированных подключаемых модулей для расчета конструкций и многокритериальной оптимизации. Параметризация модели включает 10 независимых переменных: высоты четырех угловых и четырех промежуточных опор, а также два параметра, контролирующих провисание граничного контура. Сначала случайным образом формируется начальная популяция. Затем на каждом шаге FDM пересчитывает равновесную геометрию, а NSGA-II оценивает полученные формы по заданным критериям и формирует новое поколение.

Результаты проведения исследования и их обсуждение. Метод апробирован на примере проектирования мембранного покрытия транспортного узла размерами в плане 60 × 40 м. В ходе вычислительного эксперимента было сгенерировано множество решений, из которых было отобрано пять наиболее репрезентативных вариантов для детального анализа.

Основным результатом исследования стала диаграмма Парето, отражающая компромисс между визуальной проницаемостью (SVF) и минимальным натяжением мембраны. Как показано на Рисунке 1, решения формируют четкую кривую. Варианты с максимальным SVF (более 0.75) демонстрируют снижение минимального натяжения, что требует применения более жестких граничных элементов или увеличения предварительного напряжения. И наоборот, формы с высоким минимальным натяжением (более 15 кН/м) имеют более замкнутый силуэт и сниженный коэффициент обзора небосвода. Представление результата в виде фронта Парето предоставляет архитектору и конструктору инструментарий для осознанного выбора компромисса.

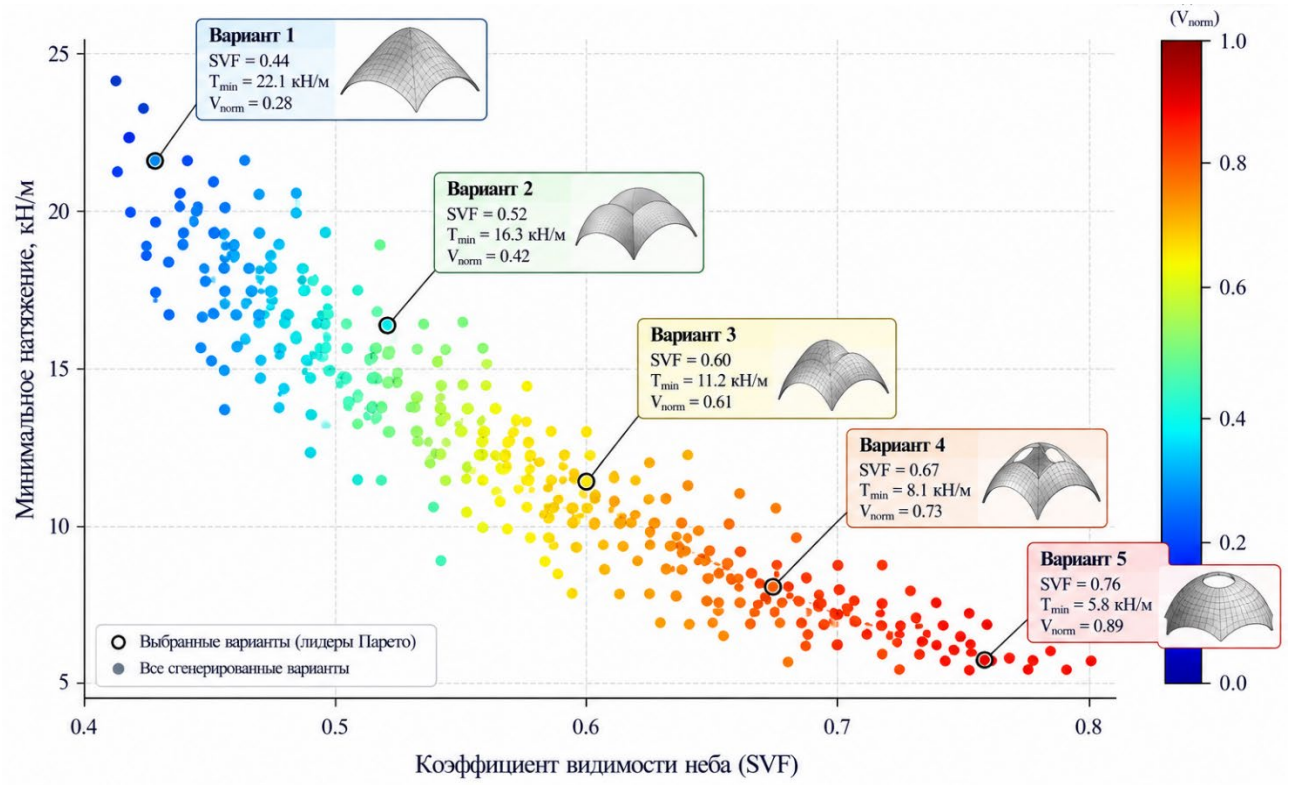


Рисунок 1 - Диаграмма Парето для пространства критериев «визуальная проницаемость — минимальное натяжение» (источник: разработано авторами)

Для оценки эффективности предложенного подхода было проведено сравнение с тремя альтернативными сценариями: ручным параметрическим проектированием (методом проб и ошибок), классическим FDM с фиксированными границами и методом динамической релаксации в связке с генетическим алгоритмом (DR+GA). Результаты сравнения, приведенные в Таблице 1, демонстрируют превосходство гибридного метода.

Таблица 1 - Сравнительная оценка эффективности методов формообразования

Метод формообразования	Время расчета (мин)	Доля валидных решений (%)	Среднее отклонение от фронта Парето	Наличие складок под нагрузкой
Ручное параметрическое	145	12	34.5%	Выявлено в 3 из 5 вариантов
Классический FDM	4	100	41.2% (жесткие границы)	Отсутствуют
DR + Генетический алгоритм	210	68	18.7%	Выявлено в 1 варианте
Предлагаемый гибрид (FDM + NSGA-II)	38	100	0% (базовый метод)	Отсутствуют

Источник: разработано авторами.

Сопоставление результатов расчёта свидетельствует о различиях вычислительной трудоёмкости и результативности рассмотренных методов формообразования мембранных покрытий. Продолжительность расчёта классическим методом плотности усилий (FDM) составила 4 мин, методом динамической релаксации в сочетании с генетическим алгоритмом (DR + GA) - 210 мин, а предлагаемым гибридным методом FDM + NSGA-II — 38 мин. Таким образом, применение гибридного подхода обеспечило сокращение вычислительного времени по сравнению с DR + GA приблизительно в 5,53 раза, или на 81,9 %. При этом доля конструктивно допустимых решений составила 100 % для гибридного алгоритма и 68 % для DR + GA в пределах рассмотренных расчётных условий. Нулевое отклонение гибридного метода от фронта Парето обусловлено использованием сформированного им множества решений в качестве референсного уровня сравнения. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения гибридной процедуры для многокритериального поиска геометрических параметров мембранных покрытий при заданных конструктивных ограничениях.

Архитектурный анализ отобранных пяти вариантов вышел за рамки субъективных оценок. Восприятие формы оценивалось по результатам анализа инсоляции и светотеневого распределения. Варианты с высоким SVF обеспечивали равномерное рассеянное естественное освещение подкупольного пространства, что подтверждалось кумулятивными картами. Распределение гауссовой кривизны в этих вариантах показывало отсутствие плоских зон, что способствовало формированию выразительной светотеневой модели на фасадах. Рисунок 2 демонстрирует, как зоны двойной кривизны концентрируются вдоль главных диагоналей плана, направляя отраженный свет в центральную часть атриума, в то время как периферийные зоны имеют более пологий профиль, обеспечивая визуальную связь с внешней средой.

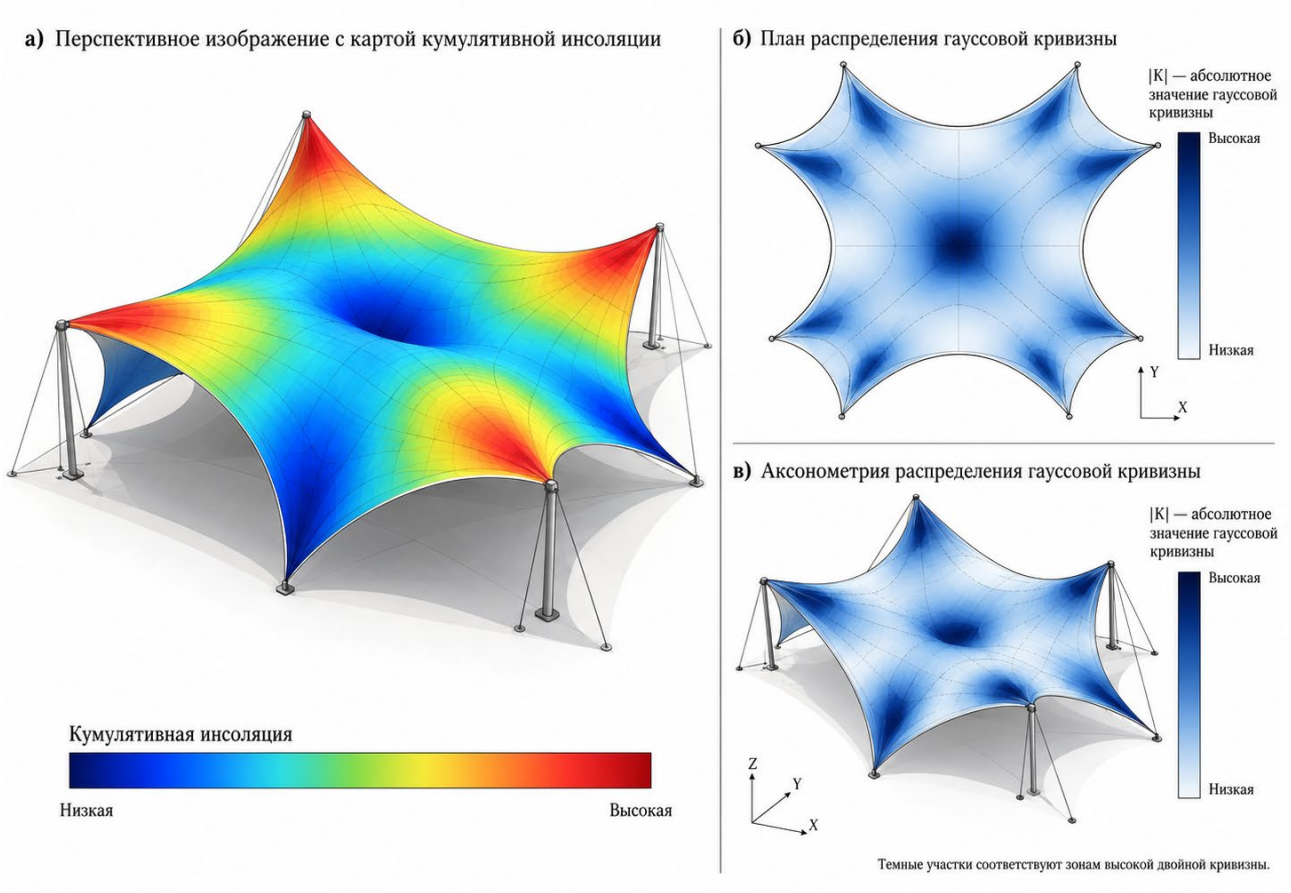


Рисунок 2 - Анализ светотеневой модели и распределения гауссовой кривизны для варианта с максимальным SVF (источник: разработано авторами)

Важнейшим этапом исследования стал анализ чувствительности полученного результата к различным вычислительным параметрам. Необходимо было проверить, зависят ли положение фронта Парето и геометрия полученных форм от настроек алгоритма. Были протестированы различные размеры сетки дискретизации (50×50, 75×75, 100×100 узлов), начальные состояния популяции, а также параметры NSGA-II (размер популяции от 50 до 200, вероятность мутации от 0.01 до 0.1). Результаты, обобщенные в Таблице 2, свидетельствуют о высокой устойчивости метода.

Таблица 2 - Результаты анализа чувствительности к параметрам дискретизации и эволюционного поиска

Параметр варьирования	Диапазон изменения	Влияние на положение фронта Парето	Влияние на топологию формы
Размер сетки FDM	50×50 — 100×100	Смещение менее 2.5%	Незначительное (сохранение общих пропорций)
Размер популяции NSGA-II	50 — 200	Схождение при N > 100	Не влияет при достаточном числе итераций
Вероятность мутации	0.01 — 0.1	Оптимально при 0.05	Избегание локальных минимумов при 0.08
Начальное состояние	Случайное / Детерминированное	Смещение менее 4%	Незначительное

Источник: разработано авторами.

Данные таблицы 2 подтверждают, что увеличение сетки сверх 75×75 узлов не приводит к существенному изменению положения фронта Парето, что позволяет использовать более грубую дискретизацию на ранних этапах эволюционного поиска для ускорения вычислений, с последующим уточнением для финальных вариантов. Устойчивость к выбору начальной популяции свидетельствует о том, что алгоритм не останавливается на локальных оптимумах; популяции из 100 вариантов достаточно для устойчивой сходимости.

Проведенное исследование демонстрирует, что гибридизация метода плотности усилий и эволюционной оптимизации представляет собой полноценный воспроизводимый методологический аппарат для архитектурного формообразования. Формальное разделение задач — обеспечение равновесия через линейный FDM и навигация по недифференцируемым архитектурным критериям через NSGA-II — позволяет преодолеть ограничения классических подходов. Перевод таких понятий, как визуальная проницаемость и пространственная выразительность, на язык строгих математических прокси-показателей (коэффициент обзора небосвода, нормированный объем, гауссова кривизна) обеспечивает объективность архитектурного анализа.

Построение диаграммы Парето вместо поиска единственного решения возвращает архитектору свободу выбора, предоставляя набор структурно

обоснованных вариантов с различными компромиссами между эстетикой и механикой. Обязательная пост-обработка нелинейным конечно-элементным методом гарантирует, что выбранные формы сохраняют свою несущую способность и не теряют натяжения под действием реальных эксплуатационных нагрузок. Анализ чувствительности подтверждает устойчивость предложенного алгоритма к изменению вычислительных параметров. Таким образом, разработанный метод отвечает требованиям современной архитектурной практики, позволяя на ранних стадиях концептуального проектирования генерировать сложные, структурно эффективные и эстетически выразительные формы легких покрытий, опираясь на строгий математический и механический фундамент.

Выводы. Предложенный гибридный подход к формообразованию мембранных покрытий позволяет решить задачу, которой ранее уделялось недостаточно внимания в вычислительном проектировании. Классический метод плотности усилий, восходящий к работам Линквитца и Шека начала 1970-х годов, прекрасно справляется с прямой задачей поиска равновесной геометрии при заданной топологии и граничных условиях. Однако, как показывают исследования Абдул-Наср и Мурада (2015), введение координатных ограничений для корректировки формы неизбежно переводит систему уравнений в нелинейную область и требует итерационного решения методом наименьших квадратов, что сужает пространство доступных архитектурных решений. Дифференцируемая версия метода (DFDM), разработанная Пастраной и соавторами (2026), снимает часть этих ограничений за счёт градиентной оптимизации, но предъявляет жёсткие требования к непрерывности и дифференцируемости целевых функций, что затрудняет работу с такими архитектурными характеристиками, как визуальная проницаемость или светотеневая выразительность силуэта.

Разработанный в настоящей статье алгоритм обходит указанное противоречие за счёт разделения вычислительного процесса на два уровня.

Внутренний контур, основанный на линейной формулировке FDM, на каждом шаге гарантирует статическую состоятельность генерируемой поверхности без необходимости решать нелинейные уравнения равновесия. Внешний контур, реализованный через алгоритм недоминированной сортировки NSGA-II, оперирует набором прокси-показателей, которые не обязаны быть гладкими или аналитически заданными. Именно такая двухуровневая архитектура позволила одновременно учитывать нормированный объём под оболочкой, коэффициент обзора небосвода, распределение гауссовой кривизны и минимальное натяжение мембраны, не прибегая к упрощениям, характерным для градиентных схем.

Практическая ценность метода состоит в том, что результатом работы алгоритма является не единственная «оптимальная» форма, а фронт Парето, отображающий реальные компромиссы между конфликтующими требованиями. Архитектор и конструктор получают набор структурно обоснованных вариантов и могут выбрать из них тот, который лучше отвечает конкретным условиям площадки, функциональной программе и эстетическому замыслу. Нелинейный конечно-элементный расчёт выбранных решений под действием снеговых и ветровых нагрузок подтверждает сохранение натяжения и отсутствие складок в эксплуатационных условиях. Таким образом, оценка формы учитывает не только её геометрию, но и поведение под нагрузкой.

Вместе с тем было бы некорректно утверждать, что предложенный подход лишён недостатков. Наиболее существенное ограничение связано с вычислительной стоимостью расчётов при увеличении числа элементов дискретизации. Линейная природа внутреннего контура FDM обеспечивает быстрое решение системы уравнений для сетей с несколькими сотнями узлов, и в проведённых экспериментах с сеткой 75×75 узлов одно поколение популяции из 100 особей обрабатывалось за приемлемое время. Однако при переходе к мелким сеткам, необходимым для моделирования крупнопролётных покрытий со сложной топологией, время решения линейной системы начинает расти, а многократный вызов FDM внутри эволюционного цикла многократно умножает

эти затраты. Пастрана и соавторы (2026) в своей работе отмечают, что даже для градиентных методов решение разреженных линейных систем становится узким местом при числе свободных узлов свыше 10^4, и хотя разработанные ими аналитические сопряжённые операторы ускоряют обратное распространение в 5–13 раз, сам факт необходимости многократного обращения к решателю остаётся фундаментальным барьером.

Для эволюционных алгоритмов ситуация усугубляется тем, что они не используют информацию о градиенте и, следовательно, требуют значительно большего числа оценок целевой функции для сходимости к фронту Парето. Если градиентный метод DFDM сходится за десятки итераций, то NSGA-II в проведённых экспериментах потребовал нескольких сотен поколений для стабилизации фронта, и каждое поколение включает оценку всей популяции. При мелкой дискретизации с тысячами элементов суммарное время расчёта может достигать значений, несовместимых с интерактивным режимом проектирования, когда архитектору необходим отклик системы в течение секунд или минут.

Возможные пути преодоления этого ограничения видятся в нескольких направлениях. Во-первых, целесообразно использовать адаптивную дискретизацию, при которой эволюционный поиск ведётся на грубой сетке, а уточнение геометрии выполняется только для отобранных решений из фронта Парето. Во-вторых, параллельная оценка вариантов на графических ускорителях может существенно сократить время вычислений, поскольку каждый вариант в поколении оценивается независимо. В-третьих, гибридная стратегия, сочетающая эволюционный поиск на ранних стадиях с градиентной доводкой на поздних, могла бы объединить преимущества обоих подходов: глобальное исследование пространства форм и быструю локальную сходимость. Наконец, замена полного конечно-элементного расчёта суррогатными моделями, обученными на предварительно сгенерированной выборке равновесных форм, представляется перспективным направлением для снижения стоимости каждой

оценки.

Несмотря на указанные ограничения, разработанный метод заполняет заметную нишу в арсенале средств архитектурного формообразования. Он позволяет на концептуальной стадии проектирования генерировать структурно состоятельные мембранные покрытия, одновременно удовлетворяющие множеству архитектурных критериев, и делать это в рамках воспроизводимого вычислительного процесса, а не путём ручного перебора вариантов. Дальнейшее развитие работы будет сосредоточено на масштабировании алгоритма для крупнопролётных систем и на интеграции дополнительных эксплуатационных ограничений, связанных с акустикой, инсоляцией и аэродинамическим поведением оболочки.

Список литературы

1. Чесноков А. В., Михайлов В. В. Методика определения требуемого соотношения мембранных напряжений в тентовой оболочке арочного типа // Известия Юго-Западного государственного университета. — 2024. — Т. 28, № 2. — С. 37–55. — DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-2-37-55.

2. Kabasi S., Marbaniang A. L., Ghosh S. Form-Finding of Tensile Membrane Structures with Strut and Anchorage Supports Using Physics-Informed Machine Learning // Engineering Structures. — 2024. — Vol. 299. — Art. 117093. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117093.

3. Чесноков А. В., Михайлов В. В., Долматов И. В. Оценка равновесной формы мягкой оболочки тентовой конструкции арочного типа в условиях действия внешней нагрузки // Строительная механика и конструкции. — 2024. — Вып. 2 (41). — С. 84–97. — DOI: 10.36622/2219-1038.2024.41.2.008.

4. Marbaniang A. L., Kabasi S., Ghosh S. Interactive Exploration of Tensile Membrane Structures for Conceptual and Optimal Design // Structures. — 2024. — Vol. 60. — Art. 105983. — DOI: 10.1016/j.istruc.2024.105983.

5. Чесноков А. В., Михайлов В. В. Разработка вантовой конструкции с тентовым покрытием // Строительная механика и конструкции. — 2024. — Вып. 1 (40). —

C. 56–67. — DOI: 10.36622/2219-1038.2024.40.1.005.

6. Goldbach A.-K., Bletzinger K.-U. Tracing Non-Linearities in the Load Bearing Behavior of Structural Membranes: Typical Shapes and Load Cases Investigated Towards European Standardization // Advances in Computational Science and Engineering. — 2024. — Vol. 2, No. 1. — P. 1–9. — DOI: 10.3934/acse.2024001.

7. Чесноков А. В., Михайлов В. В. Деформативность мягкой оболочки тентовых конструкций шедового типа // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 7.

8. de Souza M. S. V., Pauletti R. M. O. A Computational Framework for the Design of Tensile Structures // Advances in Computational Science and Engineering. — 2024. — Vol. 2, No. 1. — P. 37–72. — DOI: 10.3934/acse.2024005.

9. Чесноков А. В., Михайлов В. В., Долматов И. В. Экспериментальные исследования модели вантовой конструкции покрытия // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2024. — № 2. — С. 39–52. — DOI: 10.24866/2227-6858/2024-2/39-52.

10. Lang R., Němec I., Park K. C. Stress Projection Procedure for the Form-Finding Analysis of Membrane Structures // Engineering Structures. — 2024. — Vol. 300. — Art. 117173. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117173.

11. Херрати Ю., Ковалев Д. В., Столяров О. Н. Нелинейный метод прогнозирования ползучести и релаксации напряжения конструктивных элементов текстильных фасадов // Умные композиты в строительстве. — 2025. — Т. 6, № 2. — С. 22–34. — DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34.

12. Sinke Y., Tamke M., Thomsen M. R. Simulation Calibration of Differentiated Knitted Membranes with Evolutionary Optimisation Tools // Advances in Computational Science and Engineering. — 2024. — Vol. 2, No. 1. — P. 19–36. — DOI: 10.3934/acse.2024003.

13. Stranghöner N., Uhlemann J., Bilginoglu F. et al. Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures / Ed. by M. Mollaert, S. Dimova, A. Pinto, S. Denton. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. — 2nd ed. — DOI: 10.2760/24763.

14. Kabasi S., Marbaniang A. L., Ghosh S. Form-Finding of Frame-Supported Non-Minimal Tensile Membrane Structures for Anisotropic Prestress Using Physics-Informed Neural Networks // Structural and Multidisciplinary Optimization. — 2024. — Vol. 67. — Art. 56. — DOI: 10.1007/s00158-024-03779-x.

15. Liu D., Lienhard J. Reciprocal Diagrams in Membrane Structures: An Intuitive Form-Finding Approach // International Journal of Space Structures. – 2024. — Vol. 39, No. 4. — P. 231–243. — DOI: 10.1177/09560599251325670.

16. Zajac Z., Lang R., Němec I. Shape-Adaptive Climate Loading of Tensile Surface Structures // Advances in Computational Science and Engineering. — 2024. — Vol. 2, No. 1. — P. 10–18. — DOI: 10.3934/acse.2024002.

17. Kabasi S., Marbaniang A. L., Ghosh S. Physics-Informed Extreme Learning Machine for Rapid Form-Finding of Frame-Supported Lightweight Tensile Membrane Structures // Mechanics Research Communications. — 2025. — Vol. 146. — Art. 104419. — DOI: 10.1016/j.mechrescom.2025.104419.

18. Kabasi S., Marbaniang A. L., Ghosh S. Integrated Design of Tensile Membrane Structures Using Scientific Machine Learning Including Wrinkling Considerations // Mechanics Research Communications. — 2025. — Vol. 148. — Art. 104468. — DOI: 10.1016/j.mechrescom.2025.104468.

19. Kariouh A., Lorenzen da Silva V., Christidi N., Brandt N., Popescu M., D'Acunto P. Necto: Structural Design and Engineering of a CNC-Knitted Membrane Structure // Structures. — 2026. — Vol. 91. — Art. 112667. — DOI: 10.1016/j.istruc.2026.112667.

References

1. Chesnokov A. V., Mixajlov V. V. Metodika opredeleniya trebuemogo sootnosheniya membranny`x napryazhenij v tentovoj obolochke arochnogo tipa // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. — 2024. — T. 28, № 2. — S. 37–55. — DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-2-37-55.

2. Kabasi S., Marbaniang A. L., Ghosh S. Form-Finding of Tensile Membrane Structures with Strut and Anchorage Supports Using Physics-Informed Machine

Learning // Engineering Structures. — 2024. — Vol. 299. — Art. 117093. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117093.

3. Chesnokov A. V., Mixajlov V. V., Dolmatov I. V. Ocenka ravnovesnoj formy` myagkoj obolochki tentovoj konstrukcii arochnogo tipa v usloviyax dejstviya vneshnej nagruzki // Stroitel`naya mexanika i konstrukcii. — 2024. — Vy`p. 2 (41). — S. 84–97. — DOI: 10.36622/2219-1038.2024.41.2.008.

4. Marbaniang A. L., Kabasi S., Ghosh S. Interactive Exploration of Tensile Membrane Structures for Conceptual and Optimal Design // Structures. — 2024. — Vol. 60. — Art. 105983. — DOI: 10.1016/j.istruc.2024.105983.

5. Chesnokov A. V., Mixajlov V. V. Razrabotka vantovoj konstrukcii s tentovy`m pokry`tiem // Stroitel`naya mexanika i konstrukcii. — 2024. — Vy`p. 1 (40). — S. 56–67. — DOI: 10.36622/2219-1038.2024.40.1.005.

6. Goldbach A.-K., Bletzinger K.-U. Tracing Non-Linearities in the Load Bearing Behavior of Structural Membranes: Typical Shapes and Load Cases Investigated Towards European Standardization // Advances in Computational Science and Engineering. — 2024. — Vol. 2, No. 1. — P. 1–9. — DOI: 10.3934/acse.2024001.

7. Chesnokov A. V., Mixajlov V. V. Deformativnost` myagkoj obolochki tentovy`x konstrukcij shedovogo tipa // Inzhenerny`j vestnik Dona. — 2024. — № 7.

8. de Souza M. S. V., Pauletti R. M. O. A Computational Framework for the Design of Tensile Structures // Advances in Computational Science and Engineering. — 2024. — Vol. 2, No. 1. — P. 37–72. — DOI: 10.3934/acse.2024005.

9. Chesnokov A. V., Mixajlov V. V., Dolmatov I. V. E`ksperimental`ny`e issledovaniya modeli vantovoj konstrukcii pokry`tiya // Vestnik Inzhenernoj shkoly` Dal`nevostochnogo federal`nogo universiteta. — 2024. — № 2. — S. 39–52. — DOI: 10.24866/2227-6858/2024-2/39-52.

10. Lang R., Němec I., Park K. C. Stress Projection Procedure for the Form-Finding Analysis of Membrane Structures // Engineering Structures. — 2024. — Vol. 300. — Art. 117173. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117173.

11. Xerrati Yu., Kovalev D. V., Stolyarov O. N. Nelinejny`j metod prognozirovaniya

polzuchesti i relaksacii napryazheniya konstruktivny`x e`lementov tekstil`ny`x fasadov // Umny`e kompozity` v stroitel`stve. — 2025. — T. 6, № 2. — S. 22–34. — DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34.

12. Sinke Y., Tamke M., Thomsen M. R. Simulation Calibration of Differentiated Knitted Membranes with Evolutionary Optimisation Tools // Advances in Computational Science and Engineering. — 2024. — Vol. 2, No. 1. — P. 19–36. — DOI: 10.3934/acse.2024003.

13. Stranghöner N., Uhlemann J., Bilginoglu F. et al. Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures / Ed. by M. Mollaert, S. Dimova, A. Pinto, S. Denton. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. — 2nd ed. — DOI: 10.2760/24763.

14. Kabasi S., Marbaniang A. L., Ghosh S. Form-Finding of Frame-Supported Non-Minimal Tensile Membrane Structures for Anisotropic Prestress Using Physics-Informed Neural Networks // Structural and Multidisciplinary Optimization. — 2024. — Vol. 67. — Art. 56. — DOI: 10.1007/s00158-024-03779-x.

15. Liu D., Lienhard J. Reciprocal Diagrams in Membrane Structures: An Intuitive Form-Finding Approach // International Journal of Space Structures. – 2024. — Vol. 39, No. 4. — P. 231–243. — DOI: 10.1177/09560599251325670.

16. Zajac Z., Lang R., Němec I. Shape-Adaptive Climate Loading of Tensile Surface Structures // Advances in Computational Science and Engineering. — 2024. — Vol. 2, No. 1. — P. 10–18. — DOI: 10.3934/acse.2024002.

17. Kabasi S., Marbaniang A. L., Ghosh S. Physics-Informed Extreme Learning Machine for Rapid Form-Finding of Frame-Supported Lightweight Tensile Membrane Structures // Mechanics Research Communications. — 2025. — Vol. 146. — Art. 104419. — DOI: 10.1016/j.mechrescom.2025.104419.

18. Kabasi S., Marbaniang A. L., Ghosh S. Integrated Design of Tensile Membrane Structures Using Scientific Machine Learning Including Wrinkling Considerations // Mechanics Research Communications. — 2025. — Vol. 148. — Art. 104468. — DOI: 10.1016/j.mechrescom.2025.104468.

19. Kariouh A., Lorenzen da Silva V., Christidi N., Brandt N., Popescu M., D'Acunto P. Necto: Structural Design and Engineering of a CNC-Knitted Membrane Structure // Structures. — 2026. — Vol. 91. — Art. 112667. — DOI: 10.1016/j.istruc.2026.112667.

Статья поступила в редакцию 15.07.2026; одобрена после рецензирования 19.08.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 15.07.2026; approved after peer review 19.08.2026; accepted for publication 08.10.2026.

Научная статья

УДК 72.047:635.974

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ ФАСАДОВ В УМЕРЕННО-КОНТИНЕНТАЛЬНОМ КЛИМАТЕ

Пухова Анастасия Игоревна, кандидат технических наук, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Россия, Хабаровск, anastasia_pukhova@yandex.ru;

Старков Алексей Игоревич, кандидат технических наук, начальник сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ "Курчатовский институт", Россия, Москва, starkov.ai@mail.ru

Аннотация. В работе анализируется проблема интеграции систем вертикального озеленения в архитектурную среду городов с умеренно-континентальным климатом на примере Казани, где продолжительность вегетационного периода не превышает пяти месяцев. Авторы проводят сравнительный анализ трех конструктивных решений: тросовых, модульных кассетных и гидропонных панелей. Методология исследования включает натурные теплотехнические замеры на опытных фрагментах фасадов площадью девять квадратных метров в течение полного годового цикла, а также оценку пожарной безопасности с учетом сезонного изменения влажности фитомассы и объема отмершей древесины. Эксперимент показал, что в условиях суровых ветровых зим в гидропонных системах наблюдается значительная гибель растений вследствие промерзания корневой зоны, а их консервация требует высоких эксплуатационных затрат. Тросовые конструкции эффективно снижают летний перегрев стен, однако накапливают сухую биомассу, что создает существенные пожарные риски в виде кратковременных тепловых вспышек в весенний период. Модульные системы с минеральным субстратом и подобранным ассортиментом вечнозеленых и полулистопадных растений

обеспечивают оптимальный баланс. Они стабилизируют температурный режим ограждающих конструкций зимой, минимизируют угрозу распространения пламени и сохраняют декоративность фасада круглый год. Результаты работы позволяют проектировщикам выбирать тип системы вертикального озеленения с учётом климатических условий и требований пожарной безопасности.

Ключевые слова: вертикальное озеленение, биофильный дизайн, умеренно-континентальный климат, пожарная безопасность фасадов, теплотехнические показатели, модульные фитосистемы, городская среда, архитектурное проектирование, ограждающие конструкции.

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF VERTICAL LANDSCAPING SYSTEMS FOR FACADES IN A TEMPERATE CONTINENTAL CLIMATE

Pukhova Anastasia Igorevna, Candidate of Technical Sciences, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, anastasia_pukhova@yandex.ru;

Starkov Aleksei Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Sector Head, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia, starkov.ai@mail.ru

Abstract. This paper analyzes the problem of integrating vertical gardening systems into the architectural environment of cities with a temperate continental climate, using Kazan as an example, where the growing season lasts no more than five months. The authors conduct a comparative analysis of three design solutions: cable-supported structures, modular cassette panels, and hydroponic panels. The research methodology includes in-kind thermal measurements on nine-square-meter test façade sections over a full annual cycle, as well as a fire safety assessment taking into account seasonal variations in phytomass moisture and the volume of dead wood. The experiment showed that in harsh, windy winters, hydroponic systems exhibit a critically high percentage of root zone freezing, requiring unjustified maintenance

costs. Cable-supported structures effectively reduce summer wall overheating, but accumulate dry biomass, creating significant fire risks in the form of short-term thermal flares in the spring. Modular systems with a mineral substrate and a selected assortment of evergreen and semi-deciduous plants provide an optimal balance. They stabilize the temperature of the building envelope in winter, minimize the risk of fire spread, and maintain the decorative appearance of the façade year-round. The results of this work allow designers to make informed choices about living wall types, based on the physical constraints of the environment and fire safety regulations.

Keywords: vertical gardening, biophilic design, temperate continental climate, fire safety of facades, thermal performance, modular phytosystems, urban environment, architectural design, enclosing structures.

Введение. Интенсивное уплотнение застройки современных городов неизбежно влечет за собой дефицит рекреационных зон и снижение общего уровня экологического комфорта [1], [2]. В этих условиях биофильный дизайн используется не только как эстетический приём, но и как инструмент архитектурного проектирования. Интеграция природных элементов в искусственную среду позволяет компенсировать нехватку наземных зеленых насаждений, однако требует поиска новых форматов озеленения, не связанных с изъятием ценных городских территорий и увеличением застроенных площадей [3], [4].

Вертикальное озеленение фасадов выступает наиболее рациональным ответом на данный градостроительный вызов, поскольку задействует неиспользуемые плоскости ограждающих конструкций. Архитектурная практика последних лет убедительно демонстрирует, что модульные фитосистемы способны не только формировать выразительный облик здания, но и существенно корректировать локальный микроклимат [5-7]. Полевые измерения, проведенные в условиях умеренного климата Центральной Европы, доказывают: растительный слой действует как эффективный термический

буфер, снижая температуру поверхности стены в пиковые летние периоды более чем на 10 °C за счет затенения и тепловой инерции [8]. Подобный пассивный эффект крайне важен для уменьшения энергозатрат на кондиционирование и улучшения теплового комфорта в прилегающих общественных пространствах.

Однако применение зарубежных проектных решений в Поволжье ограничено местными климатическими условиями [9]. Специфика умеренно-континентального климата на примере Казани, где зимние температуры регулярно опускаются до отметки -25 °C, а продолжительность вегетационного периода ограничена пятью-шестью месяцами, предъявляет особые требования к подбору растений и конструкции фасадных систем [10]. Если в летний сезон фитомасса активно участвует в теплообмене и испарении, то с наступлением холодов и переходом растений в состояние покоя их физическое и визуальное состояние кардинально меняется [11]. В холодный период фасад может терять декоративность, а накопление сухой растительной массы повышает пожарный риск.

Исследования пожароопасности зеленых фасадов показывают, что ключевым фактором риска в таких условиях выступает влажность растительных тканей [12-14]. Отмирающие и пересыхающие побеги, особенно у вечнозеленых или слабо листопадных видов, теряют влагу и приобретают свойства горючего материала. В отличие от жизнеспособных растений, которые способны к самозатуханию и препятствуют горизонтальному распространению пламени, сухая листва и мертвая древесина при возгорании выделяют тепло скачкообразно, создавая угрозу перехода огня на смежные конструкции и вышележащие этажи.

Таким образом, проектирование вертикального озеленения в условиях умеренно-континентального климата требует комплексного учёта декоративных, биологических, теплотехнических и эксплуатационных характеристик фасадных систем. Продолжительное воздействие отрицательных температур, сезонное изменение влажности субстрата и формирование сухой

растительной массы обусловливают необходимость оценки конструктивных решений на протяжении полного годового цикла. Цель исследования заключается в сравнительном анализе тросовой, модульной и гидропонной систем вертикального озеленения применительно к климатическим условиям Казани. В качестве основных критериев рассматриваются особенности формирования теплового режима фасада, жизнеспособность растений после зимовки, затраты на обслуживание и факторы эксплуатационной и пожарной безопасности.

Обзор литературы. Современные исследования вертикального озеленения фасадов рассматривают растительный покров как дополнительный элемент регулирования теплового взаимодействия ограждающих конструкций с окружающей средой. Полевые наблюдения свидетельствуют о влиянии затенения, испарения влаги и тепловой инерции растительной массы на температуру наружной поверхности стены. В отдельных экспериментальных условиях снижение температуры затенённой поверхности в летний период может достигать 10-11 °C по сравнению с открытыми участками ограждения [15].

Существенное ограничение существующих подходов связано с зависимостью эффективности вертикального озеленения от климатических условий. Результаты, полученные для регионов с мягким климатом, не могут непосредственно распространяться на территории с длительными периодами отрицательных температур. В умеренно-континентальном климате сезонные изменения состояния растений и субстрата определяют различия между летними теплотехническими преимуществами систем и их эксплуатационной устойчивостью в зимний период [16].

Отдельное направление исследований связано с пожарной безопасностью вертикального озеленения. Значимыми факторами являются влажность растительных тканей, наличие сухой фитомассы, свойства конструктивных компонентов и особенности расположения растительного слоя относительно

наружного ограждения [17, 18]. При этом биологическая сохранность растений, ремонтопригодность модулей и пожарные характеристики конструкции представляют собой самостоятельные показатели, которые необходимо оценивать раздельно. Следовательно, комплексное сравнение фасадных систем должно учитывать не только их способность снижать температуру поверхности в летний период, но и сезонную устойчивость растительного покрова, особенности обслуживания и характеристики конструктивной безопасности.

Организация и методология исследования. Объектом исследования выступил 9-этажный административный корпус в Ново-Савиновском районе Казани. Для экспериментальных фрагментов была выбрана юго-восточная ориентация, обеспечивающая интенсивное утреннее солнечное облучение. Несущая стена выполнена из газобетонных блоков толщиной 400 мм; предусмотрен вентилируемый зазор. На фасаде были смонтированы три опытных фрагмента размером 3×3 м каждый, имеющие единую базовую стену, одинаковую степень затенения от соседствующих объемов и сопоставимую исходную плотность растительного покрова. Для расчётов использован актуальный погодный файл Казани: расчётный зимний минимум составил −28 °C, продолжительность вегетации — 155–160 дней.

Для сравнения были выбраны три принципиально разных архитектурно-конструктивных решения (Таблица 1).

Таблица 1 - Конфигурация и биологические параметры исследуемых систем вертикального озеленения

Параметр	Система А: Тросовая (пристенная)	Система Б: Модульная (кассетная)	Система В: Гидропонная (панельная)
Конструктив	Стальные тросы, отступ от стены 10 см	Алюминиевый каркас, кассеты с минеральным субстратом (толщина 15 см), отступ 5 см	Войлочные карманы на несущей раме, система рециркуляции, отступ 3 см
Ассортимент	Parthenocissus tricuspidata (Девичий виноград трехостренный)	Euonymus fortunei (Бересклет Форчуна), Carex morrowii (Осока Морроу)	Heuchera spp. (Гейхера гибридная), Sedum spp. (Очиток)

LAI (лето/зима)	3.8 / 0.0 (полный листопад)	2.6 / 2.2 (вечнозеленые / полулистопадные)	2.0 / 0.5 (частичное отмирание надземной части)
Схема полива	Капельный полив от водопровода, ручной контроль	Автоматический капельный полив с датчиками влажности субстрата	Замкнутый контур рециркуляции с УФ-стерилизацией и автоматическим доливом
Зимний режим	Обрезка сухой лозы, естественная спячка	Ограниченный полив в оттепели, защита от весенних солнечных ожогов	Полный слив воды, продувка труб сжатым воздухом, укрытие корневой зоны теплоэкранами

Источник: разработано авторами.

Теплотехнические процессы моделировались в среде EnergyPlus для оценки годового энергопотребления, после чего данные верифицировались посредством натурного эксперимента. Для регистрации температурных градиентов датчики Pt100 установили в субстрате, воздушном зазоре и на поверхности растений, а для непрерывного измерения влажности использовали TDR-зонды.

При оценке пожарной безопасности учитывались температура фасада и влажность растительной массы. Опираясь на методологию испытаний горючести [2], авторы фиксировали процентное содержание сухой фитомассы в весенний период, что является прямым индикатором риска возникновения кратковременных вспышек пламени. Дополнительно учитывались доля погибших после зимовки растений и объём их необходимой замены, поскольку эти показатели влияют на сохранение декоративности фасада.

Результаты проведения исследования и их обсуждение. Анализ микроклиматических показателей выявил существенную разницу в поведении систем в зависимости от сезона. В летний период (июль-август) максимальное снижение температуры поверхности газобетонной стены зафиксировано для Системы А (тросовая) и Системы Б (модульная). Максимальная разница температур между открытым участком фасада и стеной под плотным покровом девичьего винограда достигала 10,8 °C, что согласуется с данными европейских исследований [18]. Гидропонная система показала снижение лишь на 6,5 °C, что

объясняется ограничением транспирации в периоды казанской летней засухи, несмотря на автоматический полив.

Зимние измерения (январь-февраль) продемонстрировали иную картину. Тросовая система, лишенная листвы, не оказывала существенного влияния на теплопотери стены, выполняя лишь незначительную функцию ветрозащиты. Модульная система с вечнозелеными растениями и толстым слоем субстрата обеспечила термическую стабилизацию, снизив амплитуду суточных колебаний температуры несущей стены на 4,2 °C. Гидропонная система, переведенная в режим консервации (слив воды и укрытие теплоэкранами), фактически превратилась в дополнительный ветрозащитный экран, однако из-за малой толщины войлока ее сопротивление теплопередаче осталось минимальным (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные показатели теплофизических и эксплуатационных характеристик систем

Показатель	Система А (Тросовая)	Система Б (Модульная)	Система В (Гидропонная)
Снижение t° поверхности (лето, пик)	10,8 °C	9,4 °C	6,5 °C
Сглаживание суточных колебаний t° (зима)	+0,2 °C (незначительно)	+4,2 °C (выраженно)	+1,1 °C (слабо)
Расход воды (средний за вегетацию)	4,5 л/м²/сут	6,2 л/м²/сут	8,8 л/м²/сут (с учетом потерь на испарение и продувку)
Трудозатраты на обслуживание (часов/год)	12 (обрезка, подвязка)	28 (замена погибших, стрижка, настройка полива)	45 (консервация на зиму, расконсервация, чистка форсунок)
Последствия зимней эксплуатации растительного покрова	Частичное обмерзание кончиков побегов — около 2 %	Замена 14 % кассет вследствие повреждения растительного покрова	Гибель 38 % учтённых экземпляров гейхеры

Источник: разработано авторами.

Наиболее существенный недостаток тросовой системы связан с повышенным пожарным риском. К концу апреля, до начала сокодвижения, в системе А накапливается значительная масса сухой лозы и прошлогодней листвы. Согласно принципам оценки горючести фитомассы [2], такой материал

при воздействии открытого источника огня или фасадного электрического оборудования способен к быстрому горизонтальному распространению пламени с образованием кратковременных высокотемпературных вспышек. Модульная и гидропонная системы, благодаря наличию влажного субстрата или войлока, даже в случае частичного усыхания надземной части демонстрируют высокую устойчивость к возгоранию, однако требуют строгого контроля за состоянием орошателей.

Оценка сезонной сохранности растительного покрова выявила существенные различия эксплуатационных характеристик рассматриваемых систем вертикального озеленения. Тросовая система с использованием девичьего винограда характеризовалась наиболее высокой устойчивостью к условиям зимнего периода; зафиксированные повреждения отдельных побегов не потребовали масштабного восстановления конструкции. Для модульной системы основным неблагоприятным фактором стали весенние солнечные ожоги вечнозелёного бересклета, в результате чего потребовалась замена приблизительно 14 % конструктивных кассет в течение первого года эксплуатации. В гидропонной системе после зимовки зарегистрирована гибель 38 % учтённых экземпляров гейхеры, связанная с повреждением корневой системы при промерзании войлочных элементов. Указанная доля характеризует потери растений данного вида и не является показателем повреждения 38 % конструктивных модулей. Таким образом, выявленные последствия зимней эксплуатации необходимо разграничивать по характеру повреждений: частичное обмерзание побегов, замену кассет и гибель отдельных растений. Различие указанных показателей учитывается при сравнительной оценке жизнеспособности растительного покрова и эксплуатационных затрат (таблица 3).

Таблица 3 - Матрица рисков и архитектурно-эксплуатационной целесообразности

Критерий оценки	Система А (Тросовая)	Система Б (Модульная)	Система В: Гидропонная)
Архитектурная выразительность	Сезонная (лето — зеленый ковер, зима — графика тросов)	Круглогодичная стабильность, плотная текстура	Круглогодичная, но с риском выпадения растений
Пожарный риск (весенний период)	Высокий (накопление сухой фитомассы)	Низкий (влага в субстрате)	Низкий (влага в субстрате)
Ветровая устойчивость	Высокая (гибкое крепление, обдувание)	Средняя (парусность кассет, риск срыва при урагане)	Низкая (расслоение войлока, срыв карманов)
Рекомендация для климата Казани	Оптимально для теневых и северных фасадов, а также для экономичного летнего охлаждения	Рекомендуется для общественных зданий, фасады которых должны сохранять декоративность круглый год	Не рекомендуется из-за экстремальных зимних рисков и высокой стоимости эксплуатации

Источник: разработано авторами.

Проведенный натурно-расчетный эксперимент в условиях умеренно-континентального климата Казани демонстрирует, что универсального решения для вертикального озеленения не существует. Тросовые системы, обладая выдающейся летней эффективностью охлаждения и минимальной стоимостью, несут в себе скрытые пожарные риски весной из-за накопления сухой биомассы и не обеспечивают зимней теплоизоляции. Гидропонные панели, несмотря на технологическую привлекательность, оказались уязвимыми к промерзанию корневой зоны в условиях ветровых зим и потребовали значительных затрат на консервацию и восстановление. Модульные кассетные системы с минеральным субстратом и подобранным ассортиментом полулистопадных и вечнозеленых видов представляют собой наиболее сбалансированный компромисс. Они обеспечивают стабильный термический буфер, минимизируют пожарные угрозы за счет удержания влаги в субстрате и сохраняют архитектурную выразительность фасада на протяжении всего года, что делает их предпочтительным выбором для ответственных городских объектов в рассматриваемом климатическом регионе.

Выводы. Результаты комплексного натурно-расчетного эксперимента

свидетельствуют о необходимости пересмотра устоявшихся подходов к интеграции растительных компонентов в городскую среду. Полученные результаты показывают, что вертикальное озеленение выполняет не только декоративную, но и терморегулирующую функцию, влияя на микроклимат окружающего пространства. Для архитектуры умеренно-континентального пояса, где сезонные температурные амплитуды достигают критических значений, адаптация биофильных концепций требует отказа от прямого копирования зарубежных аналогов. Архитектурные и конструктивные решения для фасадного озеленения должны учитывать биологические циклы растений и климатические условия эксплуатации.

Анализ теплофизических процессов в ограждающих конструкциях диктует необходимость дифференцированного выбора типологии озеленения в зависимости от функционального назначения сооружения. Модульные кассетные решения с минеральным субстратом демонстрируют оптимальный баланс между летним затенением и зимней теплоизоляцией, выступая наиболее надежным инструментом пассивного энергосбережения. В то же время гидропонные панели, несмотря на их технологическую привлекательность и визуальную легкость, оказываются уязвимыми перед экстремальными ветровыми и температурными нагрузками, что неизбежно ведет к деградации растительного покрова и удорожанию эксплуатации. Проектировщикам следует закладывать в архитектурную концепцию не только эстетику живых стен, но и физическую возможность их консервации в зимний период, предусматривая скрытые ниши для размещения инженерных узлов, дренажных систем и теплозащитных экранов.

Не менее критичным аспектом, который специалистам предстоит интегрировать в проектную практику, становится обеспечение пожарной безопасности, выходящее за рамки простого подбора негорючих материалов основания. Главный фактор риска связан с состоянием растительной массы: при недостаточном уходе за тросовыми системами и вечнозелёными растениями на

фасаде могут накапливаться отмершие побеги и сухая листва, создающие условия для кратковременных интенсивных вспышек пламени. Следовательно, архитектор обязан закладывать в проект беспрепятственную доступность фасада для регулярной агротехнической обрезки. Конфигурация здания, наличие выступающих козырьков и пожарных рассечек должны формировать не только внешний облик, но и обеспечивать безопасную траекторию движения обслуживающего персонала, превращая рутинный уход за растениями в неотъемлемую часть жизненного цикла сооружения.

Дальнейшее развитие темы вертикального озеленения в отечественной архитектуре видится в углублении междисциплинарного диалога между зодчими, теплотехниками и дендрологами. Разработка нормативной базы и каталогов сочетаний растений, проверенных в конкретных климатических зонах, станет следующим шагом к более широкому внедрению зелёных фасадов. Творческая концепция архитектурного объекта, интегрирующего природу в искусственную среду, должна базироваться на глубоком понимании физико-технических характеристик ограждающих конструкций и биологических особенностей растений. Только такой синтез инженерного расчета и архитектурного мастерства позволит гарантировать безопасность, экологический комфорт и эстетическую выразительность городских пространств на протяжении десятилетий.

Список литературы

1. Лейкина Д. К., Океанов Г. В., Бенуж А. А. Вертикальное озеленение. Опыт нормирования // Academia. Архитектура и строительство. — 2024. — № 2. — С. 71–79. — DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-71-79.

2. Gao Y., Farrokhirad E., Pitts A. The Impact of Orientation on Living Wall Façade Temperature: Manchester Case Study // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 14. — Art. 11109. — DOI: 10.3390/su151411109.

3. Иванова Н. В., Ганжа О. А. Экологичное вертикальное озеленение в проектировании высотных зданий // Вестник Волгоградского государственного

архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — Вып. 1 (94). — С. 203–214. — DOI: 10.35211/18154360_2024_1_203.

4. De Groeve M., Kale E., Godts S., Orr S. A., De Kock T. Impact of Vertical Greening on Urban Microclimate and Historic Building Materials: A Meta-Analysis // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111365. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111365.

5. Коростелева Н. В., Бучина В. Б. Вертикальное озеленение фасадов зданий как часть городской экосистемы // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — Вып. 1 (94). — С. 215–223. — DOI: 10.35211/18154360_2024_1_215.

6. Su M., Jie P., Li P., Yang F., Huang Z., Shi X. A Review on the Mechanisms Behind Thermal Effect of Building Vertical Greenery Systems (VGS): Methodology, Performance and Impact Factors // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 303. — Art. 113785. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113785.

7. Иванова Н. В., Ганжа О. А. Интеграция эколого-эстетических решений вертикального озеленения в проектирование оболочки здания // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2025. — Вып. 1 (98). — С. 236–246. — DOI: 10.35211/18154360_2025_1_236.

8. Bakhtyari V., Fattahi K., Movahed K., Franz A. Investigating the Effect of Living Walls on Cooling Energy Consumption in Various Urban Microclimates, Building Heights, and Greenery Coverage Areas // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 2. — Art. 920. — DOI: 10.3390/su16020920.

9. Коростелева Н. В., Бучина В. Б. Вертикальное озеленение зданий как инновационный метод благоустройства городских территорий (на примере города Волгограда) // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. — 2024. — № 4 (31). — С. 69–77. — DOI: 10.36622/2541-9110.2024.31.4.008.

10. Nesci V., Ballarini I., Rando Mazzarino P., Corrado V. Living Walls and Green Façades: An Implementation Code for Energy Simulation // Buildings. — 2024. — Vol. 14, No. 7. — Art. 2040. — DOI: 10.3390/buildings14072040.

11. Смирнов Ю. Н., Уланбек уулу Актан. Использование биофильного урбанизма для реновации микрорайона «Восток-5» в г. Бишкеке // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. — 2025. — Т. 25, № 8. — С. 189–196. — DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-189-196.

12. Reyhani M., Santolini E., Tassinari P., Torreggiani D. Environmental Assessment of Design Choices of Green Walls Based for Materials Combination and Plants // The International Journal of Life Cycle Assessment. — 2023. — Vol. 28. — P. 1078–1091. — DOI: 10.1007/s11367-023-02181-x.

13. Березина А. А., Казанцев П. А., Шиян А. Ю. Особенности пространственной организации устойчивой к климатическим изменениям городской среды на основе систем озеленения в условиях юга Приморья // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2025. — № 3 (64). — С. 162–183. — DOI: 10.24866/2227-6858/2025-3/162-183.

14. Khan I. H., Munawer T. A Systematic Review of Economic Sustainability of Vertical Greenery Systems for Buildings // Construction Economics and Building. — 2024. — Vol. 24, No. 1–2. — P. 119–143. — DOI: 10.5130/AJCEB.v24i1/2.8710.

15. Chen S., Olivieri F., Peng L., Li J. Benefits and Monetary Values of Vertical Greening Systems: A Semi-Systematic Review // Building and Environment. — 2025. — Vol. 284. — Art. 113463. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113463.

16. Shao Y., Ding D., Zhao J. A Systematic Review of Vertical Greenery: Environmental Impacts, Architectural Innovations, and Future Directions // Sustainability. — 2026. — Vol. 18, No. 14. — Art. 7153. — DOI: 10.3390/su18147153.

17. Engel T., Kahler J. Fire Safety for Green Façades: Part 2: Full-Scale Façade Fire Tests and Means for Fire-Safe Green Façade Design with Climbing Plants on Trellises // Fire Technology. — 2026. — Vol. 62. — Art. 51. — DOI: 10.1007/s10694-025-

01826-7.

18. Rico M. A., Olivieri F., Balaguera A., Zapata L. F. Life Cycle Assessment of Green Wall Systems in the Built Environment: A Systematic Review of System Boundaries, Inventories, Methodological Gaps, and Design Implications // Buildings. — 2026. — Vol. 16, No. 13. — Art. 2627. — DOI: 10.3390/buildings16132627.

References

1. Lejkina D. K., Okeanov G. V., Benuzh A. A. Vertikal`noe ozelenenie. Opy`t normirovaniya // Academia. Arxitektura i stroitel`stvo. — 2024. — № 2. — S. 71–79. — DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-71-79.

2. Gao Y., Farrokhirad E., Pitts A. The Impact of Orientation on Living Wall Façade Temperature: Manchester Case Study // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 14. — Art. 11109. — DOI: 10.3390/su151411109.

3. Ivanova N. V., Ganzha O. A. E`kologichnoe vertikal`noe ozelenenie v proektirovanii vy`sotny`x zdanij // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2024. — Vy`p. 1 (94). — S. 203–214. — DOI: 10.35211/18154360_2024_1_203.

4. De Groeve M., Kale E., Godts S., Orr S. A., De Kock T. Impact of Vertical Greening on Urban Microclimate and Historic Building Materials: A Meta-Analysis // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111365. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111365.

5. Korosteleva N. V., Buchina V. B. Vertikal`noe ozelenenie fasadov zdanij kak chast` gorodskoj e`kosistemy` // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2024. — Vy`p. 1 (94). — S. 215–223. — DOI: 10.35211/18154360_2024_1_215.

6. Su M., Jie P., Li P., Yang F., Huang Z., Shi X. A Review on the Mechanisms Behind Thermal Effect of Building Vertical Greenery Systems (VGS): Methodology, Performance and Impact Factors // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 303. — Art. 113785. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113785.

7. Ivanova N. V., Ganzha O. A. Integraciya e`kologo-e`steticheskix reshenij

vertikal`nogo ozeleneniya v proektirovanie obolochki zdaniya // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — Vy`p. 1 (98). — S. 236–246. — DOI: 10.35211/18154360_2025_1_236.

8. Bakhtyari V., Fattahi K., Movahed K., Franz A. Investigating the Effect of Living Walls on Cooling Energy Consumption in Various Urban Microclimates, Building Heights, and Greenery Coverage Areas // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 2. — Art. 920. — DOI: 10.3390/su16020920.

9. Korosteleva N. V., Buchina V. B. Vertikal`noe ozelenenie zdanij kak innovacionny`j metod blagoustrojstva gorodskix territorij (na primere goroda Volgograda) // Zhilishhnoe xozyajstvo i kommunal`naya infrastruktura. — 2024. — № 4 (31). — S. 69–77. — DOI: 10.36622/2541-9110.2024.31.4.008.

10. Nesci V., Ballarini I., Rando Mazzarino P., Corrado V. Living Walls and Green Façades: An Implementation Code for Energy Simulation // Buildings. — 2024. — Vol. 14, No. 7. — Art. 2040. — DOI: 10.3390/buildings14072040.

11. Smirnov Yu. N., Ulanbek uulu Aktan. Ispol`zovanie biofil`nogo urbanizma dlya renovacii mikrorajona «Vostok-5» v g. Bishkeke // Vestnik Ky`rgy`zsko-Rossijskogo Slavyanskogo universiteta. — 2025. — T. 25, № 8. — S. 189–196. — DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-189-196.

12. Reyhani M., Santolini E., Tassinari P., Torreggiani D. Environmental Assessment of Design Choices of Green Walls Based for Materials Combination and Plants // The International Journal of Life Cycle Assessment. — 2023. — Vol. 28. — P. 1078–1091. — DOI: 10.1007/s11367-023-02181-x.

13. Berezina A. A., Kazancev P. A., Shiyan A. Yu. Osobennosti prostranstvennoj organizacii ustojchivoj k klimaticheskim izmeneniyam gorodskoj sredy` na osnove sistem ozeleneniya v usloviyax yuga Primor`ya // Vestnik Inzhenernoj shkoly` Dal`nevostochnogo federal`nogo universiteta. — 2025. — № 3 (64). — S. 162–183. — DOI: 10.24866/2227-6858/2025-3/162-183.

14. Khan I. H., Munawer T. A Systematic Review of Economic Sustainability of

Vertical Greenery Systems for Buildings // Construction Economics and Building. — 2024. — Vol. 24, No. 1–2. — P. 119–143. — DOI: 10.5130/AJCEB.v24i1/2.8710.

15. Chen S., Olivieri F., Peng L., Li J. Benefits and Monetary Values of Vertical Greening Systems: A Semi-Systematic Review // Building and Environment. — 2025. — Vol. 284. — Art. 113463. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113463.

16. Shao Y., Ding D., Zhao J. A Systematic Review of Vertical Greenery: Environmental Impacts, Architectural Innovations, and Future Directions // Sustainability. — 2026. — Vol. 18, No. 14. — Art. 7153. — DOI: 10.3390/su18147153.

17. Engel T., Kahler J. Fire Safety for Green Façades: Part 2: Full-Scale Façade Fire Tests and Means for Fire-Safe Green Façade Design with Climbing Plants on Trellises // Fire Technology. — 2026. — Vol. 62. — Art. 51. — DOI: 10.1007/s10694-025-01826-7.

18. Rico M. A., Olivieri F., Balaguera A., Zapata L. F. Life Cycle Assessment of Green Wall Systems in the Built Environment: A Systematic Review of System Boundaries, Inventories, Methodological Gaps, and Design Implications // Buildings. — 2026. — Vol. 16, No. 13. — Art. 2627. — DOI: 10.3390/buildings16132627.

Статья поступила в редакцию 09.07.2026; одобрена после рецензирования 20.08.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 09.07.2026; approved after peer review 20.08.2026; accepted for publication 08.10.2026.

Научная статья

УДК 72.032.5

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДАНИЙ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ: ТИПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Еремеева Виктория Александровна, кандидат технических наук, Южно-Уральский государственный университет, Россия, Челябинск, eremeeva.viktoria@mail.ru

Аннотация. Формирование комфортной городской среды неразрывно связано с развитием транспортно-пересадочных узлов, чья архитектура выходит за рамки утилитарного обслуживания пассажирских потоков. Отсутствие системной типологии, учитывающей закономерности движения пешеходов и особенности ориентирования в пространстве, снижает качество проектирования транспортно-пересадочных узлов. В статье предложена многомерная архитектурно-типологическая модель, объединяющая пространственную конфигурацию здания, динамику пассажиропотока и визуальную проницаемость интерьеров. Методологическую основу составили агентное моделирование, шкала уровня обслуживания и визуальный графический анализ. По результатам анализа двенадцати реализованных объектов, в том числе детального изучения четырех узлов, выявлены закономерности влияния планировочных решений на удобство ориентирования и пропускную способность. Установлено, что понятная планировка и визуальная связность конкорсов сокращают время пересадки и снижают когнитивную нагрузку на пассажиров. Кроме того, показано, что объемно-пространственные характеристики, такие как высота потолков и интеграция естественного освещения, не влияют на скорость движения толпы, но критически важны для психофизиологического комфорта и пространственной ориентации. Разработанные типологические рекомендации позволяют перейти от интуитивных решений к проектированию транспортно-пересадочных узлов, основанному на результатах анализа. Это обеспечивает

необходимый баланс между организацией скоростного транзита и созданием полноценного, безопасного общественного пространства, интегрированного в городскую ткань.

Ключевые слова: транспортно-пересадочный узел, архитектурная типология, пассажирские потоки, агентное моделирование, визуальный графический анализ, навигационная читаемость, доказательное проектирование, пространственная конфигурация.

Original article

SPATIAL ORGANIZATION OF BUILDINGS OF TRANSPORTATION HUBS: TYPOLOGICAL ANALYSIS

Eremeeva Viktoria Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, eremeeva.viktoria@mail.ru

Abstract. The creation of a comfortable urban environment is inextricably linked to the development of transport hubs, whose architecture extends beyond the utilitarian service of passenger flows. The lack of a systematic typology that considers the physics of pedestrian movement and the cognitive aspects of navigation significantly reduces the quality of designed facilities. This article proposes a multidimensional architectural typological model that integrates the spatial configuration of a building, passenger flow dynamics, and the visual permeability of its interiors. The methodological framework consists of agent-based modeling, a service level scale, and visual graphical analysis. Using twelve completed projects and a detailed study of four hubs, patterns in the influence of planning solutions on navigational legibility and throughput are identified. It is established that the intuitive spatial geometry and visual connectivity of concourses reduce transfer times and reduce the cognitive load on passengers. Furthermore, it is shown that volumetric and spatial characteristics, such as ceiling height and the integration of natural light, do not affect crowd flow speed but are critical for psychophysiological comfort and spatial

orientation. The developed typological recommendations allow for the creative concept of architectural design for transport hubs to be transformed from intuitive solutions to evidence-based design. This ensures the necessary balance between the organization of rapid transit and the creation of a full-fledged, safe public space integrated into the urban fabric.

Keywords: transport hub, architectural typology, passenger flows, agent-based modeling, visual graphical analysis, navigational readability, evidence-based design, spatial configuration.

Введение. Современная градостроительная практика демонстрирует устойчивую тенденцию к трансформации традиционных транспортных станций в комплексные транспортно-пересадочные узлы [1]. Если ранее архитектура вокзалов и станций ориентировалась на задачи посадки и высадки пассажиров, то сегодня при создании подобных объектов архитекторы вынуждены решать принципиально иные задачи [2]. Европейские исследовательские инициативы, в частности проект NODES, подчеркивают, что подлинная интермодальность достигается созданием условий для беспрепятственного и комфортного перемещения человека по всей цепочке его поездки [3-5]. В этом контексте проектирование ТПУ выходит за рамки инженерно-технических задач и становится одним из инструментов развития прилегающих городских территорий.

Несмотря на активное строительство подобных объектов, в отечественной и зарубежной архитектурной науке до сих пор не сформирована системная типология ТПУ. Существующие подходы к классификации зачастую опираются на устаревшие критерии, такие как вместимость, количество обслуживаемых маршрутов или этажность, игнорируя при этом ключевые пространственные характеристики [6-8]. Ключевая проблема состоит в том, что действующие классификации не учитывают специфику движения пассажирских потоков и когнитивные аспекты навигации внутри сложных архитектурных сред.

Проектировщики вынуждены опираться на интуитивные решения или адаптировать типовые проекты торговых центров и аэропортов, что неизбежно ведет к возникновению дезориентирующих пространств и снижению качества транспортной мобильности.

Опираясь на современные урбанистические исследования, авторы рассматривают ТПУ как многомерное городское пространство, объединяющее транспортные и общественные функции. Опираясь на концепции, развитые в урбанистических исследованиях последних лет, мы рассматриваем ТПУ как многомерное городское пространство. Архитектурная форма такого здания должна одновременно отвечать трем взаимосвязанным, но порой конфликтующим требованиям. Объект функционирует как пересадочный хаб, где главной задачей становится минимизация временных затрат на транзит. Одновременно он выступает в роли станции, обеспечивающей эффективные связи с окружающей городской тканью [9]. Наконец, что особенно важно для творческой концепции архитектурной деятельности, ТПУ интегрируется в общественное пространство города, становясь местом притяжения и формирования новой городской идентичности [10].

Успешное воплощение этих трех функций напрямую зависит от того, насколько точно архитектурно-планировочная структура здания отражает физику движения пешеходов. Традиционный подход, основанный на расчете кратчайших геометрических расстояний, оказывается недостаточным. Как показывают исследования в области синтаксиса пространства, поведение людей в сложных транспортных средах диктуется не только физической дистанцией, но и конфигурацией улично-дорожной сети и визуальной проницаемостью интерьеров [11-13]. Человек интуитивно выбирает хорошо просматриваемые маршруты с понятным направлением движения. Поэтому при проектировании ТПУ следует применять визуальный графический анализ, чтобы оценивать обзорность пространства и согласовывать интуитивно выбираемые пассажирами маршруты с наиболее удобными путями перемещения.

Таким образом, отсутствие типологии, базирующейся на динамике пассажирских потоков и принципах пространственной навигации, тормозит развитие архитектурного проектирования транспортно-пересадочных узлов. Дальнейшее совершенствование творческих концепций в этой области требует перехода от чисто функционального зонирования к созданию адаптивных сред, где планировочная структура здания диктуется законами человеческой мобильности и визуального восприятия. Целью данного исследования является разработка архитектурно-типологических принципов формирования ТПУ, которые позволят согласовать требования к быстрому перемещению пассажиров с задачей создания комфортной, безопасной и эстетически выразительной городской среды.

Обзор источников академической литературы. Трансформация традиционных транспортных станций в комплексные транспортно-пересадочные узлы (ТПУ) кардинально изменила подходы к их архитектурному проектированию. Если ранее исследования посвящались исключительно инженерному обеспечению посадки и высадки пассажиров, то сегодня архитектура подобных объектов рассматривается как инструмент интеграции транспортных систем и городской среды. В фундаментальных работах, посвященных интермодальности, подчеркивается, что простое физическое совмещение различных видов транспорта не гарантирует эффективности [14-16]. Европейская исследовательская инициатива NODES убедительно демонстрирует, что подлинная интермодальность достигается за счет создания непрерывной и комфортной цепочки перемещения человека, где здание способствует развитию общественной жизни и повышению безопасности.

Несмотря на активное возведение подобных сооружений, в архитектурной науке отсутствует системная типология, учитывающая когнитивные аспекты навигации и физику пассажирских потоков. Существующие классификации, как правило, опираются на вместимость, этажность или количество обслуживаемых маршрутов, игнорируя пространственную конфигурацию. Исследователи, такие

как Л. Бертолини, указывают на необходимость разделения понятий «станция» как точки доступа и «пересадочный узел» как пространства взаимодействия [17]. Однако предложенные ими рекомендации остаются на уровне градостроительных принципов, не предоставляя архитекторам конкретного инструментария для формообразования. Анализ литературы показывает, что взаимосвязь между архитектурно-планировочной структурой здания, динамикой пешеходных потоков и визуальной проницаемостью интерьеров изучена фрагментарно, что требует разработки многомерной типологической модели [18], [19].

Методологическая и теоретическая база исследования. Преодоление ограничений традиционного деления ТПУ на подземные, надземные и гибридные требует формирования многомерной матрицы признаков. В основу методологии положен комплексный подход, объединяющий теорию пространственного синтаксиса, методы агентного моделирования и принципы эргономики пешеходного движения. Для оценки качества среды применяется шкала уровня обслуживания (LOS), разработанная Дж. Фруином, позволяющая дифференцировать показатели плотности потока в режимах штатной эксплуатации и экстренной эвакуации.

Ключевым инструментом анализа пассажирских потоков выступает агентное моделирование с использованием программных комплексов MassMotion и AnyLogic. Чтобы исключить зависимость результатов исключительно от теоретических допущений, расчетные модели в обязательном порядке проходят валидацию посредством натурных обследований. Калибровка осуществляется на основе данных видеонаблюдения и автоматических подсчетов пассажиров, что позволяет достичь высокой точности симуляции поведения толпы. Архитектурные параметры при этом разделяются на две группы: регулирующие пропускную способность (ширина конкорсов, конфигурация эскалаторных групп) и формирующие восприятие (высота потолков, объемно-пространственная структура).

Навигационная читаемость оценивается методом визуального графического анализа, позволяющим определить площадь пространства, видимого из заданной точки. Данный показатель напрямую соотносится с наблюдаемыми поведенческими метриками: количеством точек принятия решений, временем поиска направления и частотой ошибок маршрута. Факторы архитектурного комфорта, связанные с освещением и акустикой, оцениваются по измеримым показателям: коэффициенту естественной освещенности (КЕО) и времени реверберации звука, влияющему на разборчивость речевых сообщений.

Результаты исследования и их обсуждение. Разработка типологической модели началась с анализа двенадцати реализованных объектов, различающихся по масштабу и географическому расположению. На основе собранных данных была сформирована многомерная матрица, позволяющая классифицировать ТПУ по совокупности пространственных и функциональных признаков (таблица 1).

Таблица 1 - Многомерная типологическая матрица транспортно-пересадочных узлов

Классификационный признак	Категория 1	Категория 2	Категория 3
Глубина и вертикальность	Поверхностные (до 10 м)	Заглубленные (10–30 м)	Глубокого заложения (свыше 30 м)
Схема конкорса	Линейная (галерейная)	Центрическая (холловая)	Разветвленная (узловая)
Структура пересадок	Горизонтальная (в одном уровне)	Вертикальная (межуровневая)	Смешанная (многоярусная)
Наличие общественных функций	Транзитные	Буферные (кафе, киоски)	Интегрированные (торговля, культура)
Визуальная связность	Высокая (сквозная видимость)	Средняя (зонирование)	Низкая (лабиринтная структура)

Источник: разработано автором.

Для подробного анализа из общей выборки были отобраны четыре объекта, представляющие разные типы пространственной организации: ТПУ «Селигерская» (Москва), вокзальный комплекс Аточа (Мадрид), станция King’s Cross (Лондон) и узел Marienplatz (Мюнхен). Анализ этих зданий позволил выявить специфические закономерности взаимодействия архитектуры и потоков

(рисунок 1).

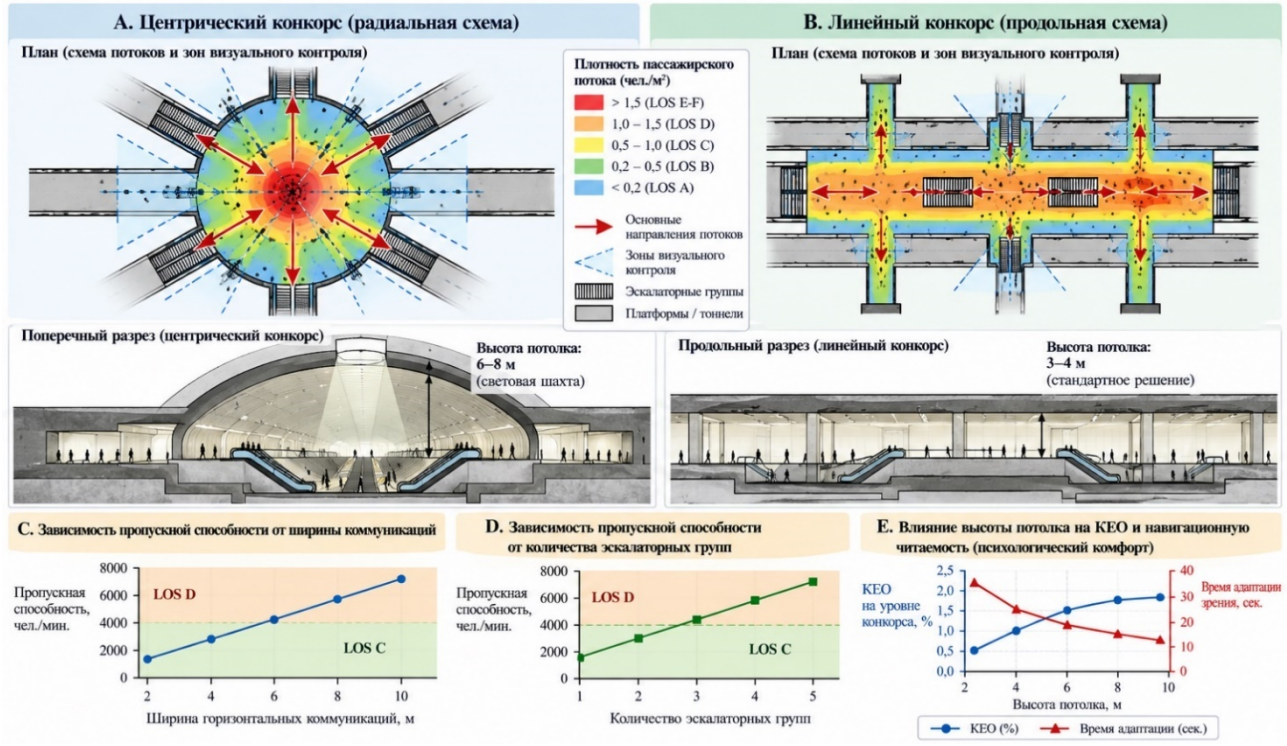


Рисунок 1 - Графическая интерпретация влияния архитектурных параметров на уровень обслуживания (LOS) и навигационную читаемость (источник: разработано автором)

Агентное моделирование пассажирских потоков показало, что пропускная способность линейно зависит от ширины горизонтальных путей движения и количества эскалаторных групп, а плотность потока соответствует уровням обслуживания LOS C и LOS D. В то же время высота потолка не оказывает прямого влияния на скорость движения, однако выступает критическим фактором психологического комфорта и визуальной ориентации. В заглубленных узлах, таких как «Селигерская» и Marienplatz, увеличение высоты подземных вестибюлей до 6-8 метров позволяет интегрировать световые шахты. Это повышает КЕО на нижних уровнях до 1,5-2%, что субъективно снижает ощущение замкнутого пространства и уменьшает время адаптации зрения при выходе на поверхность.

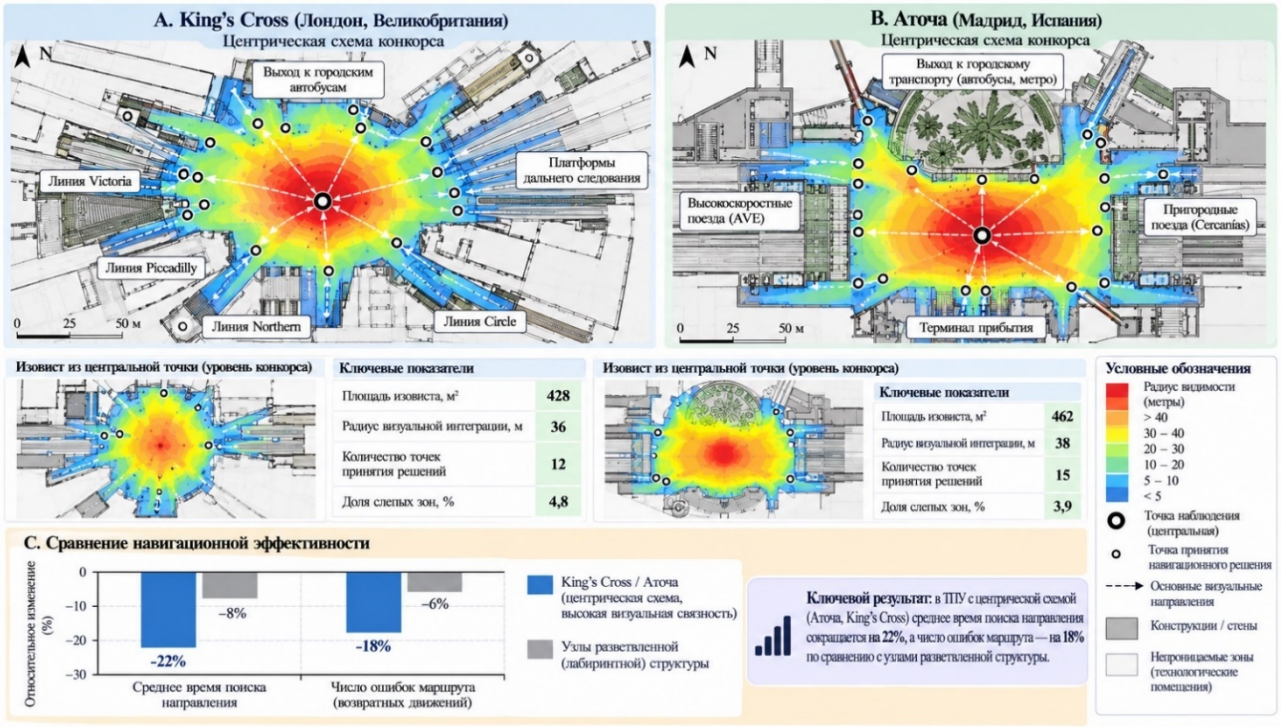


Рисунок 2 - Карты изовистов для ТПУ King's Cross и Аточа, демонстрирующие разницу в радиусах визуальной интеграции и количестве точек принятия навигационных решений (источник: разработано автором)

Анализ визуальной проницаемости подтвердил, что интуитивная геометрия пространства напрямую снижает когнитивную нагрузку на пассажира. В объектах с центрической схемой конкорса и высокой визуальной связностью (Аточа, King's Cross) площадь изовиста из центральной точки превышает 400 квадратных метров, а количество слепых зон минимизировано. Натурные наблюдения за поведением людей в этих зданиях зафиксировали сокращение среднего времени поиска направления на 22% и снижение числа ошибок маршрута (возвратных движений) на 18% по сравнению с узлами разветвленной структуры. В таких пространствах цветовая маркировка и тактильные указатели дополняют пространственную навигацию, тогда как в помещениях со сложной планировкой они становятся основными средствами ориентации.

Акустический комфорт в условиях высокого пассажиропотока требует строгого архитектурного контроля. Применение звукопоглощающих материалов на потолочных поверхностях и перфорированных панелей на стенах позволяет снизить время реверберации (RT) с критических 4,5 секунд до нормативных 1,2–

1,5 секунд. Это обеспечивает разборчивость служебных объявлений (показатель STI выше 0,6) даже в условиях фонового шума, создаваемого движущимися эскалаторами и толпой (таблица 2).

Таблица 2 - Сравнительные метрики архитектурной среды и навигационной эффективности исследуемых ТПУ

Объект исследования	Тип конкорса	Среднее время пересадки (мин)	Плотность потока в пик (чел./м²)	Время реверберации (сек)	Частота навигационных ошибок
ТПУ «Селигерская»	Линейный заглубленный	4,2	1,8 (LOS D)	1,4	Высокая (14% пассажиров)
Вокзал Аточа	Центрический наземный	2,8	1,2 (LOS C)	2,1	Низкая (4% пассажиров)
King’s Cross	Смешанный гибридный	3,5	1,5 (LOS C-D)	1,6	Средняя (8% пассажиров)
Marienplatz	Разветвленный глубокий	5,1	2,1 (LOS D-E)	1,3	Высокая (16% пассажиров)

Источник: разработано автором.

По результатам исследования разработана архитектурно-типологическая модель здания транспортно-пересадочного узла. Данная модель устанавливает жесткую взаимосвязь между пространственными признаками архитектуры, показателями пассажиропотока и навигационной читаемости среды. Выявлено, что эффективность ТПУ зависит от согласования пропускной способности горизонтальных путей движения с требованиями к психофизиологическому комфорту, связанному с объемно-пространственными решениями, освещением и акустикой.

Применение многомерной типологической матрицы и валидированного агентного моделирования переводит проектирование таких сложных сооружений из плоскости интуитивных решений в область доказательной архитектуры. Дальнейшее развитие предложенной модели предполагает ее адаптацию к условиям экстренной эвакуации с учетом возможных противоречий между требованиями к эвакуационным потокам и комфортом повседневного использования ТПУ.

Выводы. Формирование творческой концепции архитектурного

пространства ТПУ неразрывно связано с управлением визуальной проницаемостью интерьеров. Анализ карт изовистов, выполненный в рамках данной работы, доказывает прямую зависимость интуитивной навигации от радиуса визуальной интеграции. Архитектору необходимо стремиться к созданию центрических или линейных конкорсов, обеспечивающих максимальную площадь видимого пространства из ключевых узлов принятия решений. Подобный прием существенно снижает когнитивную нагрузку на пассажиров и предотвращает образование возвратных траекторий. Зоны с ограниченной видимостью и сложной геометрией целесообразно резервировать для вспомогательных сервисов, исключая их из основных транзитных коридоров.

Архитектурно-планировочная структура должна четко разграничивать параметры, регулирующие пропускную способность, и факторы, формирующие психофизиологический комфорт. Ширина горизонтальных коммуникаций и конфигурация эскалаторных групп рассчитываются исходя из целевых показателей уровня обслуживания (LOS) в пиковые часы нагрузки. В то же время объемно-пространственные характеристики, такие как высота потолков и наличие проемов для естественного освещения, не влияют на скорость движения толпы, но критически важны для предотвращения клаустрофобии на заглубленных уровнях. Интеграция естественного освещения через атриумы и световоды выступает действенным инструментом пространственной ориентации, позволяющим пассажирам определять, на какой глубине они находятся, и находить направление к выходу.

Неотъемлемой частью типологического моделирования выступает интеграция здания в окружающую городскую ткань. Опираясь на теоретические положения, развитые в рамках европейской исследовательской инициативы NODES, авторы рассматривают транспортно-пересадочный узел как многофункциональный элемент городского общественного пространства. При проектировании такого сооружения необходимо учитывать три функциональные

задачи. С одной стороны, объект выступает как скоростной пересадочный хаб, где приоритетом является минимизация времени транзита. С другой, он функционирует как городская станция, обеспечивающая бесшовную пешеходную связность с прилегающими кварталами. Наконец, здание становится общественным пространством, способствующим формированию местной идентичности. Примирение этих зачастую конфликтующих задач достигается за счет создания многослойных буферных зон, в которых транзитные потоки пространственно пересекаются с зонами кратковременного пребывания и отдыха.

Таким образом, разработанная типологическая модель задает качественно новые рамки для творческой концепции архитектурной деятельности в сфере транспортной инфраструктуры. Проектировщик выходит за рамки простого компоновщика инженерных систем, становясь автором сложной адаптивной среды. Применение методов агентного моделирования и визуального графического анализа позволяет архитектору уже на предпроектных стадиях прогнозировать поведенческие сценарии пассажирских потоков и аргументированно корректировать объемно-пространственное решение здания. Архитектура современного транспортно-пересадочного узла должна не только обеспечивать удобное перемещение и пересадки пассажиров, но и улучшать городскую среду, способствуя развитию прилегающих территорий.

Список литературы

1. Шаймарданова К. А. Классификация и типология транспортно-пересадочных объектов в структуре крупнейшего города // Architecture and Modern Information Technologies. — 2024. — № 3 (68). — С. 200–211. — DOI: 10.24412/1998-4839-2024-3-200-211.

2. Li Y., Gu K. Urban Morphology and Transit-Oriented Development (TOD): Planning and Managing Urban Change in New Zealand // Cities. — 2025. — Vol. 167. — Art. 106407. — DOI: 10.1016/j.cities.2025.106407.

3. Yao C., Li G., Yan S. Design Strategies to Improve Metro Transit Station Walking

Environments: Five Stations in Chongqing, China // Buildings. — 2024. — Vol. 14, No. 4. — Art. 1025. — DOI: 10.3390/buildings14041025.

4. Пьянков Я. О., Пенкина И. Е., Беляков В. А. Особенности формирования территории Екатеринбурга с учетом функционирования транспортно-пересадочных узлов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2025. — № 1 (64). — С. 43–49. — DOI: 10.25628/UNIIP.2025.64.1.025.

5. Fan J., Shi Z., Liu J., Wang J. Space Efficiency of Transit-Oriented Station Areas: A Case Study from a Complex Adaptive System Perspective // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2025. — Vol. 14, No. 1. — Art. 20. — DOI: 10.3390/ijgi14010020.

6. Pan H., Huang Y. TOD Typology and Station Area Vibrancy: An Interpretable Machine Learning Approach // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2024. — Vol. 186. — Art. 104150. — DOI: 10.1016/j.tra.2024.104150.

7. Shen H., Ma G. TOD Mode: Study on Land Planning and Land Use Optimization for Urban Rail Transit Station Area // Archives of Transport. — 2023. — Vol. 66, No. 2. — P. 33–43. — DOI: 10.5604/01.3001.0016.3126.

8. Сальникова А. Д., Баните А. В., Плотников Д. Г., Кашталинский А. С. Формирование системы транспортно-пересадочных узлов в городской агломерации // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9, № 1. — С. 87–98. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-87-98.

9. Wang B., de Jong M., van Bueren E., Ersoy A., Meng Y. Transit-Oriented Development in China: A Comparative Content Analysis of the Spatial Plans of High-Speed Railway Station Areas // Land. — 2023. — Vol. 12, No. 9. — Art. 1818. — DOI: 10.3390/land12091818.

10. Lee J., Salih S. H. Passive Transit Accessibility: Modelling and Application for Transit Gap Analysis and Station Area Assessment // Journal of Transport Geography. — 2024. — Vol. 114. — Art. 103757. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103757.

11. Yang W., Xu Q., Yi S., Shankar R., Chen T. Enhancing Transit-Oriented Development Sustainability Through the Integrated Node-Place-Ecology (NPE) Model

// Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2024. — Vol. 136. — Art. 104456. — DOI: 10.1016/j.trd.2024.104456.

12. Балакин В. В. Принципы формирования маршрутных систем общественного транспорта в зонах влияния пассажирских станций железной дороги // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — Вып. 4 (97). — С. 122–134. — DOI: 10.35211/18154360_2024_4_122.

13. Kang H., Miwa T. Systematic Review and Methodological Comparison of TOD Typologies Based on the Node-Place Model // Journal of Transport Geography. — 2025. — Vol. 128. — Art. 104373. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2025.104373.

14. Chen X., Shi Z., Hu Y. The Walkability Evaluation and Optimization Strategies of Metro Station Areas Taking Shanghai as an Example // Buildings. — 2025. — Vol. 15, No. 10. — Art. 1746. — DOI: 10.3390/buildings15101746.

15. Zheng W., Wei S. A Node-Place-Network-City Framework to Examine HSR Station Area Development Dynamics: Station Typologies and Development Strategies // Journal of Transport Geography. — 2024. — Vol. 120. — Art. 103993. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2024.103993.

16. Левашев А. Г. Роль городских транспортных коридоров в формировании агломераций // Вестник МГСУ. — 2023. — Т. 18, № 10. — С. 1532–1544. — DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1532-1544.

17. Li W., Talamini G., Li M., Villani C. Subway-City Interface in China: Inter-Urban Comparative Analysis of Station-Area Integration // Travel Behaviour and Society. — 2026. — Vol. 44. — Art. 101273. — DOI: 10.1016/j.tbs.2026.101273.

18. Tang W., Liu H., Zhou X., Liu Y., Shu M. Evaluation of Synergy between Urban Rail Transit and Land Use in Station Areas and Analysis of Spatial Differentiation Characteristics: The Case in Changsha, China // Journal of Urban Planning and Development. — 2025. — Vol. 151, No. 2. — DOI: 10.1061/JUPDDM.UPENG-5289.

19. Elwan K., Effat H., Yousry T. M., Abd-AlMoity E. A. Measuring Transit-Oriented Development Performance Around Metro Stations in Greater Cairo Using GIS-Based

Multi-Criteria Decision Analysis // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. — 2026. — Vol. 29, No. 3. — P. 537–550. — DOI: 10.1016/j.ejrs.2026.07.004.

References

1. Shajmardanova K. A. Klassifikaciya i tipologiya transportno-peresadochny`x ob``ektov v strukture krupnejshego goroda // Architecture and Modern Information Technologies. — 2024. — № 3 (68). — S. 200–211. — DOI: 10.24412/1998-4839-2024-3-200-211.

2. Li Y., Gu K. Urban Morphology and Transit-Oriented Development (TOD): Planning and Managing Urban Change in New Zealand // Cities. — 2025. — Vol. 167. — Art. 106407. — DOI: 10.1016/j.cities.2025.106407.

3. Yao C., Li G., Yan S. Design Strategies to Improve Metro Transit Station Walking Environments: Five Stations in Chongqing, China // Buildings. — 2024. — Vol. 14, No. 4. — Art. 1025. — DOI: 10.3390/buildings14041025.

4. P`yankov Ya. O., Penkina I. E., Belyakov V. A. Osobennosti formirovaniya territorii Ekaterinburga s uchetom funkcionirovaniya transportno-peresadochny`x uzlov // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. — 2025. — № 1 (64). — S. 43–49. — DOI: 10.25628/UNIIP.2025.64.1.025.

5. Fan J., Shi Z., Liu J., Wang J. Space Efficiency of Transit-Oriented Station Areas: A Case Study from a Complex Adaptive System Perspective // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2025. — Vol. 14, No. 1. — Art. 20. — DOI: 10.3390/ijgi14010020.

6. Pan H., Huang Y. TOD Typology and Station Area Vibrancy: An Interpretable Machine Learning Approach // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2024. — Vol. 186. — Art. 104150. — DOI: 10.1016/j.tra.2024.104150.

7. Shen H., Ma G. TOD Mode: Study on Land Planning and Land Use Optimization for Urban Rail Transit Station Area // Archives of Transport. — 2023. — Vol. 66, No. 2. — P. 33–43. — DOI: 10.5604/01.3001.0016.3126.

8. Sal`nikova A. D., Banite A. V., Plotnikov D. G., Kashtalinskij A. S. Formirovanie

sistemy` transportno-peresadochny`x uzlov v gorodskoj aglomeracii // Avtomatika na transporte. — 2023. — T. 9, № 1. — S. 87–98. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-87-98.

9. Wang B., de Jong M., van Bueren E., Ersoy A., Meng Y. Transit-Oriented Development in China: A Comparative Content Analysis of the Spatial Plans of High-Speed Railway Station Areas // Land. — 2023. — Vol. 12, No. 9. — Art. 1818. — DOI: 10.3390/land12091818.

10. Lee J., Salih S. H. Passive Transit Accessibility: Modelling and Application for Transit Gap Analysis and Station Area Assessment // Journal of Transport Geography. — 2024. — Vol. 114. — Art. 103757. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103757.

11. Yang W., Xu Q., Yi S., Shankar R., Chen T. Enhancing Transit-Oriented Development Sustainability Through the Integrated Node-Place-Ecology (NPE) Model // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2024. — Vol. 136. — Art. 104456. — DOI: 10.1016/j.trd.2024.104456.

12. Balakin V. V. Principy` formirovaniya marshrutny`x sistem obshhestvennogo transporta v zonax vliyaniya passazhirskix stancij zheleznoj dorogi // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2024. — Vy`p. 4 (97). — S. 122–134. — DOI: 10.35211/18154360_2024_4_122.

13. Kang H., Miwa T. Systematic Review and Methodological Comparison of TOD Typologies Based on the Node-Place Model // Journal of Transport Geography. — 2025. — Vol. 128. — Art. 104373. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2025.104373.

14. Chen X., Shi Z., Hu Y. The Walkability Evaluation and Optimization Strategies of Metro Station Areas Taking Shanghai as an Example // Buildings. — 2025. — Vol. 15, No. 10. — Art. 1746. — DOI: 10.3390/buildings15101746.

15. Zheng W., Wei S. A Node-Place-Network-City Framework to Examine HSR Station Area Development Dynamics: Station Typologies and Development Strategies // Journal of Transport Geography. — 2024. — Vol. 120. — Art. 103993. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2024.103993.

16. Levashev A. G. Rol` gorodskix transportny`x koridorov v formirovanii aglomeracij // Vestnik MGSU. — 2023. — T. 18, № 10. — S. 1532–1544. — DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1532-1544.

17. Li W., Talamini G., Li M., Villani C. Subway-City Interface in China: Inter-Urban Comparative Analysis of Station-Area Integration // Travel Behaviour and Society. — 2026. — Vol. 44. — Art. 101273. — DOI: 10.1016/j.tbs.2026.101273.

18. Tang W., Liu H., Zhou X., Liu Y., Shu M. Evaluation of Synergy between Urban Rail Transit and Land Use in Station Areas and Analysis of Spatial Differentiation Characteristics: The Case in Changsha, China // Journal of Urban Planning and Development. — 2025. — Vol. 151, No. 2. — DOI: 10.1061/JUPDDM.UPENG-5289.

19. Elwan K., Effat H., Yousry T. M., Abd-AlMoity E. A. Measuring Transit-Oriented Development Performance Around Metro Stations in Greater Cairo Using GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. — 2026. — Vol. 29, No. 3. — P. 537–550. — DOI: 10.1016/j.ejrs.2026.07.004.

Статья поступила в редакцию 05.08.2026; одобрена после рецензирования 04.09.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 05.08.2026; approved after peer review 04.09.2026; accepted for publication 08.10.2026.

2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)

Научная статья

УДК 711.4:004.92

СЕТЕВОЙ АНАЛИЗ ПЕШЕХОДНОЙ ДОСТУПНОСТИ ПОВСЕДНЕВНЫХ УСЛУГ В МОДЕЛИ 15-МИНУТНОГО ГОРОДА

Бузикаева Алина Валерьевна, кандидат технических наук, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Россия, Комсомольск-на-Амуре, alina.v_buzikaeva@yandex.ru;

Кошелев Александр Викторович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, Россия, Тамбов, koshelev.tambov@yandex.ru

Аннотация. Целью исследования является разработка методики количественной оценки пространственной доступности объектов повседневного обслуживания в логике концепции «15-минутного города» с учетом фактической топологии улично-дорожной сети. Методология основана на сетевом анализе в среде геоинформационных систем: изохроны пешеходной и велосипедной доступности рассчитываются с использованием многокомпонентного сетевого импеданса, после чего результаты проверяются с учетом пропускной способности объектов в разные периоды суток. Эмпирическую базу составили массивы данных о жилых зонах и точках интереса на территории Шанхая в ретроспективе 2011-2021 гг. Результаты пространственного моделирования показали существенный разрыв между формальным нормативным покрытием и фактической доступностью объектов обслуживания, обусловленный перегрузкой инфраструктуры, различиями в режимах работы объектов и физическими барьерами дорожной сети. Выявлены территории с недостаточной обеспеченностью услугами для уязвимых групп населения, на основе чего обоснованы стратегии развития и уплотнения сети объектов обслуживания,

включающие интеграцию первых этажей, формирование локальных многофункциональных хабов и применение инструментов тактического урбанизма. Практическая значимость работы определяется возможностью непосредственного внедрения предложенного диагностического инструментария при корректировке генеральных планов и программ комплексного развития территорий в условиях перехода к полицентрической модели расселения.

Ключевые слова: градостроительство, концепция «15-минутного города», пространственная доступность, сетевой анализ ГИС, сетевой импеданс, изохроны, объекты повседневного обслуживания, полицентризм, тактический урбанизм, пространственная справедливость.

Original article

NETWORK ANALYSIS OF WALKING ACCESSIBILITY OF EVERYDAY SERVICES IN A 15-MINUTE CITY MODEL

Buzikaeva Alina Valerevna, Candidate of Technical Sciences, Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, alina.v_buzikaeva@yandex.ru;

Koshelev Aleksandr Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov, Russia, koshelev.tambov@yandex.ru

Abstract. The aim of this study is to develop a methodology for quantitatively assessing the spatial accessibility of everyday service facilities within the logic of the "15-minute city" concept, taking into account the actual topology of the street and road network. The methodology is based on network analysis in a geographic information system environment, where pedestrian and bicycle accessibility isochrones are calculated using multi-component network impedance and subsequently verified through the capacity of facilities at various time intervals. The empirical base consisted

of datasets on residential areas and points of interest in Shanghai for the period 2011-2021. The results of spatial modeling revealed a significant gap between formal regulatory coverage and actual service accessibility, caused by infrastructure congestion, asynchronous operating modes, and physical barriers in the road network. We identified areas of deficient provision for vulnerable demographic cohorts, which served as the basis for substantiating strategies for densifying the service fabric, including integrating ground floors, creating local multifunctional hubs, and using tactical urbanism tools. The practical significance of this work lies in the potential for the immediate implementation of the proposed diagnostic tools when adjusting master plans and integrated development programs for territories in the context of the transition to a polycentric settlement model.

Keywords: urban planning, 15-minute city concept, spatial accessibility, GIS network analysis, network impedance, isochrones, amenities, polycentricity, tactical urbanism, spatial justice.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Проблема пространственной организации городских территорий, обеспечивающей повседневные потребности населения без чрезмерной зависимости от индивидуального автомобильного транспорта, занимает центральное место в дискуссиях об устойчивом развитии урбанизированных территорий. Истоки данной проблематики относятся к послевоенному периоду массовой автомобилизации, когда, как убедительно демонстрируют исследователи [1], проектирование городских магистралей и развязок подчинило себе логику расселения, породив феномен бесконтрольного расползания застройки. Доминирование частного автотранспорта в структуре городских поездок повлекло за собой ряд негативных последствий - от деградации биоразнообразия при освоении периферийных земель до хронического ухудшения качества атмосферного воздуха в жилых кварталах. Эпплъярд ещё в начале 1980-х гг. обратил внимание на то, что транспортная нагрузка

трансформирует социальное пространство, разрушая соседские связи и увеличивая финансовые издержки домохозяйств, вынужденных компенсировать территориальную разобщённость мест приложения труда, объектов обслуживания и рекреации [2].

Модернистская парадигма планирования, ассоциируемая, прежде всего, с идеями Ле Корбюзье о функциональном разделении городских зон, заложила институциональный фундамент для формирования моноцентричных структур, в которых массивы оказываются отделёнными значительными расстояниями от деловых, торговых и культурных ядер. Джейн Джекобс в своей критике подобной доктрины квалифицировала предложение о радикальном сносе и перепланировке кварталов как «наиболее драматическую идею» в истории градостроительства, указывая на то, что автомобильно-ориентированная модель неизбежно порождает социальную фрагментацию и экономическое неравенство [3]. Ньюман и Кенуорти впоследствии документировали, как нарастающая автомобилизация городов вступила в системное противоречие с задачами снижения углеродных выбросов и рационального землепользования, закрепив зависимость целых агломераций от ископаемого топлива [4]. Пандемия коронавирусной инфекции 2020 года выявила структурную уязвимость подобных территориальных конфигураций: локдауны и ограничения передвижения затруднили удовлетворение элементарных бытовых потребностей миллионов горожан, проживающих в периферийных спальных районах без развитой инфраструктуры шаговой доступности [5].

На фоне такого переосмысления подходов к городскому развитию широкое распространение получила концепция, сформулированная Карлосом Морено в 2016 году под названием «город четверти часа». В развёрнутом виде данная доктрина изложена в монографии Морено «Droit de cité: De la "ville-monde" à la "ville du quart d'heure"», а также в статье Морено, Аллама, Шабю, Галль и Пратлонга (Moreno et al., 2021), опубликованной в журнале Smart Cities. Суть концепции выражается в принципе «хроноурбанизма»: качество городской

жизни обратно пропорционально времени, затрачиваемому жителем на перемещение между точками повседневной активности, причём речь идёт преимущественно о пешеходном или велосипедном радиусе, не превышающем пятнадцати минут. Морено выделяет шесть базовых социальных функций, которые должны быть обеспечены в пределах указанного временного контура: проживание, трудовая занятость, торговля и бытовое обслуживание, медицинская помощь, образование и досуг. Достижение данного условия, согласно авторской позиции, требует одновременного соблюдения плотности, близости, разнообразия и цифровизации [6].

Практическое воплощение концепция получила в Париже, где мэр Анн Идальго в рамках предвыборной программы «Paris en Commun» 2020 года включила эту модель в стратегические документы городского развития, одержав убедительную победу на муниципальных выборах в июне того же года [7]. Впоследствии интерес к данной планировочной модели проявили международные структуры различного профиля: сеть C40 Cities, Всемирная организация здравоохранения, программа ООН-Хабитат и Организация экономического сотрудничества и развития. Временные инфраструктурные решения, стихийно возникшие в период пандемии, велосипедные полосы в Берлине и Боготе, микро-рынки в Роттердаме, лабиринтные парки в Вене, контейнерные госпитали в Турине, оказались эмпирическим подтверждением жизнеспособности принципа близости и послужили аргументом в пользу его закрепления в долгосрочных планировочных документах.

На материале Шанхая авторы исследовали пятнадцатиминутные пешеходные микрорайоны с акцентом на медико-санитарные аспекты и выявили, что неравномерное распределение объектов обслуживания воспроизводит социальное неравенство между возрастными и доходными когортами [8]. В работе [9] предложена вариация модели с двадцатиминутным радиусом на примере города Темпе в Аризоне. Оба указанных подхода разделяют с концепцией Морено базовую установку на сокращение

автомобильных поездок, однако расходятся в трактовке приоритетных функций и допустимых дистанций.

Переход к модели смешанного использования территорий представляет собой необходимый, но недостаточный этап на пути к реализации принципа хроноурбанизма. Традиционное зонирование, унаследованное от афинских хартий и закрепленное в нормативных документах большинства стран, предполагает жёсткое разделение зон, что увеличивает среднюю длину поездок и нагрузку на транспортный каркас. Смешанное использование допускает сосуществование жилья, объектов торговли, учреждений образования и рекреационных пространств в пределах одного квартала или даже здания. Компактная застройка одновременно снижает энергопотребление, повышает плотность социальных контактов и сокращает потребность в автомобильных перемещениях [10]. П. П. Спирин и соавт. дополняют данный тезис наблюдением о том, что разнообразие функций в непосредственном окружении жилища стимулирует гражданскую активность и укрепляет локальную идентичность [11]. Тем не менее, наложение разнородных функций на единую территорию не гарантирует равномерной пространственной доступности для всех групп населения, особенно если внутри квартала сохраняются барьеры в виде магистралей, промышленных зон или топографических препятствий.

Полицентризм выступает следующей ступенью территориальной реорганизации, преодолевающей ограничения как моноцентричной модели, так и точечного смешанного использования. Если смешанное использование решает задачу функциональной интеграции на уровне отдельного квартала, то полицентрическая структура распределяет узлы активности по всей территории агломерации, формируя сеть взаимодополняющих центров различного масштаба и специализации. Речь идёт о переходе к сети локальных кварталов, каждый из которых обладает достаточным набором объектов обслуживания для реализации шести базовых функций, а межцентровые связи обеспечиваются общественным транспортом и цифровыми платформами. Оптимальная плотность застройки в

полицентрической конфигурации позволяет локализовать энергогенерацию, продовольственное снабжение и многофункциональное использование общественных пространств, избегая при этом перегрузки инфраструктуры, характерной для сверхплотных моноцентров [12]. Л.В. Задвернюк, в свою очередь, настаивает на том, что подлинная полицентричность невозможна без приоритета пешеходного и велосипедного движения на уровне каждого узла, поскольку именно масштаб человеческого тела определяет радиус повседневной активности [13].

Оценка того, насколько конкретная городская территория соответствует критериям пятнадцатиминутной доступности, требует инструментария, способного оперировать реальной дорожной сетью, а не абстрактными евклидовыми расстояниями. Разработана диагностическая система оценки «жизненного круга» сообщества на основе городских данных из нескольких источников, включающая индексы справедливости, доступности и разнообразия для шестнадцати типов объектов обслуживания в семи категориях. Авторы применили буферный анализ с радиусом 1000 метров, построенный вдоль пешеходной сети в среде ArcGIS, к данным о 27466 жилых зонах Шанхая и 119571 точке интереса, полученным из картографического сервиса Amap. Результаты пространственного сравнения Пекина, Шанхая, Шэньчжэня и Уханя продемонстрировали, что средний коэффициент покрытия объектами обслуживания в Шанхае составляет 82,4%, тогда как в Пекине он не превышает 75,1%, причём разрыв между центральными районами и периферией в Пекине и Шанхае значительно превышает аналогичный показатель для Шэньчжэня, где распределение инфраструктуры характеризуется большей равномерностью [2]. Лонгитюдный анализ Шанхая за 2011 год, 2016 год и 2021 год зафиксировал рост среднего покрытия до 82,4%, при этом наиболее существенная динамика наблюдалась в сегменте спортивных и культурных объектов, а наименьшая - в сфере услуг для пожилых [4].

Сетевой анализ в среде геоинформационных систем предоставляет

методологическую основу для перевода нормативных требований к доступности в количественно измеримые показатели, учитывающие топологию улично-дорожной сети, режимы одностороннего движения, пешеходные переходы, перепады рельефа и фактическую связность маршрутов. В отличие от буферного анализа, сетевое моделирование позволяет вычислять изохроны реального времени перемещения и идентифицировать участки, формально находящиеся в пределах заданного радиуса, но труднодостижимые из-за разрывов в пешеходной инфраструктуре. Заложены теоретические основы модели максимального покрытия, впоследствии развитые в [14] применительно к распределению населения Кардиффа в контексте непрерывной пространственной оптимизации. Интеграция подобных моделей с актуальными данными о плотности населения, демографическом профиле и функциональном назначении застройки открывает возможность не только констатировать существующие дефициты, но и прогнозировать эффект планируемых градостроительных решений.

Данное исследование направлено на разработку и апробацию методики оценки пространственной доступности услуг в логике «15-минутного города» с применением сетевого анализа геоинформационных систем.

Научная новизна работы состоит в сочетании концепции хроноурбанизма с количественными методами ГИС-моделирования, учитывающими реальную топологию дорожной сети, что преодолевает ограничения евклидовых и буферных подходов, зафиксированные в предшествующих исследованиях.

Практическая значимость определяется возможностью использования полученных результатов при корректировке генеральных планов, программ комплексного развития территорий и нормативов размещения объектов социальной инфраструктуры в условиях перехода от функционального зонирования к полицентрической модели расселения.

Методология исследования. Расчёт изохрон пешеходной и велосипедной доступности выполнен в модуле Network Analyst программного обеспечения

ArcGIS Pro 3.1 с использованием топологически корректного графа улично-дорожной сети, извлечённого из данных OpenStreetMap и верифицированного по материалам муниципальной геопортальной платформы. Каждому ребру графа присвоен базовый импеданс, выраженный в минутах перемещения при средней пешеходной скорости 4,5 км/ч, что соответствует нормативной скорости, принятой в китайской практике планирования жизненных кругов [2], [3]. Для велосипедного режима базовая скорость установлена на уровне 14 км/ч с поправкой на тип покрытия и наличие выделенной полосы.

Сетевой импеданс каждого ребра рассчитан как аддитивная функция четырёх составляющих. Первая - временная задержка на светофорных объектах, определяемая по эмпирическим данным фаз регулирования, полученным из открытых массивов муниципального департамента транспорта: для нерегулируемых пересечений задержка принята равной нулю, для регулируемых - от 20 до 75 секунд в зависимости от длительности запрещающей фазы. Вторая составляющая учитывает перепады высот: на участках с продольным уклоном свыше 4 % введён мультипликатор 1,3 к базовому времени, при уклоне свыше 7 % - мультипликатор 1,7, что согласуется с рекомендациями [4] относительно влияния рельефа на привлекательность пеших и велосипедных маршрутов. Третья компонента отражает безопасность перехода через проезжую часть: на участках с многополосными магистралями без подземного или надземного перехода импеданс увеличен на 15 секунд, при отсутствии тротуара на одной из сторон улицы ребро исключено из пешеходного графа. Четвёртая составляющая моделирует влияние плотности застройки на скорость перемещения в условиях насыщенного пешеходного потока в часы пик, для чего использованы данные переписи 2021 года по численности населения в каждой жилой зоне.

Изохроны построены для трёх временных порогов 5, 10 и 15 минут отдельно для пешеходного и велосипедного режимов. Граница пятнадцатиминутной изохроны при пешем перемещении соответствует приблизительно одному километру по дорожной сети [2], при велосипедном -

около 3,2-3,5 километров. Генерация полигонов изохрон выполнена методом построения выпуклых оболочек по узлам графа, достижимым в пределах заданного порога, с последующей интерполяцией по методу Байесовского кригинга для получения непрерывных полей доступности.

Оценка обеспеченности объектами социально-культурного и бытового обслуживания проведена по номенклатуре шестнадцати типов объектов, объединённых в семь категорий, заимствованной из диагностической системы [2]: образование (детский сад, начальная школа, средняя школа), культура (библиотека, культурный центр, клубное помещение), спорт (площадка, спортивный центр, фитнес-клуб), администрирование (районное управление, общественный центр, судебный офис), торговля (продовольственный рынок, почтовое отделение), обслуживание пожилых (учреждение геронтологического профиля), медицинская помощь (центр первичного звена). Для каждой жилой зоны, идентифицированной по данным платформы Lianjia и картографического сервиса Amap, определено число объектов каждого типа, попадающих в соответствующую изохрону, после чего вычислены коэффициент покрытия, индекс доступности и индекс разнообразия Шеннона-Винера.

Коэффициент покрытия для жилой зоны k по типу сервиса i определён соотношением (1):

$$f(C_{ki}) = 1, \text{если } C_{ki} \leq 1000 \text{ м};\ f(C_{ki}) = 0, \text{если } C_{ki} > 1000 \text{ м} \quad (1)$$

где

C_{ki} - расстояние по дорожной сети от зоны k до ближайшего объекта типа i.

Агрегированный коэффициент покрытия CR_i рассчитан как доля покрытых зон от общего числа m зон в исследуемой территории, исходя из формулы (2):

$$CR_i = \frac{\Sigma f(C_{ki})}{m} \quad (2)$$

Индекс доступности A_k для зоны k вычислен по формуле (3):

$$A_k = \sum W_i * F_{ki} \quad (3)$$

где

W_i - весовой коэффициент типа i, полученный методом анализа иерархий на основе экспертных оценок пятидесяти специалистов в области градостроительного планирования [2];

F_{ki} - нормированный количественный показатель объектов типа i в зоне k.

Весовые коэффициенты распределены следующим образом: образование - 0,1941, торговля - 0,1827, медицина - 0,1588, спорт - 0,1469, культура - 0,1310, обслуживание пожилых - 0,0987, администрирование - 0,0878.

Индекс разнообразия H_k определён по формуле Шеннона-Винера (4):

$$H_k = -\sum \frac{n_i}{N} * \ln\left(\frac{n_i}{N}\right) \quad (4)$$

где

n_i - число объектов типа i в изохроне зоны k;

N - суммарное число объектов всех типов.

Пропускная способность объектов учтена посредством введения коэффициента загрузки, равного отношению численности населения в зоне обслуживания к нормативной вместимости объекта. Для образовательных учреждений нормативная вместимость принята по числу мест, для медицинских центров - по пропускной способности в смену, для торговых объектов - по площади торгового зала. Режим работы учтён путём построения изохрон для трёх временных срезов: утренний (7:00-9:00), дневной (12:00-14:00) и вечерний (18:00-20:00), что позволяет выявить сервисы, недоступные в определённые периоды суток.

Выявление дефицитных зон выполнено путём наложения полигонов изохрон на слой жилых зон с последующей идентификацией участков, в которых хотя бы один из обязательных типов сервисов отсутствует в пределах пятнадцатиминутной пешей изохроны. Обязательные типы определены по результатам анкетирования 412 жителей и 26 председателей квартальных комитетов Шанхая [2]: медицинский центр, продовольственный рынок, начальная школа и учреждение геронтологического профиля отнесены к

некомпенсируемым, остальные категории допускают взаимную заменяемость.

Результаты исследования. Пространственное моделирование пешеходных изохрон выявило выраженную территориальную неоднородность доступности объектов повседневного обслуживания в рассматриваемых районах Шанхая. Согласно представленным сравнительным показателям, средний коэффициент покрытия объектами обслуживания составляет 94,7 % для центральной части и 70,1 % для периферийных территорий. Различие между указанными значениями достигает 24,6 процентного пункта, что характеризует существенную пространственную дифференциацию обеспеченности населения городской инфраструктурой. Невзвешенное среднее двух территориальных показателей составляет 82,4 %, однако его нельзя отождествлять с общегородским коэффициентом доступности без учёта численности населения и состава исследуемых территориальных единиц. Следовательно, сопоставление центральных и периферийных районов должно основываться на единообразном определении коэффициента покрытия и разграничении локальных, территориально усреднённых и общегородских оценок (таблица 1).

Таблица 1 - Коэффициенты покрытия объектами обслуживания по категориям в центральной и периферийной зонах исследуемого района, %

Категория сервиса	Центральная зона	Периферийная зона	Разрыв
Образование (среднее по трём подтипам)	95,2	79,9	15,3
Культура (среднее по трём подтипам)	79,2	42,9	36,3
Спорт (среднее по трём подтипам)	95,6	75,3	20,3
Администрирование	96,5	57,5	39,0
Торговля	99,6	97,7	1,9
Обслуживание пожилых людей	75,8	54,3	21,5
Медицина	90,6	82,1	8,5
Все категории	94,7	70,1	24,6

Источник: разработано авторами.

Наибольший дефицит зафиксирован по учреждениям культурного профиля: покрытие клубными помещениями в периферийной зоне составляет лишь 30% против 58,6% в центральной. Библиотечное обслуживание

периферийных жилых массивов обеспечено на 41,5%, что почти вдвое ниже центрального показателя 87,7%. Учреждения геронтологического профиля демонстрируют разрыв в 21,5 п.п., что приобретает актуальность в условиях старения населения Шанхая, где доля жителей старше шестидесяти лет достигла 23,38% по данным седьмой национальной переписи 2021 года (рисунок 1).

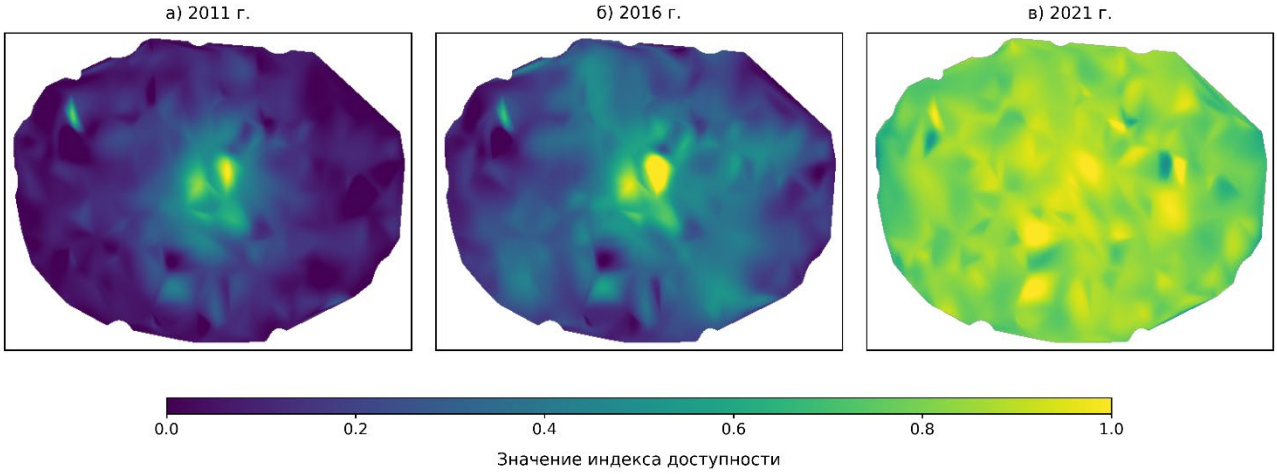


Рисунок 1 - Пространственное распределение индекса доступности в исследуемом районе по данным интерполяции Байесовского кригинга (источник: разработано авторами)

В 2011 году зоны с высоким индексом локализованы в ядре центральной части района, а вся периферия характеризуется низкими значениями. К 2016 году, когда началась реализация программы планирования жизненных кругов сообщества в Шанхае, зоны повышенных значений индекса появляются и в так называемых «новых центрах» периферийных административных округов. К 2021 году зоны низких значений существенно сокращаются, однако не исчезают полностью, концентрируясь в наиболее удалённых жилых массивах, не охваченных реконструкцией дорожной сети.

Анализ дефицита с учётом пропускной способности объектов выявил дополнительные ограничения, не фиксируемые простым подсчётом наличия сервиса в изохроне. Так, в трёх периферийных жилых зонах с совокупным населением около 48 тысяч человек формально присутствуют медицинские центры первичного звена, однако их нормативная пропускная способность составляет 320 посещений в смену при фактической потребности, рассчитанной

по численности обслуживаемого населения, в 610 посещений. Коэффициент загрузки данных объектов достигает 1,9, что делает пятнадцатиминутную доступность номинальной: жители вынуждены ожидать приёма или обращаться в удалённые учреждения. Аналогичная ситуация характерна для двух начальных школ в юго-восточной части района, где число учеников превышает проектную вместимость на 22%, что приводит к организации обучения в две смены и сокращению временного окна доступности для работающих родителей.

Учёт режима работы объектов обнаружил, что 34% продовольственных рынков в периферийной зоне функционируют исключительно до 19:00, тогда как значительная часть трудоспособного населения возвращается домой после 19:30. Вечерняя изохрона (18:00-20:00) для данной категории сервисов, таким образом, не покрывает до 18% жилых зон, формально входящих в дневную зону обслуживания. Почтовые отделения работают в будние дни до 17:00, что делает их недоступными для населения, работающего по стандартному графику.

Идентификация участков, где ни один из обязательных типов сервисов не достижим в пределах пятнадцатиминутной пешей изохроны, выявила 47 жилых зон с совокупным населением приблизительно 112 тысяч человек. Данные зоны расположены вдоль магистралей с четырьмя и более полосами движения, где отсутствие подземных или надземных переходов создаёт фактический барьер, нарушающий пешеходную связность. В пределах велосипедной изохроны число дефицитных зон сокращается до 19, что подтверждает компенсаторную роль велосипедной инфраструктуры, однако для пожилых жителей и семей с малолетними детьми данный режим перемещения остаётся малопригодным.

Стратегии уплотнения сервисной ткани в выявленных дефицитных зонах рассмотрены в трёх взаимодополняющих направлениях. Первое предполагает использование помещений первых этажей жилых зданий для размещения объектов повседневного обслуживания. Нормативная база Шанхая допускает перевод не менее 15% площади первых этажей в нежилой фонд при условии соблюдения санитарных разрывов и обеспечения пожарной безопасности. Для

47 дефицитных зон расчёт показал, что использование даже 8% существующей площади первых этажей позволяет разместить 12 продовольственных магазинов шаговой доступности, 5 амбулаторных пунктов и 3 клубных помещения, что сокращает число некомпенсированных зон до 21. Второе направление связано с формированием локальных сервисных хабов - компактных многофункциональных узлов, объединяющих в радиусе 200-300 метров медицинский пункт, отделение социального обслуживания, мини-библиотеку и площадку для физической активности. Подобные хабы соответствуют принципу разнообразия и смешанного использования, обеспечивая одновременное удовлетворение нескольких повседневных функций без необходимости последовательных перемещений. Третье направление опирается на инструменты тактического урбанизма: временное перепрофилирование участков улично-дорожной сети под сезонные рынки, организацию пешеходных зон в выходные дни, установку модульных конструкций для оказания медицинских и административных услуг. Опыт временных инфраструктур пандемийного периода - микро-рынки Тиммерманса в Роттердаме, контейнерные госпитали в Турине, лабиринтные парки Вены, подтверждает, что подобные решения способны в краткосрочной перспективе компенсировать дефицит капитальных объектов (таблица 2).

Таблица 2 - Характеристика дефицитных зон и предлагаемых мер уплотнения

Параметр	Исходное состояние	После интеграции первых этажей	После создания хабов	После тактических мер
Число дефицитных зон	47	21	11	4
Население в дефицитных зонах, тыс. чел.	112,0	51,3	27,8	9,4
Средний коэффициент покрытия обязательных сервисов	0,61	0,78	0,89	0,95
Доля зон с коэффициентом загрузки > 1,2, %	38	24	14	7
Число объектов, доступных в вечерний интервал, %	66	74	83	91

Источник: разработано авторами.

Обсуждение результатов исследования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что пространственная достижимость объектов повседневного обслуживания не является достаточным условием их фактической доступности. Дополнительное влияние оказывают пропускная способность учреждений, режимы работы, особенности пешеходной сети и наличие транспортных барьеров. Доля территориальных зон с коэффициентом загрузки объектов обслуживания более 1,2 составляла 38 %. В сценариях интеграции сервисных помещений в первые этажи жилых зданий, формирования локальных сервисных хабов и реализации тактических планировочных мероприятий соответствующие значения снижались до 24 %, 14 % и 7 %. Указанные показатели характеризуют долю расчётных территориальных единиц с повышенной нагрузкой на учреждения. Таким образом, результаты анализа подтверждают необходимость совместного учёта времени пешеходного перемещения, территориальной обеспеченности объектами и соответствия их пропускной способности расчётной потребности населения.

Сетевой импеданс, введённый в настоящем исследовании как многокомпонентная характеристика стоимости перемещения, оказался более информативным показателем, чем расстояние по дорожной сети. Учёт светофорных задержек увеличивает среднее время перемещения по пятнадцатиминутной изохроне на 8-12%, перепады высот добавляют 4-19% в зависимости от рельефа, а небезопасные переходы через многополосные магистрали фактически разрывают изохрону на изолированные фрагменты. Изъятие пространства у автомобильного движения в пользу пешеходов и велосипедистов способно нивелировать значительную часть данного импеданса, однако для этого требуется системное перепроектирование поперечных профилей улиц [4].

Сопоставление результатов с данными лонгитюдного анализа Шанхая показывает, что средний коэффициент покрытия вырос до 82,4%, причём наибольший прирост пришёлся на спортивные объекты и клубные помещения, а

наименьший - на учреждения геронтологического профиля. Индекс Шеннона-Винера для периферийных округов Чунмин, Фэнсянь, Цзядин и Цинпу снизился в период 2011-2016 гг., что авторы объясняют опережающим жилищным строительством по отношению к вводу сервисной инфраструктуры, и лишь после запуска программы планирования жизненных кругов в 2016 году тенденция развернулась. Данная динамика указывает на то, что без целенаправленного градостроительного регулирования рыночные механизмы самостоятельно не обеспечивают сбалансированного распределения объектов обслуживания.

Предложенные стратегии уплотнения представляют собой промежуточный инструмент, позволяющий сократить дефицит в течение двух-пяти лет до ввода постоянных объектов. Интеграция первых этажей, как показал расчёт, способна закрыть до 55% выявленных дефицитных зон при минимальных инвестициях в строительные конструкции. Тактический урбанизм выполняет роль оперативного реагирования и одновременно служит полигоном для проверки гипотез о востребованности конкретных сервисов до принятия решения о капитальном размещении.

Корректировка генерального плана исследуемого района, обоснованная результатами сетевого анализа, предполагает три группы мероприятий. В краткосрочной перспективе - пересмотр схем организации пешеходного движения на участках с выявленными барьерами: устройство трёх подземных и двух надземных переходов через магистральные улицы, оборудование семи нерегулируемых пересечений светофорами с приоритетной фазой для пешеходов. В среднесрочной перспективе - резервирование земельных участков под размещение четырёх многофункциональных сервисных хабов в зонах с коэффициентом покрытия ниже 0,65 и внесение соответствующих изменений в правила землепользования и застройки. В долгосрочной перспективе - пересмотр нормативов размещения объектов геронтологического профиля с учётом прогнозируемой динамики старения населения и введение обязательного учёта пропускной способности при согласовании проектов планировки территорий.

Ограничения проведённого исследования связаны с использованием усреднённых скоростных параметров перемещения, не дифференцированных по возрастным группам. Пожилые жители и дети обладают иной скоростью ходьбы и иными паттернами использования пространства. Кроме того, данные о фактических маршрутах передвижения, полученные из анонимизированных треков мобильных устройств, не использованы в полной мере по причине ограничений доступа к массивам.

Перспективным направлением дальнейшей работы является интеграция моделей сетевого анализа с данными о фактических перемещениях, полученными из транспортных карт и сервисов навигации.

Выводы. С теоретической точки зрения полученные результаты вносят вклад в обоснование перехода от моноцентрической модели расселения, унаследованной от модернистского зонирования и подвергнутой фундаментальной критике Джейн Джекобс, к полицентрической конфигурации. В такой конфигурации сетевой анализ ГИС может использоваться как диагностический инструмент для количественной оценки соответствия территории критериям хроноурбанизма и определения приоритетов инвестирования в условиях ограниченных ресурсов.

Практическая значимость работы определяется возможностью непосредственного использования разработанной методики при корректировке генеральных планов, программ комплексного развития территорий и нормативов размещения объектов социальной инфраструктуры.

Дальнейшая разработка концепции пятнадцатиминутного города требует применения современных исследовательских методов и оценки её возможностей как дополнения к классическим моделям пространственного анализа. В этом контексте сетевой анализ ГИС может служить практическим инструментом принятия обоснованных планировочных решений с учётом транспортных, социальных и экологических задач устойчивого развития городской среды.

Список литературы

1. Ахметова Д. Р., Сазонова Л. Д., Курлов А. В., Юрченко Д. А., Белова П. В., Егорова П. Г. Реализация концепции 15-минутного города на примере жилого комплекса «Зиларт» // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2025. – №. 3. – С. 73-85.

2. Гонюхов П. О., Шелудков А. В. Являются ли постсоветские города 15-минутными? Различия пешеходной доступности базовых городских услуг по морфотипам жилой застройки Краснодара, Саратова и Набережных Челнов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2025. – Т. 88. – №. 5. – С. 820-835.

3. Стрельникова А. В., Веригина Т. Е. Город технологичный или город «удобный»: урбанистические тенденции и их воплощение (на примере Москвы) // Мир России. Социология. Этнология. – 2023. – Т. 32. – №. 3. – С. 6-27.

4. Кондратенко Т. О., Корнев А. Н. Градостроительная концепция «15-минутный город» // Молодой исследователь Дона. – 2025. – Т. 10. – №. 5. – С. 156-159.

5. Шитова Ю. Ю., Власов Д. Н. Анализ локальной и глобальной динамики транспортной доступности агломерации // Теория и практика общественного развития. – 2026. – №. 5. – С. 177-189.

6. Разенков П. И., Корнилов А. Г. Обеспеченность общественным транспортом Белгородской агломерации как фактор устойчивого развития // Региональные геосистемы. – 2024. – Т. 48. – №. 2. – С. 162-173.

7. Лукьянчикова А. Д., Благова М. В. Многофункциональные жилые комплексы как инструмент полицентричного развития города (на примере Нальчика, КБР) // Вестник науки. – 2025. – Т. 1. – №. 4 (85). – С. 480-490.

8. Зотова М. В., Махрова А. Г., Глезер О. Б. Тенденции урбанистических исследований в России: тематика в свете современного состояния географической науки // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2025. – Т. 88. – №. 5. – С. 601-614.

9. Zakharchuk E. A., Trifonova P. S., Uporov V. E. The Cittaslow concept as a promising direction for the development of small and medium-sized cities in Russia // Digital Economy & Innovations. – 2024. – №. 1. – С. 5-17.

10. Балабейкина О. А., Кочетова А. С., Янковская А. А. Глобальный город как актор устойчивого развития: кейс Шанхая // Псковский регионологический журнал. – 2023. – Т. 19. – №. 1. – С. 3-17.

11. Спирин П. П., Друзина О. А., Акимов А. Д. Генеральный план как инструмент решения градостроительных задач инновационного развития столицы Кыргызской Республики города Бишкека // Academia. Архитектура и строительство. – 2026. – №. 1. – С. 82-95.

12. Коротковская Е. С. Цифровизация индустриальных парков: технологическая трансформация производственных территорий в контексте социально-экологической устойчивости // Цифровая социология/Digital Sociology. – 2026. – Т. 9. – №. 1. – С. 79-92.

13. Задвернюк Л. В. Современные тенденции урбанизации в условиях Дальнего Востока России // Урбанистика. – 2026. – №. 1. – С. 71-84.

14. Карчагин Е. В. Социальные потребности горожан: теоретико-методологические аспекты // Социология города. – 2023. – №. 1. – С. 5-19.

References

1. Akhmetova D. R., Sazonova L. D., Kurlov A. V., Yurchenko D. A., Belova P. V., Egorova P. G. Implementation of the 15-Minute City Concept Using the Zilart Residential Complex as an Example // Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography. - 2025. - No. 3. - P. 73-85.

2. Gonyukhov P. O., Sheludkov A. V. Are Post-Soviet Cities 15-Minute? Differences in Pedestrian Accessibility of Basic Urban Services by Residential Development Morphotypes in Krasnodar, Saratov, and Naberezhnye Chelny // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series. - 2025. - Vol. 88. - No. 5. - P. 820-835.

3. Strelnikova A. V., Verigina T. E. Technological City or "Convenient" City: Urban

Trends and Their Implementation (using Moscow as an Example) // The World of Russia. Sociology. Ethnology. - 2023. - Vol. 32. - No. 3. - P. 6-27.

4. Kondratenko T. O., Kornev A. N. Urban Development Concept "15-Minute City" // Young Researcher of the Don. - 2025. - Vol. 10. - No. 5. - P. 156-159.

5. Shitova Yu. Yu., Vlasov D. N. Analysis of Local and Global Dynamics of Transport Accessibility of an Agglomeration // Theory and Practice of Social Development. - 2026. - No. 5. - P. 177-189.

6. Razenkov P. I., Kornilov A. G. Provision of public transport in the Belgorod agglomeration as a factor in sustainable development // Regional geosystems. - 2024. - Vol. 48. - No. 2. - P. 162-173.

7. Lukyanchikova A. D., Blagova M. V. Multifunctional residential complexes as a tool for polycentric urban development (on the example of Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic) // Herald of Science. - 2025. - Vol. 1. - No. 4 (85). - P. 480-490.

8. Zotova M. V., Makhrova A. G., Glezer O. B. Trends in urban research in Russia: topics in light of the current state of geographical science // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series. - 2025. - Vol. 88. - No. 5. – P. 601-614.

9. Zakharchuk E. A., Trifonova P. S., Uporov V. E. The Cittaslow concept as a promising direction for the development of small and medium-sized cities in Russia // Digital Economy & Innovations. – 2024. – No. 1. – P. 5-17.

10. Balabeykina O. A., Kochetova A. S., Yankovskaya A. A. Global city as an actor of sustainable development: the case of Shanghai // Pskov regionalology journal. – 2023. – Vol. 19. – No. 1. – P. 3-17.

11. Spirin P. P., Druzina O. A., Akimov A. D. Master plan as a tool for solving urban planning problems of innovative development of the capital of the Kyrgyz Republic, Bishkek // Academia. Architecture and Construction. - 2026. - No. 1. - P. 82-95.

12. Korotkovskaya E. S. Digitalization of Industrial Parks: Technological Transformation of Production Areas in the Context of Social and Environmental Sustainability // Digital Sociology. - 2026. - Vol. 9. - No. 1. - P. 79-92.

13. Zadvernyuk L. V. Modern Trends of Urbanization in the Russian Far East // Urban

Studies. - 2026. - No. 1. - P. 71-84.

14. Karchagin E. V. Social Needs of Citizens: Theoretical and Methodological Aspects // Sociology of the City. - 2023. - No. 1. - P. 5-19.

Статья поступила в редакцию 08.05.2026; одобрена после рецензирования 15.06.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 08.05.2026; approved after peer review 15.06.2026; accepted for publication 08.10.2026.

Научная статья
УДК 711.4:551.58

РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА ВЕТРОВОГО КОМФОРТА ПЕШЕХОДНЫХ ПРОСТРАНСТВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МОРФОТИПАХ ЗАСТРОЙКИ

Олейникова Раиса Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент,
Керченский государственный морской технологический университет,
Россия, Керчь, raisa.oleinikova@inbox.ru

Аннотация. Формирование плотной городской застройки неизбежно изменяет аэродинамический режим приземного слоя, порождая локальные зоны ветрового дискомфорта и создавая риски для безопасности пешеходов. Традиционная практика оценки изолированных архитектурных объектов не отражает кумулятивного эффекта сложной городской среды. В статье предложен вероятностный подход к оценке ветрового комфорта на уровне градостроительных морфотипов. Численное моделирование выполнено с применением модели турбулентности Realizable k−ε в соответствии с методическими рекомендациями Архитектурного института Японии. Для перехода от осредненных полей скоростей к реальным условиям эксплуатации результаты CFD-расчетов для восьми основных румбов интегрированы с данными годовой розы ветров и распределением скоростей по закону Вейбулла. Критерии Лоусона адаптированы с учетом вероятности превышения пороговых значений для различных видов деятельности человека. Выявлены характерные особенности воздушных потоков при периметральной, строчной, башенной на стилобате и смешанной застройке. Установлено, что башенные комплексы генерируют наиболее обширные зоны нисходящих турбулентных потоков, тогда как строчная застройка при высоком отношении высоты здания к ширине улицы формирует выраженные аэродинамические коридоры. В работе также обсуждаются фундаментальные ограничения RANS-подхода в части моделирования нестационарных вихрей и формулируются практические

рекомендации по нивелированию рисков, включая скосы наветренных граней, устройство открытых первых этажей и использование древесных насаждений для ослабления сильных порывов ветра.

Ключевые слова: градостроительные морфотипы; ветровой комфорт пешеходных зон; вычислительная гидрогазодинамика (CFD); моделирование турбулентности; критерии оценки ветрового режима; аэродинамика городской застройки; градостроительное регулирование; вероятностный анализ.

Original article

ESTIMATED ASSESSMENT OF WIND COMFORT OF PEDESTRIAN SPACES WITH VARIOUS DEVELOPMENT TYPES

Oleinikova Raisa Evgenevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia, raisa.oleinikova@inbox.ru

Abstract. Dense urban development alters near-ground wind conditions, creating localized areas of wind discomfort and posing risks to pedestrian safety. Traditional assessments of isolated architectural features fail to capture the cumulative effects of a complex urban environment. This article proposes a probabilistic approach to assessing wind comfort at the level of urban morphotypes. Numerical modeling was performed using the Realizable k−ε turbulence model in accordance with the guidelines of the Architectural Institute of Japan. To translate averaged velocity fields into real-world operating conditions, CFD simulation results for the eight cardinal directions were integrated with annual wind rose data and a Weibull velocity distribution. Lawson criteria were adapted to account for the probability of exceeding threshold values for various types of human activity. Characteristic airflow patterns were identified for perimeter-block developments, linear layouts, towers on podiums, and mixed building configurations. It was found that tower complexes generate the most extensive zones of downward turbulent flows, while row buildings with high height-to-street-width

ratios form distinct aerodynamic corridors. The paper also discusses the fundamental limitations of the RANS approach for modeling unsteady vortices and formulates practical recommendations for risk mitigation, including the use of beveled windward faces, the use of porous ground floors, and the use of trees as a porous medium to dampen peak gusts.

Keywords: urban development morphotypes; wind comfort of pedestrian areas; computational fluid dynamics (CFD); turbulence modeling; wind regime assessment criteria; urban development aerodynamics; urban planning regulation; probabilistic analysis.

Введение. Интенсификация градостроительной деятельности и массовое возведение высотных доминант радикально трансформируют аэродинамический режим городских территорий [1]. Формирование зон с аномальными скоростями воздушных потоков на уровне пешехода представляет собой устойчивую проблему, которая в развитых странах фиксируется уже более трех десятилетий. Ветер, взаимодействуя с плотной городской тканью, порождает нисходящие потоки и угловые вихри, способные не только вызывать физический дискомфорт, но и создавать прямую угрозу безопасности граждан, повреждая уличную инфраструктуру или затрудняя передвижение [2].

Последствия таких явлений выходят за рамки инженерных задач и могут становиться причиной социальных конфликтов. Как показывает многолетний опыт Японии, конфликты между девелоперами и местными жителями из-за неблагоприятного ветрового климата регулярно перерастают в судебные разбирательства. В ответ на это органы местного самоуправления, например, правительство Токио, ввели обязательные процедуры предварительной оценки воздействия на окружающую среду для объектов высотой свыше 100 метров или с общей площадью более 100 000 м². Подобные административные регламенты подчеркивают: игнорирование ветрового фактора на стадии эскизного проектирования недопустимо и влечет за собой существенные репутационные и

финансовые риски для застройщиков [3], [4].

Между тем традиционный подход, при котором здание рассматривается как единственный источник возмущения воздушного потока, не позволяет в полной мере учитывать влияние окружающей застройки. Реальный городской ландшафт представляет собой сложную систему, где аэродинамическое влияние соседних объемов суммируется или, напротив, компенсируется [5-7]. Именно поэтому научное сообщество все чаще смещает фокус с точечного анализа отдельных сооружений на изучение градостроительных морфотипов. Морфотип, объединяющий кварталы со схожими параметрами плотности, этажности и конфигурации застройки, позволяет выявить системные закономерности формирования ветрового режима [8]. Такой подход дает возможность оценивать совокупное влияние городской среды, что принципиально недостижимо при изолированном рассмотрении каждого объекта в отрыве от его окружения.

Количественное описание ветровой обстановки сегодня опирается на два взаимодополняющих инструмента: физические эксперименты в аэродинамических трубах и численное моделирование методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD). При этом стремительный рост популярности CFD-расчетов потребовал выработки строгих критериев достоверности. В 2007 году Архитектурный институт Японии (AIJ) опубликовал фундаментальные рекомендации по практическому применению CFD для оценки ветровой среды вокруг зданий. Данный документ систематизировал требования к размерам вычислительной области, параметрам сеточных моделей, граничным условиям и схемам турбулентности, обеспечив сопоставимость результатов с данными натурных измерений [9]. Однако при применении осреднённых по Рейнольдсу моделей турбулентности (RANS) возникает несоответствие: расчёт даёт осреднённые скорости, тогда как классические критерии дискомфорта (например, методика Мураками, основанная на частоте ежедневных максимальных порывов) требуют учёта пиковых значений [10]. Это влечет за собой необходимость введения поправочных коэффициентов

порывистости, единый подход к определению которых пока не сформирован.

В свете изложенного, разработка методов оценки ветрового комфорта, адаптированных именно для типовых градостроительных морфотипов, выступает актуальной научно-технической задачей. Переход от фрагментарного анализа к комплексному моделированию городских кварталов позволит сформировать надежную доказательную базу для совершенствования нормативных требований [11]. Внедрение таких подходов в практику градостроительного регулирования обеспечит принятие обоснованных решений, направленных на создание безопасной и комфортной среды для пешеходов в условиях высокоплотной застройки.

Обзор литературы. Формирование плотной городской ткани влечет за собой радикальную трансформацию аэродинамического режима приземного слоя атмосферы. Взаимодействие воздушных потоков с массивными архитектурными объемами порождает сложные турбулентные структуры: нисходящие течения, угловые вихри и эффекты аэродинамической трубы в межквартальных пространствах. Как фиксируют Р. Йошие и М. Ооба (Yoshie & Ohba, 2009), проблема неблагоприятного ветрового режима вокруг высотных доминант остается острой социальной задачей уже более трех десятилетий, регулярно становясь причиной конфликтов между девелоперами и жителями. В ответ на это регуляторные практики, например, в Токио, обязывают застройщиков проводить оценку воздействия на окружающую среду для объектов высотой свыше 100 метров, используя данные аэродинамических труб или численного моделирования [12-14].

Традиционный подход, рассматривающий изолированное здание, уступает место анализу градостроительных морфотипов. Морфотип, объединяющий территории со схожими параметрами этажности, плотности и конфигурации, позволяет выявить системные закономерности ветрового режима, недостижимые при точечном анализе [15]. При этом численное моделирование методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD) стало доминирующим

инструментом исследования. Однако стремительный рост его применения потребовал унификации методологии. В 2007 году Архитектурный институт Японии (AIJ) опубликовал руководство по практическому применению CFD для оценки ветровой среды, систематизировавшее требования к размерам расчетной области, параметрам сетки и граничным условиям [16], [17].

Ключевой методологической сложностью остается сопоставление результатов CFD-расчетов с критериями комфорта. Большинство промышленных расчетов опираются на осредненные по Рейнольдсу модели турбулентности (RANS), выдающие средние скорости ветра. Между тем классические критерии, такие как методика Лоусона или подход Мураками, оперируют понятием ежедневных максимальных порывов. Прямое использование средних скоростей без введения поправочного коэффициента порывистости приводит к существенному занижению уровня дискомфорта. Кроме того, ветровой комфорт нельзя сводить к фиксированным пороговым значениям (например, 4, 6, 8 или 10 м/с) без учета вероятностного характера ветрового климата. При оценке необходимо учитывать частоту превышения пороговых скоростей для различных видов деятельности (сидения, стояния, ходьбы), годовую розу ветров и распределение скоростей для конкретного региона [18], [19]. Отдельно необходимо оценивать риски падения пешеходов и повреждения инфраструктуры при экстремальных порывах ветра.

Методы исследования. Объектом исследования выступили четыре базовых градостроительных морфотипа: периметральная застройка (закрытый квартал), строчная застройка, башенная застройка на стилобате и смешанная фрагментированная застройка. Для сопоставимости результатов площадь расчётного участка оставалась неизменной, а коэффициент застройки (BCR) и отношение высоты здания к ширине улицы (H/W) варьировались при сохранении сопоставимого коэффициента плотности застройки (FAR).

Численное моделирование выполнялось в программном комплексе ANSYS Fluent. По результатам предварительного сравнения расчётов с эталонными

данными аэродинамической трубы для одиночного высотного здания и квартальной застройки (Yoshie et al., 2007) была выбрана модель турбулентности Realizable k−ε. Данная модификация демонстрирует превосходство над стандартной моделью k−ε в прогнозировании зон отрыва потока и рециркуляции за препятствиями, оставаясь при этом менее ресурсоемкой, чем моделирование крупных вихрей (LES).

Расчетная область соответствовала рекомендациям AIJ: протяженность составляла 5H до наветренной границы, 15H за подветренной границей, по 5H с боковых сторон и 5H по высоте (где H – характерная высота застройки). На входе задавался логарифмический профиль скорости ветра $U(z) = \frac{u_*}{\text{к}} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ с соответствующими профилями турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации. Для моделирования растительности применялась модель пористой среды: в уравнение количества движения вводились дополнительные члены (модель Дарси–Форхгеймера), учитывающие аэродинамическое сопротивление крон деревьев и потерю импульса воздушного потока. Это позволяет количественно оценить ветрозащитный эффект озеленения.

Независимость решения от расчетной сетки подтверждалась методом Ричардсона на трех уровнях дискретизации (грубая, средняя, мелкая). Индекс сходимости сетки (Grid Convergence Index, GCI) для ключевых точек на уровне пешехода (1.5 м) не превышал 5%. Критерием сходимости итерационного процесса служило снижение невязок до 10^{-4} и стабилизация мониторинга скоростей в контрольных точках.

Для перехода от детерминированных полей скоростей к вероятностной оценке комфорта применялась процедура свертки. Результаты CFD-моделирования для восьми основных румбов (С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ) взвешивались согласно частотам повторяемости направлений ветра и распределению скоростей по закону Вейбулла для типичного крупного города умеренной климатической зоны. Пороговые значения комфорта по Лоусону адаптировались с использованием коэффициента порывистости 1.6 для перевода

средних скоростей RANS в пиковые значения: для длительного сидения предел составлял 2 м/с, для стояния – 3 м/с, для комфортной ходьбы – 5 м/с. Порог безопасности устанавливался на уровне 15 м/с (с учетом порывов).

Результаты исследования и их обсуждение. Проверка выбранного расчётного подхода по данным Yoshie et al. (2007) показала удовлетворительное совпадение результатов: среднеквадратичная ошибка (RMSE) профилей скорости в зонах рециркуляции не превышала 12%, что свидетельствует о применимости модели Realizable k−ε для задач градостроительной аэродинамики.

Анализ карт распределения скорости ветра на высоте 1,5 м позволил выявить характерные особенности воздушных потоков для каждого морфотипа. Периметральная застройка демонстрирует высокий уровень защиты внутреннего дворового пространства, где скорости редко превышают 2 м/с. Однако у наветренных углов таких кварталов наблюдается значительное локальное увеличение скорости воздушного потока. При строчной застройке и отношении H/W > 1,5 наблюдается выраженный эффект аэродинамической трубы: скорость ветра в межквартальных проходах возрастает, а доля площади, не соответствующей критерию комфорта для ходьбы, достигает 35–40 % при преобладающем направлении ветра вдоль улиц.

Наиболее неблагоприятные условия фиксируются в морфотипе башенной застройки на стилобате. Нисходящие потоки, ударяясь о широкую горизонтальную поверхность стилобата, растекаются во все стороны, создавая обширные зоны турбулентности и высоких скоростей на уровне пешехода. Чередование зданий разной высоты в смешанной застройке частично нарушает упорядоченность нисходящих потоков. При этом необходимо тщательно выбирать взаимное расположение зданий, чтобы избежать образования дополнительных зон ветрового дискомфорта с подветренной стороны (рисунок 1).

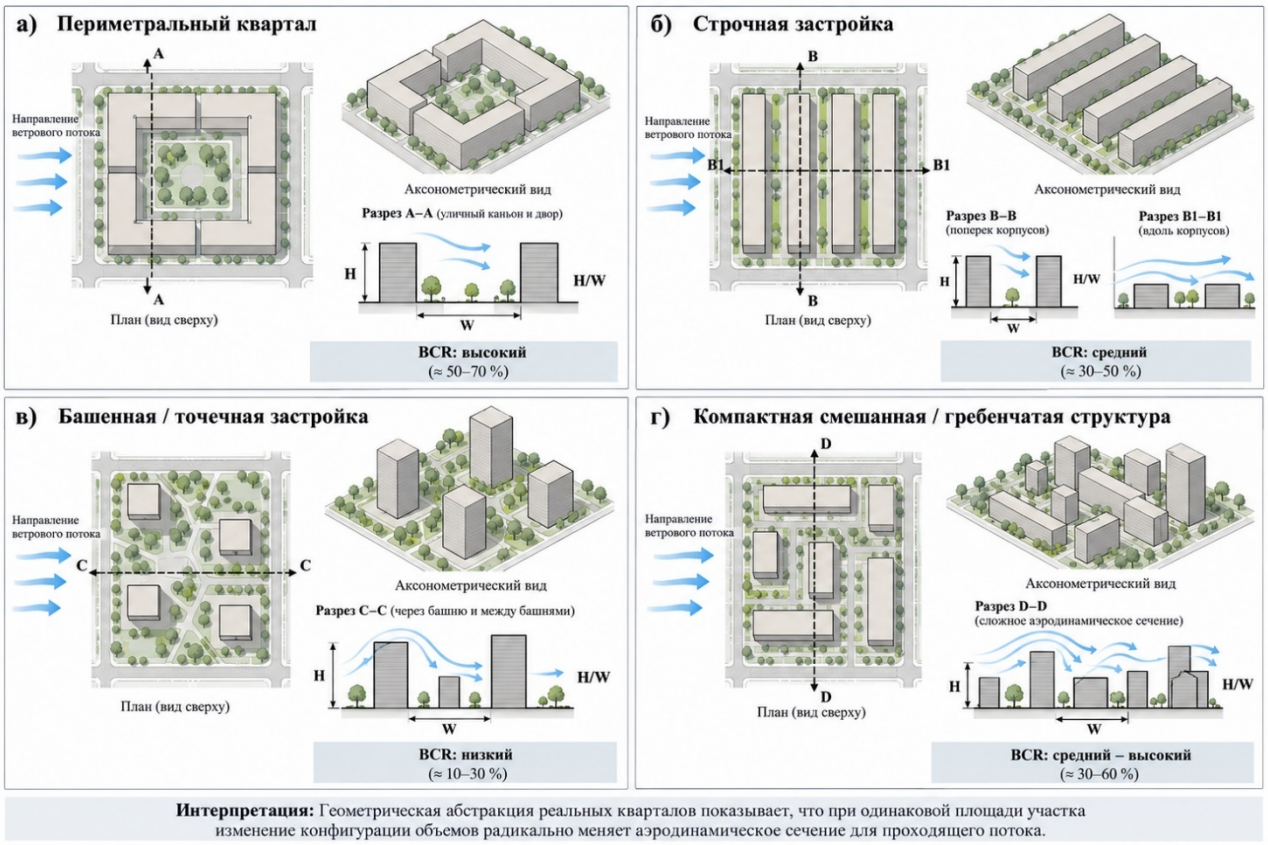


Рисунок 1 - Схематическое представление четырех исследуемых градостроительных морфотипов с указанием варьируемых параметров (H/W, BCR) и направлений расчетных разрезов (источник: разработано автором)

Главным авторским результатом исследования стала формализация безразмерных зависимостей между параметрами морфотипа и вероятностью ветрового дискомфорта (рисунок 2).

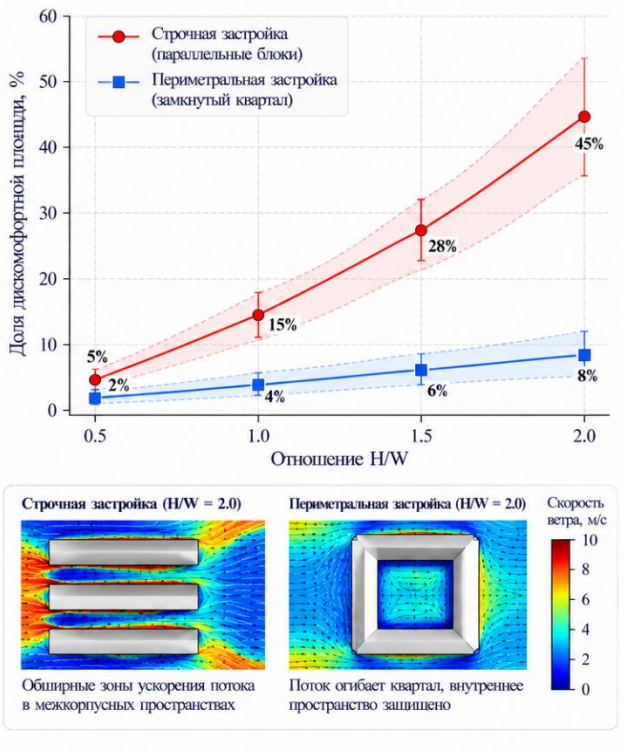


Рисунок 2 - График зависимости доли площади, не соответствующей критерию комфорта «ходьба» (вероятность превышения 5 м/с более 10% времени), от отношения H/W для строчной и периметральной застройки (источник: разработано автором)

Объединение результатов расчётов с данными годовой розы ветров позволило оценить ветровой комфорт с учётом климатических условий (рисунок 3).

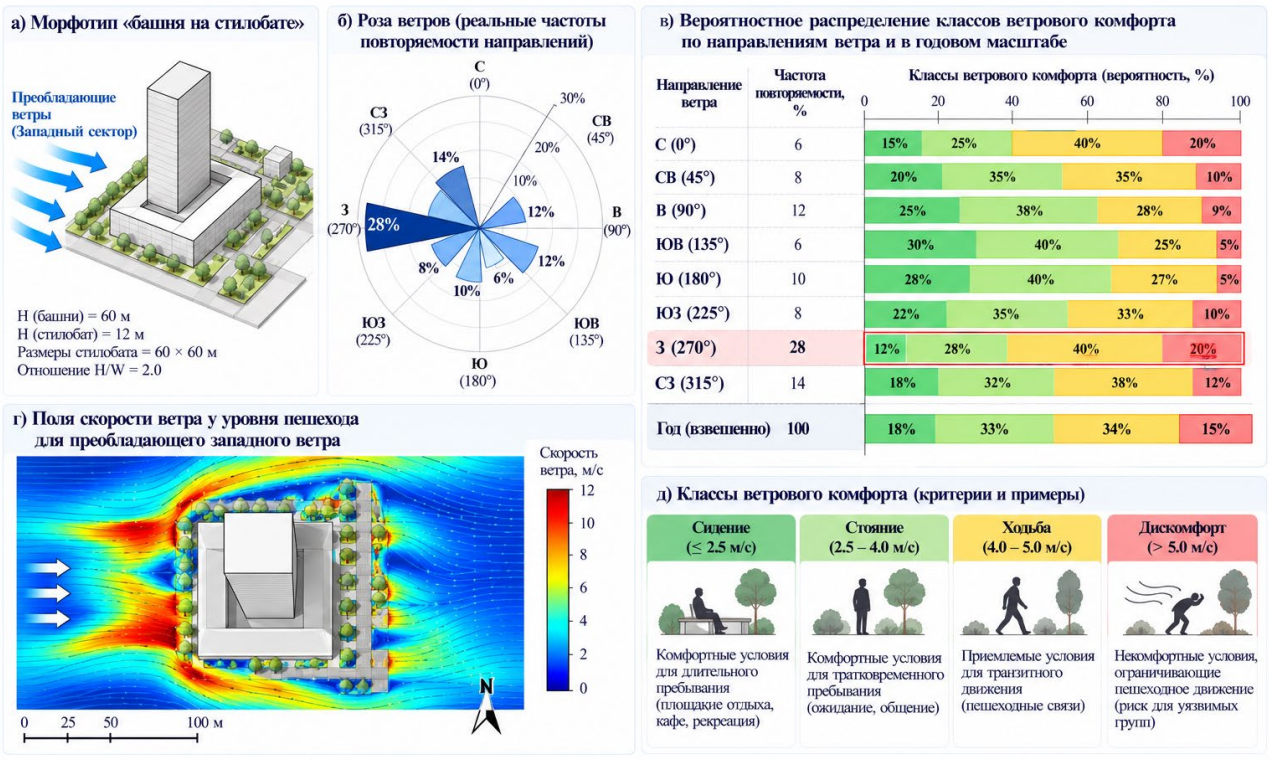


Рисунок 3 - Диаграмма вероятностного распределения классов ветрового комфорта (сидение, стояние, ходьба, дискомфорт) для морфотипа «башня на стилобате» с учетом реальных частот повторяемости направлений ветра (источник: разработано автором)

Разработанные градостроительные рекомендации базируются на количественной оценке эффективности конкретных архитектурных приемов. Скосы наветренных углов зданий (на уровне первых 3-5 этажей) снижают интенсивность угловых вихрей, уменьшая зону дискомфорта на 15-20% (рисунок 4).

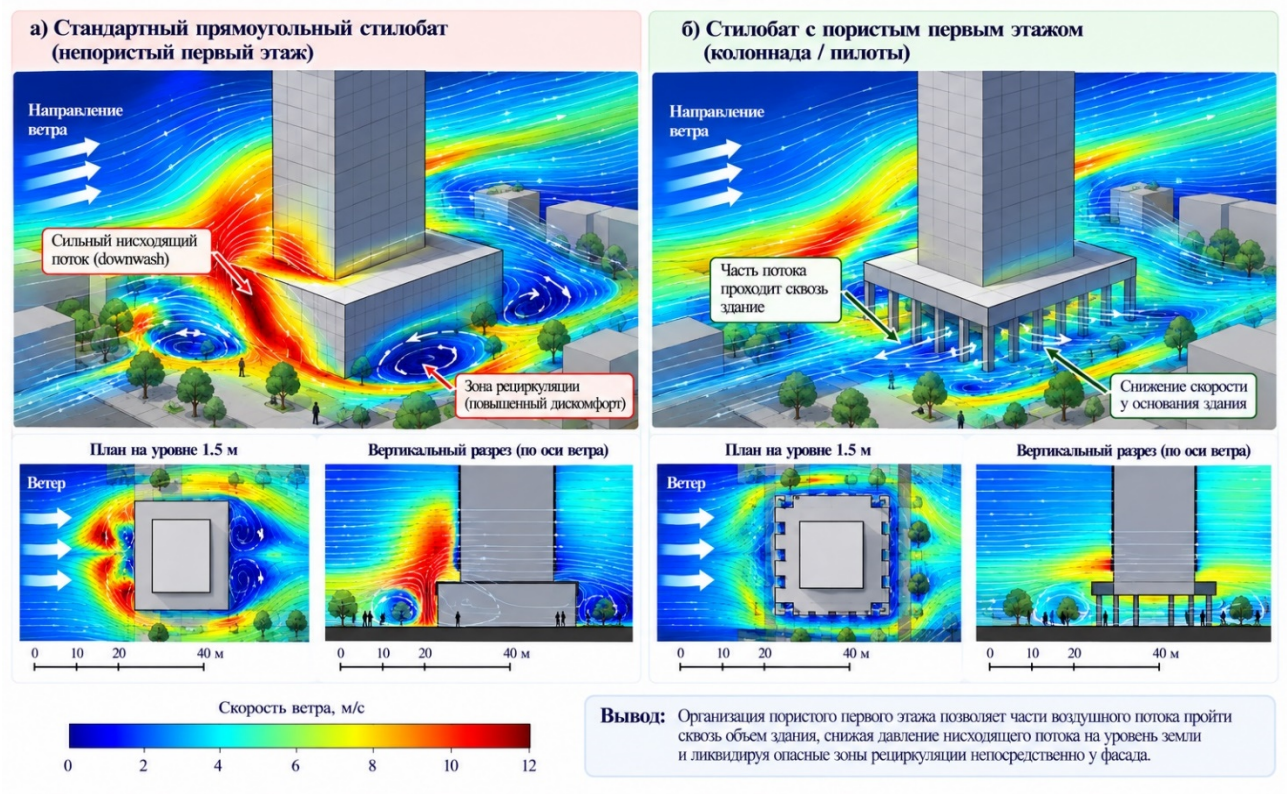


Рисунок 4 - Сравнение полей скоростей ветра у основания здания: а) стандартный прямоугольный стилобат; б) стилобат с пористым первым этажом (колоннада/пилоты) (источник: разработано автором)

Особое внимание уделено роли озеленения. Моделирование деревьев как пористой среды с заданным коэффициентом лобового сопротивления показало, что плотные рядовые посадки вдоль улиц способны снизить среднюю скорость ветра в зоне пешехода на 1.5–2.5 м/с (рисунок 5).

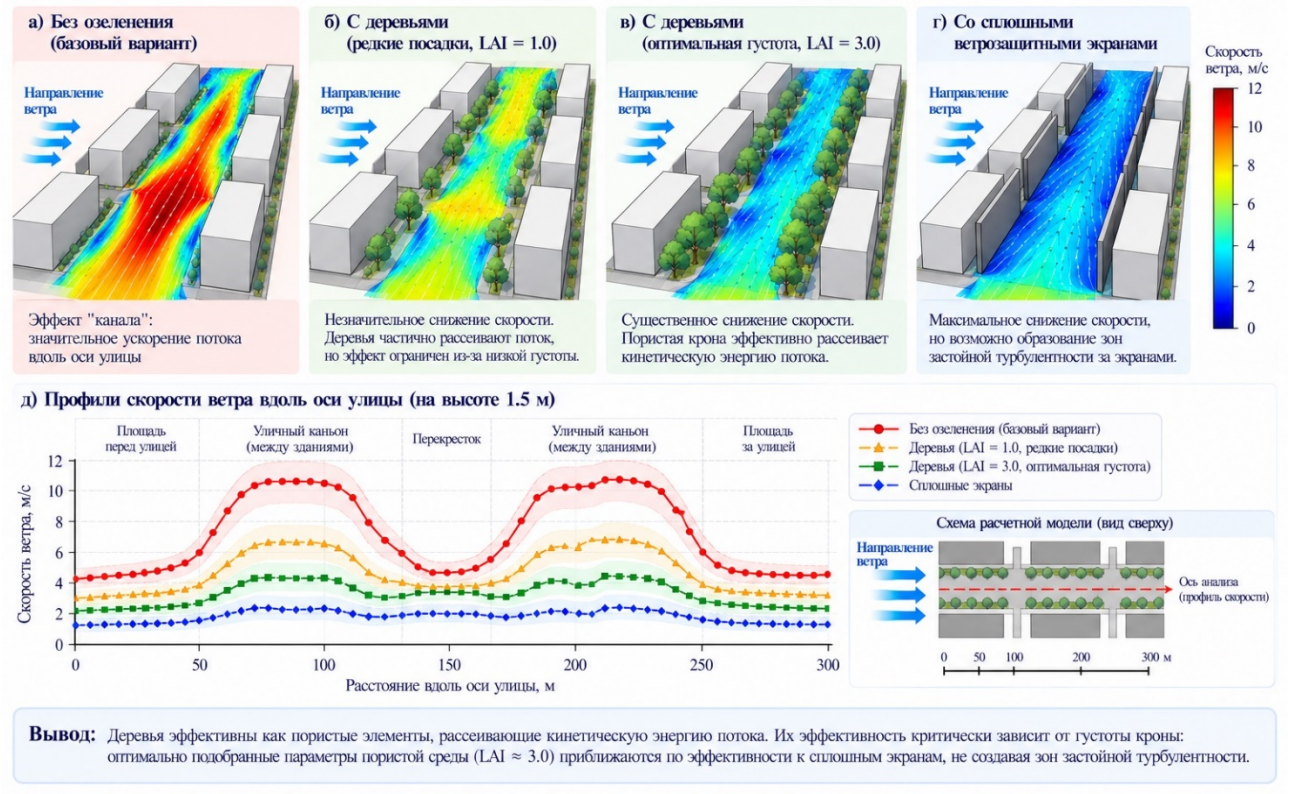


Рисунок 5 - Профили скорости ветра вдоль оси улицы при строчной застройке: без озеленения, с моделированием деревьев как пористых элементов, с моделированием сплошных ветрозащитных экранов (источник: разработано автором)

Раздельная оценка показателей ветрового комфорта и безопасности свидетельствует о необходимости дифференцированной интерпретации средней скорости воздушного потока и расчётной скорости порывов. При средней скорости ветра 3–4 м/с и принятом коэффициенте порывистости 1,6 соответствующая оценка кратковременных максимальных скоростей составляет 4,8-6,4 м/с. Полученный диапазон не достигает рассматриваемого порогового значения 15 м/с, установленного для оценки неблагоприятных ветровых воздействий. Следовательно, наличие зон с приемлемыми средними скоростями не может само по себе служить основанием для вывода о приближении ветровых порывов к критическому уровню. Для оценки безопасности необходимо отдельно рассматривать экстремальные метеорологические сценарии, локальные эффекты ускорения потока и повторяемость соответствующих условий. При разработке планировочных мероприятий целесообразно сочетать

изменения геометрии застройки с устройством защитных озеленённых полос и иных элементов, обеспечивающих перераспределение воздушных потоков в пешеходном пространстве.

Таким образом, переход от анализа изолированных зданий к вероятностной оценке градостроительных морфотипов позволяет сформировать научно обоснованную базу для нормирования ветрового режима. Внедрение предложенных безразмерных зависимостей и протоколов CFD-моделирования в практику градостроительного регулирования обеспечит создание безопасной и комфортной среды, минимизируя риски на стадии предпроектных проработок.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает целесообразность перехода от точечной оценки изолированных архитектурных объектов к комплексному анализу градостроительных морфотипов. Интеграция результатов численного моделирования с данными реальной годовой розы ветров позволяет сформировать вероятностную картину ветрового режима, максимально приближенную к фактическим условиям эксплуатации городской среды. Выявленные безразмерные зависимости между геометрическими параметрами застройки, такими как отношение высоты здания к ширине улицы, и долей дискомфортных зон создают надежную эмпирическую базу для нормирования. Такой подход дает специалистам возможность прогнозировать аэродинамические риски еще на стадии предпроектных проработок, не прибегая к ресурсоемким расчетам каждого индивидуального здания в отрыве от его окружения.

При этом необходимо учитывать ограничения применимости осреднённых по Рейнольдсу моделей турбулентности. Выбранный в исследовании вариант Realizable k−ε, полностью соответствующий рекомендациям Архитектурного института Японии для инженерных задач, демонстрирует удовлетворительную точность при описании средних полей скоростей и зон рециркуляции. Однако фундаментальное ограничение данного класса моделей заключается в процедуре осреднения уравнений Навье-Стокса по времени. Эта математическая операция

неизбежно сглаживает нестационарные крупномасштабные вихревые структуры, формирующиеся в зонах отрыва потока за тупыми телами или на наветренных углах высотных доминант. Как следствие, расчёт может занижать пиковые скорости порывов ветра в следе за зданием, что влияет на точность оценки безопасности пешеходов, основанной на экстремальных характеристиках потока.

Для компенсации указанного недостатка в рамках текущей работы применялся эмпирический коэффициент порывистости, связывающий осредненные скорости с вероятными максимальными значениями. Подобная корректировка, безусловно, повышает практическую ценность результатов, но остается приближенной и не учитывает локальную специфику вихреобразования. Перспективным направлением развития вычислительной аэродинамики в градостроительстве становится внедрение методов моделирования крупных вихрей (LES) или гибридных схем, таких как DES. Они способны непосредственно разрешать нестационарные вихревые дорожки и локальные зоны турбулентности, обеспечивая более строгое соответствие физике процесса. Несмотря на существенные вычислительные затраты, использование LES оправдано при детальном анализе критически важных общественных пространств, где сложная структура вихревых потоков влияет на условия использования территории.

Практическая значимость полученных выводов заключается в обосновании конкретных архитектурно-планировочных приемов, способных нивелировать выявленные риски. Моделирование древесных насаждений как пористой среды показало, что продуманное озеленение рассеивает кинетическую энергию потока и снижает среднюю скорость ветра в пешеходных зонах без образования опасных застойных областей. Аналогичным образом работают скосы наветренных граней и организация пористых первых этажей, которые перенаправляют нисходящие потоки и предотвращают их резкий удар о поверхность земли. Внедрение этих решений в регламенты градостроительного

проектирования, подкрепленное вероятностными картами ветрового дискомфорта, позволит целенаправленно формировать комфортный и безопасный микроклимат городских кварталов, минимизируя социальные конфликты на этапе эксплуатации застройки.

Список литературы

1. Оленьков В. Д., Колмогорова А. О., Замула М. Д. Учёт ветрового режима при проектировании жилой застройки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2023. — Т. 23, № 3. — С. 5–13. — DOI: 10.14529/build230301.

2. Hågbo T.-O., Giljarhus K. E. T. Sensitivity of Urban Morphology and the Number of CFD Simulated Wind Directions on Pedestrian Wind Comfort and Safety Assessments // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111310. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111310.

3. Оленьков В. Д., Колмогорова А. О., Кожевников Д. В., Алеманов А. В., Яшкин Я. С. Особенности обтекания воздушным потоком жилой застройки замкнутой формы с арками и разрывами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — Т. 24, № 4. — С. 5–10. — DOI: 10.14529/build240401.

4. Kubilay A., Rubin A., Derome D., Carmeliet J. Wind-Comfort Assessment in Cities Undergoing Densification with High-Rise Buildings Remediated by Urban Trees // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2024. — Vol. 249. — Art. 105721. — DOI: 10.1016/j.jweia.2024.105721.

5. Гиясов Б. И., Гиясов Р. Б. Влияние тепло-ветрового режима городских территорий на экологию окружающей среды // Экология урбанизированных территорий. — 2023. — № 4. — С. 80–85. — DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-80-85.

6. Raghunathan Srikumar S. K., Cotteleer L., Mosca G., Gambale A., Parente A. Application of a Comprehensive Atmospheric Boundary Layer Model to a Realistic Urban-Scale Wind Simulation // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. —

Art. 111330. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111330.

7. Саиян С. Г., Ефимова А. М. Расчётные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий // Вестник МГСУ. — 2024. — Т. 19, № 6. — С. 906–941. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941.

8. Baş H., Andrianne T., Reiter S. City Configurations to Optimise Pedestrian Level Ventilation and Wind Comfort // Sustainable Cities and Society. — 2024. — Vol. 114. — Art. 105745. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.105745.

9. Поддаева О. И., Зубков А. Ф., Храмов Д. А. Обоснование методики экспериментального моделирования пешеходной (биоклиматической) комфортности // Жилищное строительство. — 2025. — № 11. — С. 71–78. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-11-71-78.

10. Silva P. U. da, Bono G., Greco M. Assessing Pedestrian Comfort in Dense Urban Areas Using CFD Simulations: A Study on Wind Angle and Building Height Variations // Fluids. — 2025. — Vol. 10, No. 9. — Art. 233. — DOI: 10.3390/fluids10090233.

11. Цветков О. Ю., Терещенко Т. Ю. Градостроительные решения по смягчению негативных ветровых эффектов на основе CFD-анализа // Московский экономический журнал. — 2025. — Т. 10, № 11. — С. 271–280. — DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_11_259.

12. Wu Y., Wang M., Kong F., Kong J., Liu H. Synthesizing the Quantitative Impact of Urban Neighborhood Morphology on Pedestrian Wind Environment: A Meta-Analysis Approach // Sustainable Cities and Society. — 2025. — Vol. 118. — Art. 106053. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.106053.

13. Оленьков В. Д., Колмогорова А. О., Замула М. Д., Алеманов А. В. Особенности моделирования ветрового режима проектируемого жилого комплекса // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. — 2026. — № 1 (53). — С. 25–33.

14. Niu J., Mei S.-J., Sun T. Efficient City-Scale Wind Mapping from Building

Morphology: A CFD-Based Parameterization Scheme // Sustainable Cities and Society. — 2025. — Vol. 131. — Art. 106688. — DOI: 10.1016/j.scs.2025.106688.

15. Lee S., Kwon Y. Impact of Building Density and Sky View Factor on Pedestrian-Level Wind Environment in Seoul's Urban Street Canyons // Sustainable Cities and Society. — 2026. — Vol. 136. — Art. 107088. — DOI: 10.1016/j.scs.2025.107088.

16. Chen K., Mo Z., Du Y. Wind Environment and Pedestrian Comfort Assessment Around a High-Rise Building: Coupled Effect of Building Shape and Surrounding Density // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2026. — Vol. 268. — Art. 106297. — DOI: 10.1016/j.jweia.2025.106297.

17. Al-Khalidy N. H. On the Assessment of Wind Microclimate in a Complex Urban Environment Utilising Computational Fluid Dynamics // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. — 2024. — Vol. 19. — P. 282–295. — DOI: 10.37394/232013.2024.19.26.

18. Jareemit D., Chauytong T., Liu J., Tanapant S., Srivanit M. Impact of Urban Spatial Configurations on Pedestrian Wind Comfort and Ventilation Effectiveness in Complex High-Density Urban Blocks // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. — 2026. — Опубликовано онлайн 31 августа 2026 г. — DOI: 10.1080/13467581.2026.2722086.

19. Li J., Du Y., Liu J., Niu J., Mak C. M., Kwok K. C. S. From Isolated Voids to Integrated Systems: A Systematic Review of Building Lift-Up Design as Thermal Comfort Hubs Integrated with Urban Ventilation Corridors // Building and Environment. — 2026. — Vol. 295. — Art. 114470. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2026.114470.

References

1. Olen`kov V. D., Kolmogorova A. O., Zamula M. D. Uchyot vetrovogo rezhima pri proektirovanii zhiloj zastrojki // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2023. — T. 23, № 3. — S. 5–13. — DOI: 10.14529/build230301.

2. Hågbo T.-O., Giljarhus K. E. T. Sensitivity of Urban Morphology and the Number

of CFD Simulated Wind Directions on Pedestrian Wind Comfort and Safety Assessments // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111310. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111310.

3. Olen`kov V. D., Kolmogorova A. O., Kozhevnikov D. V., Alemanov A. V., Yashkin Ya. S. Osobennosti obtekaniya vozdushny`m potokom zhiloj zastrojki zamknutoj formy` s arkami i razry`vami // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2024. — T. 24, № 4. — S. 5–10. — DOI: 10.14529/build240401.

4. Kubilay A., Rubin A., Derome D., Carmeliet J. Wind-Comfort Assessment in Cities Undergoing Densification with High-Rise Buildings Remediated by Urban Trees // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2024. — Vol. 249. — Art. 105721. — DOI: 10.1016/j.jweia.2024.105721.

5. Giyasov B. I., Giyasov R. B. Vliyanie teplo-vetrovogo rezhima gorodskix territorij na e`kologiyu okruzhayushhej sredy` // E`kologiya urbanizirovanny`x territorij. — 2023. — № 4. — S. 80–85. — DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-80-85.

6. Raghunathan Srikumar S. K., Cotteleer L., Mosca G., Gambale A., Parente A. Application of a Comprehensive Atmospheric Boundary Layer Model to a Realistic Urban-Scale Wind Simulation // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111330. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111330.

7. Saiyan S. G., Efimova A. M. Raschyotny`e ae`rodinamicheskie issledovaniya kompleksa Moskovskogo mezhdunarodnogo delovogo centra «Moskva-Siti» pri posledovatel`nom vozvedenii zdanij // Vestnik MGSU. — 2024. — T. 19, № 6. — S. 906–941. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941.

8. Baş H., Andrianne T., Reiter S. City Configurations to Optimise Pedestrian Level Ventilation and Wind Comfort // Sustainable Cities and Society. — 2024. — Vol. 114. — Art. 105745. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.105745.

9. Poddaeva O. I., Zubkov A. F., Xramov D. A. Obosnovanie metodiki e`ksperimental`nogo modelirovaniya peshexodnoj (bioklimaticheskoj) komfortnosti // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2025. — № 11. — S. 71–78. — DOI: 10.31659/0044-

4472-2025-11-71-78.

10. Silva P. U. da, Bono G., Greco M. Assessing Pedestrian Comfort in Dense Urban Areas Using CFD Simulations: A Study on Wind Angle and Building Height Variations // Fluids. — 2025. — Vol. 10, No. 9. — Art. 233. — DOI: 10.3390/fluids10090233.

11. Czvetkov O. Yu., Tereshhenko T. Yu. Gradostroitel`ny`e resheniya po smyagcheniyu negativny`x vetrovy`x e`ffektov na osnove CFD-analiza // Moskovskij e`konomicheskij zhurnal. — 2025. — T. 10, № 11. — S. 271–280. — DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_11_259.

12. Wu Y., Wang M., Kong F., Kong J., Liu H. Synthesizing the Quantitative Impact of Urban Neighborhood Morphology on Pedestrian Wind Environment: A Meta-Analysis Approach // Sustainable Cities and Society. — 2025. — Vol. 118. — Art. 106053. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.106053.

13. Olen`kov V. D., Kolmogorova A. O., Zamula M. D., Alemanov A. V. Osobennosti modelirovaniya vetrovogo rezhima proektiruemogo zhilogo kompleksa // Biosfernaya sovmestimost`: chelovek, region, texnologii. — 2026. — № 1 (53). — S. 25–33.

14. Niu J., Mei S.-J., Sun T. Efficient City-Scale Wind Mapping from Building Morphology: A CFD-Based Parameterization Scheme // Sustainable Cities and Society. — 2025. — Vol. 131. — Art. 106688. — DOI: 10.1016/j.scs.2025.106688.

15. Lee S., Kwon Y. Impact of Building Density and Sky View Factor on Pedestrian-Level Wind Environment in Seoul's Urban Street Canyons // Sustainable Cities and Society. — 2026. — Vol. 136. — Art. 107088. — DOI: 10.1016/j.scs.2025.107088.

16. Chen K., Mo Z., Du Y. Wind Environment and Pedestrian Comfort Assessment Around a High-Rise Building: Coupled Effect of Building Shape and Surrounding Density // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2026. — Vol. 268. — Art. 106297. — DOI: 10.1016/j.jweia.2025.106297.

17. Al-Khalidy N. H. On the Assessment of Wind Microclimate in a Complex Urban Environment Utilising Computational Fluid Dynamics // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. — 2024. — Vol. 19. — P. 282–295. — DOI:

10.37394/232013.2024.19.26.

18. Jareemit D., Chauytong T., Liu J., Tanapant S., Srivanit M. Impact of Urban Spatial Configurations on Pedestrian Wind Comfort and Ventilation Effectiveness in Complex High-Density Urban Blocks // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. — 2026. — Опубликовано онлайн 31 августа 2026 г. — DOI: 10.1080/13467581.2026.2722086.

19. Li J., Du Y., Liu J., Niu J., Mak C. M., Kwok K. C. S. From Isolated Voids to Integrated Systems: A Systematic Review of Building Lift-Up Design as Thermal Comfort Hubs Integrated with Urban Ventilation Corridors // Building and Environment. — 2026. — Vol. 295. — Art. 114470. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2026.114470.

Статья поступила в редакцию 20.08.2026; одобрена после рецензирования 18.09.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 20.08.2026; approved after peer review 18.09.2026; accepted for publication 08.10.2026.

Научная статья

УДК 711.2:656

АНАЛИЗ ЗОН ПЕШЕХОДНОГО ОХВАТА ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ПРИ ТРАНЗИТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ РАЗВИТИИ ГОРОДОВ СРЕДНЕЙ ЧИСЛЕННОСТИ

Амерханова Гульнара Ильхамовна, кандидат технических наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, Казань, gulnara@yandex.ru

Аннотация. Механическое применение нормативных пешеходных радиусов транзитно-ориентированного развития (TOD) в городах средней численности часто приводит к планировочным диспропорциям. При низкой плотности застройки и преобладании поездок на личном автомобиле стандартные зоны охвата радиусом 400–800 метров не всегда отражают фактическую доступность общественного транспорта. В статье предлагается методика количественного обоснования реальных границ зон TOD, опирающаяся на фактическое поведение пассажиров и топологию улично-дорожной сети. Исследование базируется на анализе агрегированных матриц корреспонденций и данных смарт-карт трех сопоставимых по климату и виду транспорта городов. В работе рассчитаны сетевые изохроны доступности с введением поправочного коэффициента зимней проходимости, оценен индекс непрямолинейности маршрутов и проведен кластерный анализ характеристик станций по модели «узел-место». Результаты показали, что 80% фактического пассажиропотока приходится на жителей, которым требуется не более 11–13 минут, чтобы дойти до станции по пешеходной сети. Физически это соответствует расстоянию от 600 до 950 метров в зависимости от проницаемости квартальной застройки. На основе полученных данных выделены три типа станций: городской центральный узел, районный узел и пригородная станция. Отказ от универсальных геометрических нормативов в пользу поведенческих

индикаторов позволяет повысить точность градостроительного прогнозирования и обоснованность планировочных решений.

Ключевые слова: транзитно-ориентированное развитие (TOD), города средней численности, пешеходная доступность, сетевая связность, пассажиропоток, модель «узел-место», пространственная типология, поведенческий радиус.

Original article

ANALYSIS OF PEDESTRIAN COVERAGE ZONES OF BUS STOPS IN TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT OF MEDIUM-SIZED CITIES

Amerkhanova Gulnara Ilkhamovna, Candidate of Technical Sciences, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, gulnara@yandex.ru

Abstract. The mechanical application of standardized transit-oriented development (TOD) pedestrian radii in medium-sized cities often leads to planning imbalances. Low initial building density and the predominance of private transport undermine the effectiveness of standard 400-800-meter catchment areas, turning them into formal, but dysfunctional, spaces. This article proposes a method for quantitatively substantiating the actual boundaries of TOD zones, based on actual passenger behavior and the topology of the street and road network. The study is based on an analysis of aggregated correspondence matrices and smart-card data from three cities comparable in climate and transport mode. The paper calculates network accessibility isochrones with a winter passability correction factor, evaluates the route nonlinearity index, and conducts a cluster analysis of station characteristics using the node-place model. The results show that 80% of actual passenger traffic is generated by residents whose network pedestrian access time does not exceed 11-13 minutes. Physically, this corresponds to a distance of 600 to 950 meters, depending on the permeability of the neighborhood's development. Based on the data obtained, three objective station

typologies were identified: urban central hub, district hub, and suburban station. The abandonment of universal geometric standards in favor of behavioral indicators allows for greater accuracy in urban planning forecasting and the validity of planning decisions.

Keywords: transit-oriented development (TOD), mid-sized cities, walkability, network connectivity, passenger flow, hub-and-spoke model, spatial typology, behavioral radius.

Введение. Транзитно-ориентированное развитие (TOD) рассматривается как стратегия градостроительного планирования, направленная на концентрацию жилых, общественных и деловых функций в непосредственной близости от транспортных узлов [1]. Однако применение этих принципов, сформированных преимущественно для мегаполисов, в городах средней численности сопряжено с рядом ограничений. Специфика таких территорий заключается в существенно более низкой плотности застройки, высоком уровне автомобилизации населения и ограниченной пропускной способности существующих маршрутных сетей [2]. В результате классические подходы к формированию пешеходных зон доступности часто оказываются недостаточно эффективными для обеспечения устойчивого пассажиропотока.

Прямая адаптация нормативов, разработанных для крупных агломераций, нередко приводит к формированию транзитно-смежных территорий, которые формально располагаются рядом с остановочными пунктами, но не создают условий для приоритетного использования общественного транспорта. Международный стандарт TOD подчеркивает необходимость формирования безопасной и связной пешеходной и велосипедной инфраструктуры, а также обеспечения достаточной плотности застройки для поддержки местных сервисов. Тем не менее, в городах средней численности пространственная разобщенность точек притяжения и доминирование автомобильных поездок нивелируют потенциал немоторизованных перемещений, делая стандартный

радиус пешеходной доступности в 400–800 метров условным и не всегда отражающим реальную мобильность жителей [3]. Приоритет пешеходного и велосипедного движения остается важным принципом TOD, однако в городах с децентрализованной планировочной структурой его реализация требует дополнительных решений [4].

Эмпирические данные регионального планирования подтверждают необходимость дифференцированного подхода к оценке доступности [5-7]. В частности, исследования транспортной связности в регионах с развитой железнодорожной инфраструктурой демонстрируют, что средние по размеру города часто сталкиваются с проблемой пространственного разрыва между транспортным узлом и историческим ядром. Расстояние от вокзала до центральной площади в таких случаях может составлять около одного километра, поэтому для формирования полноценной зоны транзитного развития необходимы дополнительные транспортные связи, например велосипедные маршруты или автобусное сообщение между вокзалом и центром. Такие примеры показывают, что фиксированные радиусы не отражают фактический характер передвижений жителей в городах с рассредоточенной застройкой [8-10].

Учитывая изложенные ограничения, исследование направлено на разработку пространственных типологий TOD, количественно обоснованных реальными показателями пассажиропотоков и топологической связностью улично-дорожной сети. В настоящей работе предлагается методика калибровки радиусов зон транзитного развития, опирающаяся на эмпирические данные о мобильности и структурные характеристики городской ткани. Переход от абстрактных нормативных расстояний к измеряемым индикаторам транспортной доступности позволяет сформировать более гибкий и адаптивный инструмент для специалистов в области градостроительства [11], [12]. Такой подход обеспечивает соответствие проектных решений экономическим условиям работы общественного транспорта и требованиям устойчивого развития городов

средней численности.

Обзор литературы. Транзитно-ориентированное развитие (TOD) исторически формировалось как ответ на проблемы, связанные с расширением крупных агломераций и зависимостью их транспортных систем от личного автомобиля. Международные стандарты, в частности документация ITDP, четко разграничивают подлинное транзитно-ориентированное развитие и транзитно-смежную застройку. Последняя лишь формально располагается вблизи остановочных пунктов, но не формирует качественную пешеходную среду и не стимулирует отказ от личного транспорта [13]. Восемь базовых принципов стандарта TOD делают акцент на плотной, смешанной застройке, приоритете немоторизованных перемещений и минимизации парковочного давления. Однако механический перенос этих нормативов в среду городов средней численности (100–500 тыс. жителей) сталкивается с объективными ограничениями: меньшей исходной плотностью, высокой долей автомобилизации и фрагментарностью маршрутных сетей [14-16].

Опыт регионального планирования подтверждает необходимость адаптации подходов. Исследования транспортной доступности в регионах со смешанной застройкой, например, анализ развития города Рингстед (Дания), демонстрируют, что в средних по размеру населенных пунктах транспортный узел часто пространственно разобщен с историческим ядром. Расстояние от вокзала до центральной площади может достигать одного километра, что требует интеграции подвозящих маршрутов и развития велосипедной инфраструктуры для формирования полноценной зоны TOD. Фиксированные геометрические радиусы (традиционные 400–800 метров) в таких условиях не отражают реальные паттерны мобильности населения.

Ключевой методологической проблемой остается определение границ зоны влияния станции. Классический подход, предполагающий охват определенного процента проживающего населения (например, 80%) при расширении радиуса, методически несостоятелен для оценки эффективности

TOD. Увеличение радиуса неизбежно ведет к росту охвата, но не гарантирует, что эти жители будут пользоваться транспортом. Современная научная дискуссия смещается в сторону поведенческих моделей: граница зоны должна определяться расстоянием или сетевым временем, внутри которого формируется подавляющая доля фактических посадок, с учетом обобщенных затрат на поездку [17], [18]. Кроме того, традиционные графовые индексы связности (α, β, γ) недостаточно чувствительны к качеству пешеходной среды. Для оценки пешеходной доступности необходимо дополнительно учитывать плотность пересечений, коэффициент непрямолинейности маршрута и сезонные препятствия, увеличивающие время передвижения по пешеходной сети зимой.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступили три города средней численности (условные обозначения: Город А – железнодорожный узел, ~300 тыс. жителей; Город Б – развитая трамвайная сеть, ~200 тыс. жителей; Город В – смешанный тип, ~400 тыс. жителей), сопоставимые по климатическим условиям и наличию рельсового общественного транспорта. Сопоставимость городов по климатическим условиям и наличию рельсового транспорта позволяет снизить влияние этих факторов на результаты сравнения.

Информационную базу составили агрегированные матрицы корреспонденций (OD-данные), полученные от перевозчиков на основе анализа смарт-карт и турникетных систем, а также натурные обследования пассажиропотоков. Пространственные данные об объектах инфраструктуры и функциях застройки извлекались из открытых источников (OpenStreetMap, 2ГИС) и затем проверялись в ходе натурных обследований.

Методология количественного обоснования радиуса TOD базируется на сопоставлении евклидовых расстояний и реальной сетевой пешеходной доступности. Для каждой станции строились изохроны пешеходной доступности (5, 10, 15 минут). При расчете сетевого импеданса применялся поправочный коэффициент зимней проходимости (K_{winter}), увеличивающий вес ребер графа на участках со снежными заносами, без противогололедной обработки или с

крутыми уклонами. Граница эффективной зоны TOD определялась не по доле проживающего населения, а по времени пешеходного доступа, при котором накопленная доля посадок достигала 80% пассажиропотока станции.

Оценка связности улично-дорожной сети проводилась по расширенному набору индикаторов. Наряду с классическими индексами альфа, бета и гамма, применялись:

1. Плотность пересечений (число узлов на кв. км).

2. Индекс непрямолинейности маршрута (отношение сетевого расстояния к евклидову).

3. Индекс энтропии Шеннона для оценки смешанности функций землепользования в пределах выявленных поведенческих радиусов.

Типология узлов формировалась не экспертным путем, а посредством кластерного анализа (алгоритм k-средних) на основе модели «Узел-Место». В качестве переменных использовались показатели транспортной связности, плотности застройки и функционального состава территории.

Результаты исследования. Анализ пространственных данных выявил существенный разрыв между нормативными и фактическими границами зон влияния. Евклидовы радиусы в 400 и 800 метров систематически завышают реальную доступность (рисунок 1).

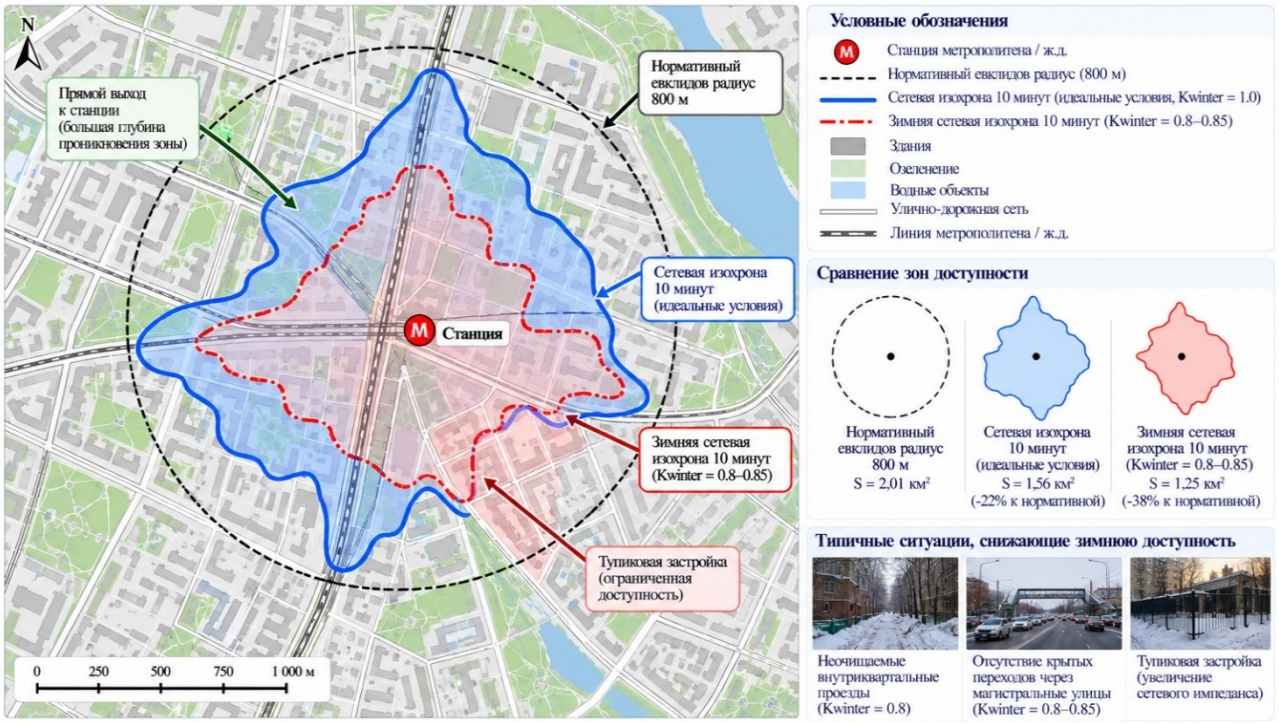


Рисунок 1 - Схема трансформации зоны доступности с учетом сетевого импеданса и сезонных факторов (источник: разработано автором)

Как показывает рисунок 1, игнорирование топологии сети и климатических факторов приводит к планировочным ошибкам. Расположенные в нормативном радиусе участки могут находиться более чем в 10–12 минутах ходьбы от станции, что побуждает часть пассажиров выбирать личный автомобиль или такси.

Расчет кумулятивных кривых пассажиропотока позволил количественно обосновать поведенческий радиус. Для большинства станций в исследуемых городах 80% всех посадок формировалось жителями и посетителями, чье сетевое время пешеходного доступа не превышало 11–13 минут. При этом физическое расстояние варьировалось от 600 до 950 метров в зависимости от качества улично-дорожной сети (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительная матрица показателей связности и доступности для выявленных поведенческих радиусов

Показатель	Город А (Ж/д узел)	Город Б (Трамвай)	Город В (Смешанный)	Примечание
Средний индекс непрямолинейности	1.45	1.22	1.38	Значения >1.3 указывают на необходимость создания пешеходных сквозных проходов
Плотность пересечений (ед./кв.км)	42	68	51	Высокая плотность коррелирует с большим числом безопасных переходов
Средний коэффициент K_{winter}	1.25	1.15	1.20	Отражает сезонное увеличение времени пути из-за барьеров
Индекс энтропии Шеннона (функции)	0.78	0.65	0.71	Значения ближе к 1 указывают на высокую смешанность застройки

Источник: разработано автором.

Данные таблицы 1 подтверждают, что трамвайные линии (Город Б) исторически формируют более мелкую и проницаемую уличную сеть, что снижает непрямолинейность и повышает реальную доступность даже при сопоставимых физических расстояниях. Введение коэффициента K_{winter} показало, что в зимний период эффективный радиус сокращается в среднем на 18%, если не обеспечена приоритетная расчистка пешеходных путей к остановкам.

Кластерный анализ по модели «Узел-Место» позволил объективно выделить три пространственные типологии станций, отказавшись от субъективных экспертных оценок (таблица 2).

Таблица 2 - Результаты кластеризации станций и интерпретация пространственных типологий

Кластер	Характеристики «Узла» (связность, частота движения)	Характеристики «Места» (плотность, энтропия функций)	Интерпретация типологии
Кластер 1	Высокие	Высокие	Городской центральный узел. Максимальная смешанность, высокая этажность, развитая сеть пешеходных связей. Потенциал для ограничения парковки.
Кластер 2	Средние	Средние	Районный узел. Преобладание жилой застройки средней плотности с включением объектов повседневного спроса. Требуется точечное уплотнение и улучшение переходов.
Кластер 3	Высокие (магистральные)	Низкие	Пригородная / периферийная станция. Низкая плотность, наличие перехватывающих парковок. Доминирование маятниковой миграции.

Источник: разработано автором.

Выделенные типологии требуют дифференцированных планировочных рекомендаций. Для городских центральных узлов (Кластер 1) приоритетом является управление парковочным пространством и развитие пешеходных связей с соседними кварталами. Для районных узлов (кластер 2) необходимо развивать смешанное использование зданий: размещать на первых этажах торговые объекты и предприятия обслуживания. Это повысит индекс энтропии и создаст устойчивый пассажиропоток. Для пригородных станций (Кластер 3) ключевым инструментом остается организация безопасных и прямых пешеходных коридоров от зон жилой застройки, а также интеграция велопарковок и перехватывающих парковок для расширения зоны притяжения (рисунок 2).

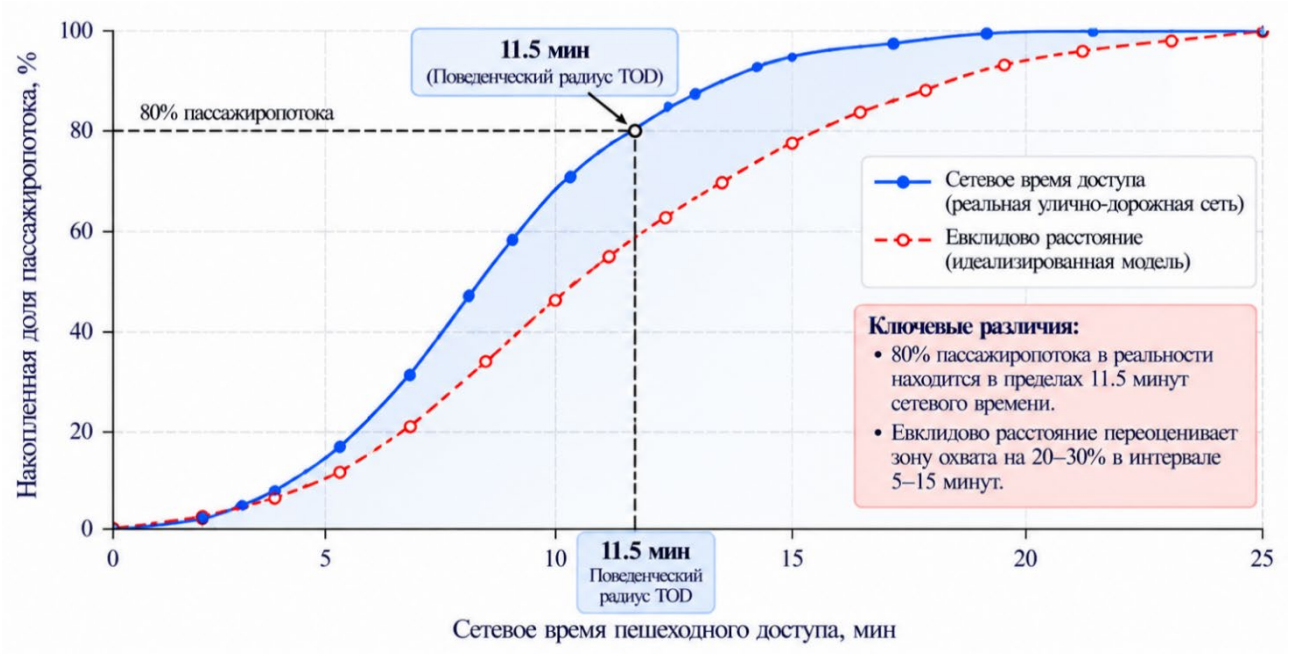


Рисунок 2 - Кумулятивная кривая распределения пассажиропотока по сетевому времени доступа (источник: разработано автором)

Представленная на рисунке 2 зависимость наглядно обосновывает отказ от нормативного подхода в пользу поведенческого. Изменение наклона кривой после 12–13 минут указывает на то, что при большем времени доступа готовность пассажиров идти до станции пешком снижается. Планировочные мероприятия, сокращающие время пешеходного доступа (например, устройство сквозного пешеходного бульвара или ликвидация тупикового участка), могут увеличить число жителей, для которых станция доступна в пределах установленного времени, без изменения расстояния до нее по прямой.

Обсуждение результатов исследования. Проведенное исследование демонстрирует несостоятельность механического применения нормативных пешеходных радиусов при проектировании транзитно-ориентированных территорий в городах средней численности. Количественное обоснование границ зоны TOD должно опираться на фактическое поведение пассажиров, выражаемое через кумулятивные кривые посадок, и реальную сетевую доступность, скорректированную с учетом рельефа, барьеров и сезонных факторов. Применение расширенного набора индикаторов связности и кластерного анализа модели «Узел-Место» позволяет перейти от

унифицированных решений к адресным планировочным рекомендациям, учитывающим специфику центральных, районных и периферийных транспортных узлов. Реализация данных подходов способствует формированию устойчивой мобильности и повышению эффективности инвестиций в общественный транспорт.

Выводы. Установлено, что традиционные евклидовы зоны охвата в 400–800 метров систематически искажают реальную картину доступности, игнорируя топологию улично-дорожной сети, рельеф и сезонные барьеры. Предложенный в работе поведенческий подход, опирающийся на кумулятивные кривые фактических посадок и сетевое время пешеходного доступа, позволяет выявить истинные границы зоны влияния транспортного узла. В большинстве рассмотренных случаев 80% пассажиропотока формируется жителями, чье время пути до станции не превышает 11–13 минут. Физически это может соответствовать расстоянию от 600 до 950 метров в зависимости от проницаемости квартальной застройки и качества пешеходной инфраструктуры.

Полученные результаты согласуются с международными практиками, однако выявляют важную региональную специфику. Стандарт транзитно-ориентированного развития (ITDP) справедливо акцентирует внимание на необходимости создания безопасной среды для пешеходов и велосипедистов, а также обеспечения достаточной плотности застройки для поддержки местных сервисов. Вместе с тем, опыт развития средних городов, например, в регионе Большой Копенгаген, показывает, что даже при наличии качественного железнодорожного сообщения пространственный разрыв между вокзалом и историческим центром требует обязательной интеграции дополнительных видов мобильности. В случае с городом Рингстед расстояние от станции до центральной площади составляет около одного километра. В таких условиях концепция TOD трансформируется: она дополняется развитием выделенных велосипедных коридоров и локальных автобусных подвозящих маршрутов, которые компенсируют недостаточную исходную плотность и расширяют

эффективный радиус притяжения станции без увеличения временных затрат пассажиров.

Применение принципов транзитно-ориентированного развития в городах с низкой плотностью застройки сталкивается с фундаментальными ограничениями. Высокая доля автомобилизации и пространственная разобщенность точек притяжения нивелируют потенциал немоторизованных перемещений. Анализ по модели «узел-место» подтверждает: при низких значениях индекса энтропии землепользования и недостаточной концентрации населения любые попытки внедрения TOD рискуют выродиться в транзитно-смежную застройку. В подобном сценарии станция обслуживает преимущественно перехватывающие парковки и маятниковую миграцию на личном транспорте, а не формирует устойчивую пешеходную среду. Для преодоления этого ограничения недостаточно ужесточить градостроительные нормативы или формально выделить зоны TOD.

Для смягчения указанных ограничений при градостроительном планировании следует уделять основное внимание не формальному соблюдению заданных радиусов, а повышению связности улично-дорожной сети. Приоритетными мерами являются создание сквозных пешеходных проходов, устраняющих тупиковые участки сети, и обеспечение проходимости маршрутов к остановкам зимой; это сокращает время пешеходного доступа. Точечное уплотнение застройки и стимулирование смешанного использования первых этажей в районе районных узлов способны создать постоянный базовый спрос на общественный транспорт. Таким образом, адаптация парадигмы TOD для городов средней численности требует отказа от универсальных шаблонов в пользу гибких, измеримых индикаторов, отражающих реальное поведение жителей и структурные особенности локальной транспортной системы.

Список литературы

1. Пьянков Я. О., Пенкина И. Е., Беляков В. А. Особенности формирования территории Екатеринбурга с учетом функционирования транспортно-

пересадочных узлов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2025. — № 1 (64). — С. 43–49. — DOI: 10.25628/UNIIP.2025.64.1.025.

2. Hrelja R., Rye T. Delivering Transit Oriented Development (TOD) in Low to Medium Density Contexts. Actor Relationships and Market Conditions in Smaller Swedish Cities // International Journal of Sustainable Transportation. — 2024. — Vol. 18, No. 3. — P. 236–249. — DOI: 10.1080/15568318.2023.2285318.

3. Шаймарданова К. А. Классификация и типология транспортно-пересадочных объектов в структуре крупнейшего города // Architecture and Modern Information Technologies. — 2024. — № 3 (68). — С. 200–211. — DOI: 10.24412/1998-4839-2024-3-200-211.

4. Wang B., de Jong M., van Bueren E., Ersoy A., Meng Y. Transit-Oriented Development in China: A Comparative Content Analysis of the Spatial Plans of High-Speed Railway Station Areas // Land. — 2023. — Vol. 12, No. 9. — Art. 1818. — DOI: 10.3390/land12091818.

5. Сальникова А. Д., Баните А. В., Плотников Д. Г., Кашталинский А. С. Формирование системы транспортно-пересадочных узлов в городской агломерации // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9, № 1. — С. 87–98. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-87-98.

6. Mendes F. C. Análise das estratégias para o desenvolvimento orientado ao transporte sustentável (DOTS) utilizadas em cidades médias brasileiras // Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. — 2024. — Vol. 24, No. 1. — P. 75–89. — DOI: 10.5935/cadernospos.v24n1p75-89.

7. Балакин В. В. Принципы формирования маршрутных систем общественного транспорта в зонах влияния пассажирских станций железной дороги // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — Вып. 4 (97). — С. 122–134. — DOI: 10.35211/18154360_2024_4_122.

8. Guichot F., Van Acker M. Learning from Rural-Urban Stations: Strategies for Rail-Based Development in a Low-Density Flemish Landscape // Journal of Landscape

Architecture. — 2024. — Vol. 19, No. 2. — P. 68–83. — DOI: 10.1080/18626033.2024.2466338.

9. Зиятдинов Т. З. Специфика развития крупных городских агломераций относительно внеагломерационных пространств региона // Архитектон: известия вузов. — 2025. — № 4 (92). — DOI: 10.47055/19904126_2025_4(92)_13.

10. Priambodo D., Roychansyah M. S. Tipologi Penerapan Konsep Kawasan Berbasis Transit di 11 Stasiun Kota Kecil Jalur Selatan Pulau Jawa // Pawon: Jurnal Arsitektur. — 2025. — Vol. 9, No. 1. — P. 119–140. — DOI: 10.36040/pawon.v9i01.10120.

11. Sun Y., Han B., Lu F. An Overview of TOD Level Assessment Around Rail Transit Stations // Urban Rail Transit. — 2024. — Vol. 10, No. 1. — P. 1–12. — DOI: 10.1007/s40864-023-00211-3.

12. Kang H., Miwa T. Systematic Review and Methodological Comparison of TOD Typologies Based on the Node-Place Model // Journal of Transport Geography. — 2025. — Vol. 128. — Art. 104373. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2025.104373.

13. Pan H., Huang Y. TOD Typology and Station Area Vibrancy: An Interpretable Machine Learning Approach // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2024. — Vol. 186. — Art. 104150. — DOI: 10.1016/j.tra.2024.104150.

14. Robillard A., van Lierop D., Boisjoly G. A Methodological Framework to Generate Transit-Oriented Development (TOD) Typologies // Cities. — 2025. — Vol. 166. — Art. 106270. — DOI: 10.1016/j.cities.2025.106270.

15. Wu T., Yuan Z., Gao L., Zhang M., Li M. TOD Typologies for Metro Stations Based on the Butterfly Model // Frontiers in Environmental Science. — 2024. — Vol. 12. — Art. 1327535. — DOI: 10.3389/fenvs.2024.1327535.

16. Mehra S., Vardhan P. Analysis of the Potential for Transit Oriented Development (TOD) and a Framework for Defining TOD Typologies in a Proposed Mass Transit Corridor: A Case Study of Bengaluru Suburban Railway Corridor // International Review for Spatial Planning and Sustainable Development. — 2025. — Vol. 13, No. 3. — P. 56–78. — DOI: 10.14246/irspsd.13.3_56.

17. Hamidi A., Rasoulzade Z., Ghanbari A., Tahmasebi Moghaddam H., Einali G.,

Gholamnia K. Typology of Transit-Oriented Development to Promote Sustainable Urban Structure // Discover Cities. — 2026. — Vol. 3. — Art. 162. — DOI: 10.1007/s44327-026-00340-x.

18. Praja S. W., Yudhanta R., Sunaryo, Schouten F. S., Prasetiyo H. Readiness Assessment of Transit-Oriented Development (TOD) Corridors in Malang City, Indonesia: A GIS-Based Evaluation of Accessibility and Land-Use Integration // Planning Malaysia. — 2026. — Vol. 24, No. 3. — P. 586–598. — DOI: 10.21837/pm.v24i42.2062

References

1. P`yankov Ya. O., Penkina I. E., Belyakov V. A. Osobennosti formirovaniya territorii Ekaterinburga s uchetom funkcionirovaniya transportno-peresadochny`x uzlov // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. — 2025. — № 1 (64). — S. 43–49. — DOI: 10.25628/UNIIP.2025.64.1.025.

2. Hrelja R., Rye T. Delivering Transit Oriented Development (TOD) in Low to Medium Density Contexts. Actor Relationships and Market Conditions in Smaller Swedish Cities // International Journal of Sustainable Transportation. — 2024. — Vol. 18, No. 3. — P. 236–249. — DOI: 10.1080/15568318.2023.2285318.

3. Shajmardanova K. A. Klassifikaciya i tipologiya transportno-peresadochny`x ob``ektov v strukture krupnejshego goroda // Architecture and Modern Information Technologies. — 2024. — № 3 (68). — S. 200–211. — DOI: 10.24412/1998-4839-2024-3-200-211.

4. Wang B., de Jong M., van Bueren E., Ersoy A., Meng Y. Transit-Oriented Development in China: A Comparative Content Analysis of the Spatial Plans of High-Speed Railway Station Areas // Land. — 2023. — Vol. 12, No. 9. — Art. 1818. — DOI: 10.3390/land12091818.

5. Sal`nikova A. D., Banite A. V., Plotnikov D. G., Kashtalinskij A. S. Formirovanie sistemy` transportno-peresadochny`x uzlov v gorodskoj aglomeracii // Avtomatika na transporte. — 2023. — T. 9, № 1. — S. 87–98. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-87-98.

6. Mendes F. C. Análise das estratégias para o desenvolvimento orientado ao transporte sustentável (DOTS) utilizadas em cidades médias brasileiras // Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. — 2024. — Vol. 24, No. 1. — P. 75–89. — DOI: 10.5935/cadernospos.v24n1p75-89.

7. Balakin V. V. Principy` formirovaniya marshrutny`x sistem obshhestvennogo transporta v zonax vliyaniya passazhirskix stancij zheleznoj dorogi // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2024. — Vy`p. 4 (97). — S. 122–134. — DOI: 10.35211/18154360_2024_4_122.

8. Guichot F., Van Acker M. Learning from Rural-Urban Stations: Strategies for Rail-Based Development in a Low-Density Flemish Landscape // Journal of Landscape Architecture. — 2024. — Vol. 19, No. 2. — P. 68–83. — DOI: 10.1080/18626033.2024.2466338.

9. Ziyatdinov T. Z. Specifika razvitiya krupny`x gorodskix aglomeracij otnositel`no vneaglomeracionny`x prostranstv regiona // Arxitekton: izvestiya vuzov. — 2025. — № 4 (92). — DOI: 10.47055/19904126_2025_4(92)_13.

10. Priambodo D., Roychansyah M. S. Tipologi Penerapan Konsep Kawasan Berbasis Transit di 11 Stasiun Kota Kecil Jalur Selatan Pulau Jawa // Pawon: Jurnal Arsitektur. — 2025. — Vol. 9, No. 1. — P. 119–140. — DOI: 10.36040/pawon.v9i01.10120.

11. Sun Y., Han B., Lu F. An Overview of TOD Level Assessment Around Rail Transit Stations // Urban Rail Transit. — 2024. — Vol. 10, No. 1. — P. 1–12. — DOI: 10.1007/s40864-023-00211-3.

12. Kang H., Miwa T. Systematic Review and Methodological Comparison of TOD Typologies Based on the Node-Place Model // Journal of Transport Geography. — 2025. — Vol. 128. — Art. 104373. — DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2025.104373.

13. Pan H., Huang Y. TOD Typology and Station Area Vibrancy: An Interpretable Machine Learning Approach // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2024. — Vol. 186. — Art. 104150. — DOI: 10.1016/j.tra.2024.104150.

14. Robillard A., van Lierop D., Boisjoly G. A Methodological Framework to Generate

Transit-Oriented Development (TOD) Typologies // Cities. — 2025. — Vol. 166. — Art. 106270. — DOI: 10.1016/j.cities.2025.106270.

15. Wu T., Yuan Z., Gao L., Zhang M., Li M. TOD Typologies for Metro Stations Based on the Butterfly Model // Frontiers in Environmental Science. — 2024. — Vol. 12. — Art. 1327535. — DOI: 10.3389/fenvs.2024.1327535.

16. Mehra S., Vardhan P. Analysis of the Potential for Transit Oriented Development (TOD) and a Framework for Defining TOD Typologies in a Proposed Mass Transit Corridor: A Case Study of Bengaluru Suburban Railway Corridor // International Review for Spatial Planning and Sustainable Development. — 2025. — Vol. 13, No. 3. — P. 56–78. — DOI: 10.14246/irspsd.13.3_56.

17. Hamidi A., Rasoulzade Z., Ghanbari A., Tahmasebi Moghaddam H., Einali G., Gholamnia K. Typology of Transit-Oriented Development to Promote Sustainable Urban Structure // Discover Cities. — 2026. — Vol. 3. — Art. 162. — DOI: 10.1007/s44327-026-00340-x.

18. Praja S. W., Yudhanta R., Sunaryo, Schouten F. S., Prasetiyo H. Readiness Assessment of Transit-Oriented Development (TOD) Corridors in Malang City, Indonesia: A GIS-Based Evaluation of Accessibility and Land-Use Integration // Planning Malaysia. — 2026. — Vol. 24, No. 3. — P. 586–598. — DOI: 10.21837/pm.v24i42.2062

Статья поступила в редакцию 23.07.2026; одобрена после рецензирования 03.09.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 23.07.2026; approved after peer review 03.09.2026; accepted for publication 08.10.2026.

Научная статья

УДК 711.45:551.465.7

ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ПОДХОДЫ К АДАПТАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ ПОСЕЛЕНИЙ К РИСКАМ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ МОРЯ

Ситдиков Венер Мунирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Россия, Уфа, vener_sitdikov@mail.ru

Аннотация. В статье обоснованы методологические подходы к стратегическому пространственному планированию прибрежных агломераций и сельских населённых пунктов, подверженных совместному воздействию климатической трансгрессии и антропогенного проседания земной поверхности (субсиденции). На основе сценариев CMIP6 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), цифровой модели рельефа и гидродинамического моделирования штормовых нагонов выполнена вероятностная оценка границ зон затопления с учётом межмодельной неопределённости. Предложена трёхступенчатая дифференциация прибрежной территории по периодам повторяемости подтопления, служащая основой для установления красных линий застройки и нормативных ограничений капитального строительства. Рассмотрены стратегии инженерной защиты, приспособления застройки и планового отступления применительно к поселениям различной плотности и функционального профиля. Обоснована роль плавневых комплексов, приморских дюн, солончаков в снижении нагрузки на защитные сооружения. Показано, что адаптация прибрежных территорий требует перехода от статичного функционального зонирования к модели с периодическим пересмотром планировочных ограничений по мере уточнения климатических проекций. Результаты применимы при разработке генеральных планов и схем территориального планирования прибрежных муниципальных образований.

Ключевые слова: прибрежные поселения, повышение уровня моря,

пространственное планирование, штормовой нагон, зоны затопления, красные линии застройки, субсиденция, водно-болотные угодья, CMIP6 SSP, градостроительное зонирование, адаптация.

Original article

PLANNING APPROACHES TO ADAPTATION OF COASTAL SETTLEMENTS TO THE RISKS OF SEA LEVEL RISE

Sitdikov Vener Munirovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, vener_sitdikov@mail.ru

Abstract. The article substantiates methodological approaches to strategic spatial planning of coastal agglomerations and rural settlements subject to the combined impact of climate transgression and anthropogenic subsidence. Based on CMIP6 scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), a digital elevation model, and hydrodynamic modeling of storm surges, a probabilistic assessment of flood zone boundaries is performed, taking into account inter-model uncertainty. A three-stage differentiation of the coastal territory by flood recurrence periods is proposed, serving as the basis for establishing redlines for development and regulatory restrictions on capital construction. Strategies for engineering protection, development adaptation, and planned retreat are considered in relation to settlements of varying densities and functional profiles. The role of floodplain complexes, coastal dunes, and salt marshes in reducing the load on protective structures is substantiated. It is shown that coastal adaptation requires a shift from static functional zoning to a model with periodic revision of planning restrictions as climate projections become more accurate. The results are applicable to the development of master plans and territorial planning schemes for coastal municipalities.

Keywords: coastal settlements, sea level rise, spatial planning, storm surge, floodplains, building redlines, subsidies, wetlands, CMIP6 SSP, urban zoning,

adaptation.

Актуальность исследования. На протяжении последних трёх десятилетий проблема устойчивого развития территорий, непосредственно примыкающих к морской акватории, приобрела характер междисциплинарного вызова, затрагивающего одновременно градостроительную теорию, инженерную геологию, экономику природопользования и демографическое прогнозирование. Причиной тому служит зафиксированное инструментальными средствами ускоренное повышение среднего глобального уровня океана: по данным спутниковой альтиметрии, охватывающей период 1993-2009 гг., средняя скорость подъёма водной поверхности составила 3,3 ± 0,4 мм/год, что существенно превышает показатель 1,7 ± 0,3 мм/год, характерный для второй половины XX в. по приливным наблюдениям [1]. Вклад отдельных компонентов, например, термического расширения водной массы, таяния горных ледников и малых ледяных шапок, потери массы Гренландским и Западно-Антарктическим ледниковыми щитами, перераспределяется во времени. Если в 1993-2003 гг. ледниковые щиты обеспечивали менее 15% суммарного прироста, то после 2003 года их доля практически удвоилась, компенсируя замедление термического расширения верхних слоёв океана [1]. Полуэмпирические экстраполяции, связывающие темп подъёма с радиационным форсингом или глобальной температурой, дают диапазон прогнозов 30-180 см к 2100 году, причём верхняя граница заметно превосходит оценки, приведённые в Четвёртом оценочном докладе МГЭИК [2], [3]. Значительная неопределённость проекций не даёт градостроительному сообществу возможности использовать единственный сценарий и требует учитывать в территориальных планах несколько вариантов изменения береговой линии.

Пространственное распределение подъёма крайне неравномерно. В западной части Тихого океана локальные темпы трансгрессии втрое превышают глобальное среднее, а в отдельных районах Балтики и Гудзонова залива

наблюдается относительное понижение водной поверхности за счёт гляциоизостатического поднятия суши [1]. Для задач планировки прибрежных населённых мест значение приобретает так называемый относительный уровень моря, складывающийся из тектонических движений, консолидации аллювиальных отложений, антропогенной субсиденции по причине извлечения подземных вод, нефти и газа, а также сокращения наносов в речных дельтах из-за гидротехнического строительства. Величина субсиденции в ряде городов многократно превышает климатический сигнал: за XX столетие Токио опустился на 5 м, Шанхай - на 3 м, Бангкок - на 2 м [1]. В дельтовых зонах Ганга-Брахмапутры, Меконга и Янцзы сочетание этих процессов формирует наиболее острую угрозу для существующей застройки и инженерной инфраструктуры.

Демографическая нагрузка на низко расположенные прибрежные территории продолжает нарастать. В полосе ниже 10-метровой изобаты сосредоточено порядка 10% мирового населения [4], причём значительная его часть сконцентрирована в крупных портовых агломерациях Юго-Восточной и Восточной Азии, Западной Африки и Латинской Америки. Халлегатт и соавторы, выполнившие оценку среднегодовых убытков от наводнений для 136 крупнейших прибрежных городов, показали, что уже в 2005 году совокупные потери составляли около 6 млрд долл. США в год, а при учёте лишь социально-экономического роста без изменения климата к 2050 году эта цифра возрастает до 52 млрд долл. [5]. Если к экономическому развитию прибавить субсиденцию и подъём океана без соответствующей модернизации защитных сооружений, потенциальные убытки достигают 1 трлн. долл. и более, что делает бездействие в сфере территориального планирования экономически неприемлемым.

Важно, что концентрация риска в прибрежных городах крайне неравномерна. На Майами, Нью-Йорк и Новый Орлеан приходится 31% глобальных совокупных потерь, а вместе с Гуанчжоу на эти четыре города приходится 43% расчётного ущерба [6]. Вместе с тем рейтинг по относительному показателю, то есть отношению среднегодовых убытков к валовому городскому

продукту, обнаруживает иную картину: в первой двадцатке преобладают города развивающихся стран, где доля потерь достигает 0,7-1,3 % локального ВВП. Для Гуанчжоу и Нового Орлеана данный коэффициент превышает 1%, что фактически означает необходимость ежегодно резервировать более сотой части валового городского продукта на покрытие ожидаемого ущерба от затоплений [6]. Подобная диспропорция между абсолютными и относительными индикаторами уязвимости указывает на то, что вторичные города и малые прибрежные поселения, не обладающие финансовыми ресурсами мегаполисов, оказываются в существенно более тяжёлом положении, хотя и не привлекают сопоставимого исследовательского и управленческого внимания.

Сельские населённые пункты, расположенные в прибрежной полосе, подвержены аналогичным гидрологическим и геоморфологическим процессам, однако их адаптационный потенциал несопоставимо ниже. Отсутствие капитальных защитных дамб, ограниченные возможности инженерной подготовки территории и зависимость хозяйственной деятельности от состояния мангровых зарослей, солончаков и нерестилищ делают эти поселения чувствительными даже к незначительному подтоплению. Автор подчёркивает, что деградация прибрежных водно-болотных угодий при недостаточном наносном питании на фоне ускоряющейся трансгрессии лишает сельские территории естественного буфера, который исторически смягчал воздействие штормовых нагонов [1]. Утрата данного буфера не компенсируется автоматически инженерными решениями, поскольку стоимость строительства и эксплуатации защитных сооружений в условиях рассредоточенной малоэтажной застройки с низкой плотностью населения зачастую превышает экономически обоснованный порог.

Сценарное моделирование, проведённое в [7], демонстрирует, что даже при адаптационной политике, поддерживающей неизменную вероятность затопления посредством повышения дамб, среднегодовые потери к 2050 году возрастают до 60-63 млрд долл. по причине субсиденции и подъёма океана.

Иными словами, сохранение прежней частоты наводнений не тождественно сохранению прежнего уровня риска: каждое отдельное событие, превышающее расчётный стандарт защиты, причиняет ущерб, превышающий современный на 50% и более. В Александрии, например, при повышении защитного стандарта со 100-летнего до 270-летнего расчётного периода суммарные последствия гипотетического прорыва защитных сооружений утраиваются, с 17 до 51 млрд долл., за счёт подъёма относительного уровня воды на 60 см [8]. Данный вывод имеет отношение к градостроительному проектированию, потому что функциональное зонирование прибрежных территорий должно предусматривать пространственные резервы, допускающие контролируемое отступление застройки от береговой линии и перераспределение хозяйственных функций вглубь территории.

С учётом изложенного стратегическое пространственное планирование прибрежных поселений приобретает статус определяющего инструмента управления рисками. Расчёты свидетельствуют о том, что инвестиции в адаптационные меры в размере 2 млрд долл. и более на один город при ежегодных эксплуатационных затратах около 2% первоначальных вложений способны удержать совокупный ущерб ниже уровня, соответствующего бездействию [9]. Однако распределение этих ресурсов между агломерациями и сельскими поселениями, выбор между защитой, приспособлением застройки и плановым отступлением, определение допустимой плотности освоения в зонах потенциального подтопления - это вопросы территориального планирования, решение которых требует интеграции климатических проекций, геоморфологических данных и социально-экономических прогнозов в единую градостроительную модель.

Исследование направлено на разработку методологических основ такого интегрированного планирования применительно к прибрежным агломерациям и сельским населённым пунктам, подверженным совместному воздействию климатической трансгрессии и антропогенной субсиденции. В работе

последовательно рассматриваются критерии выделения зон дифференцированного градостроительного регулирования, механизмы учёта неопределённости сценариев подъёма уровня моря в документах территориального планирования и принципы размещения объектов критической инфраструктуры с учётом многолетних тенденций изменения береговой линии. Автор исходит из того, что заблаговременное закрепление в генеральных планах и схемах территориального планирования пространственных ограничений, привязанных к вероятностным характеристикам затопления, способно предотвратить формирование новой застройки в зонах неприемлемого риска и, тем самым, снизить будущие потери по сравнению с инерционным сценарием освоения прибрежной полосы.

Степень разработанности проблемы. Количественная оценка угрозы затопления прибрежных территорий и вытекающие из неё задачи территориального регулирования на протяжении последних двух десятилетий привлекают внимание исследователей, работающих на стыке климатологии, гидродинамики и градостроительного проектирования. Обобщив данные спутниковой альтиметрии за 1993-2009 гг., автор зафиксировал среднюю скорость подъёма глобального уровня океана, составившую 3,3 ± 0,4 мм/год и показали, что вклад ледниковых щитов Гренландии и Западной Антарктики, составлявший менее 15% суммарного прироста в начале наблюдательного периода, к концу рассматриваемого интервала практически удвоился [1]. Указанное перераспределение источников трансгрессии делает линейную экстраполяцию прежних тенденций методологически некорректной и требует перехода к сценарному моделированию, учитывающему нестационарность ледниковой динамики. Полуэмпирические проекции, связывающие темп подъёма водной поверхности с радиационным форсингом либо глобальной температурой приземного слоя атмосферы, дают разброс оценок от 30 до 180 см к 2100 году [2], [3], причём верхняя граница данного диапазона существенно превосходит значения, приведённые в Четвёртом оценочном докладе МГЭИК

для сценария A1FI. Значительная неопределённость проекций приводит к неопределённости границ зон затопления и, следовательно, параметров нормативного регулирования застройки [10].

Экономическое измерение проблемы было детализировано автором, оценившим среднегодовые убытки от наводнений в 136 крупнейших портовых агломерациях мира [11]. Автор продемонстрировал, что при сохранении существующего уровня защиты и учёте только социально-экономического роста совокупные потери возрастают с 6 млрд долл. в 2005 году до 52 млрд долл. к 2050 году, а учёт субсиденции и повышения уровня океана без модернизации защитных сооружений увеличивает расчётный ущерб до триллиона долларов и более. Принципиальным для градостроительного планирования является вывод о том, что даже при адаптационной политике, поддерживающей неизменную вероятность затопления посредством наращивания дамб, относительные потери, то есть отношение среднегодовых убытков к валовому городскому продукту, продолжают расти: для Джакарты данный показатель увеличивается на 54%, для Абиджана на 24% [12]. Иначе говоря, каждое отдельное событие, превышающее расчётный стандарт защиты, причиняет ущерб, многократно превосходящий современный, что ставит под сомнение достаточность инженерных подходов к обеспечению безопасности прибрежной застройки.

Вопросы пространственного планирования в условиях нарастающей гидрологической угрозы разрабатывались в контексте управления прибрежными зонами, где автор обосновал триаду адаптационных стратегий - защиту, приспособление и плановое отступление [1]. Нидерландская программа Delta Works, предусматривающая повышение стандарта безопасности до вероятности прорыва защитных сооружений 1:100000 посредством намыва пляжей и расширения дюнного пояса, рассматривается как прецедент интеграции инженерной защиты с ландшафтным планированием [13]. Вместе с тем для сельских населённых пунктов и малых прибрежных поселений, не обладающих финансовыми ресурсами мегаполисов, вопросы выбора между указанными

стратегиями и их нормативного закрепления в документах территориального планирования остаются проработанными в значительно меньшей степени, что определяет исследовательский пробел, на заполнение которого направлена настоящая работа.

Материалы и методы исследования. Методологическую основу картографирования зон затопления составляет последовательное сопряжение климатических проекций, цифровой модели рельефа и гидродинамического моделирования штормовых нагонов. В качестве исходных климатических данных используются сценарии шестой фазы Программы сравнения моделей общей циркуляции (CMIP6), а именно траектории SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5, пришедшие на смену репрезентативным концентрационным траекториям RCP и отличающиеся более детальной увязкой социально-экономических допущений с целевыми уровнями радиационного форсинга [10]. Для горизонта 2050 года проекции повышения глобального среднего уровня океана составляют ориентировочно 15-30 см по сценарию SSP1-2.6, 20-40 см по SSP2-4.5 и 25-50 см по SSP5-8.5; к 2100 году разброс расширяется до 40-80, 50-100 и 60-180 см соответственно [13]. Указанные диапазоны отражают как неопределённость эмиссионных траекторий, так и структурную неопределённость климатических моделей, в особенности в части вклада ледниковой динамики.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) строится на основе данных аэрофотосъёмки с пространственным разрешением не крупнее 1 м и верифицируется по материалам спутниковой альтиметрии ICESat-2 для прибрежной полосы шириной до 5 км от уреза воды. Для дельтовых участков и территорий с выраженной антропогенной микротопографией, дамбами обвалования, каналами, насыпными площадками, выполняется дополнительная коррекция высотных отметок по данным воздушного лазерного сканирования (LiDAR). Абсолютная погрешность итоговой ЦМР не должна превышать ±5 см в плане и ±3 см по высоте, что обеспечивает корректное выделение зон затопления при глубинах подтопления от 10 см.

Гидродинамическое моделирование штормовых нагонов реализуется в программной среде Delft3D или ADCIRC, позволяющей решать нелинейные уравнения мелкой воды на неструктурированной сетке с переменным шагом, сгущающимся вблизи береговой линии и в устьях водотоков. Граничные условия по внешней границе расчётной области задаются из результатов глобальных волновых моделей (WAVEWATCH III, SWAN), а ветровое поле принимается по реанализу ERA5 для исторических событий и по стохастически сгенерированным траекториям тропических и внетропических циклонов для проектных сценариев. Вероятностная характеристика экстремальных уровней воды формируется путём статистического анализа пиковых значений за период не менее 30 лет с последующей экстраполяцией на расчётные периоды повторяемости 10, 50, 100, 200 и 500 лет методом обобщённого распределения экстремальных значений (GEV).

Неопределённость моделирования оценивается с использованием ансамблевого подхода: для каждой траектории SSP выполняется серия расчётов с варьированием коэффициента шероховатости подстилающей поверхности, скорости консолидации грунтов, величины субсиденции и интенсивности штормового ветра. Итоговая граница зоны затопления фиксируется по 90-ому перцентилю ансамбля, что обеспечивает консервативную оценку риска, необходимую для целей нормативного регулирования. Даже при использовании упрощённых моделей разрушения защитных сооружений относительное влияние подъёма уровня и субсиденции на потери слабо зависит от выбора конкретного варианта модели [4], что позволяет распространять выводы на широкий класс расчётных схем.

Результаты исследования. По итогам ансамблевого моделирования выделены три категории территории, различающиеся по характеру и частоте ожидаемого подтопления, и, соответственно, по типу градостроительного регулирования, которое надлежит для них установить. Концепция дифференциации представлена на рисунке 1.

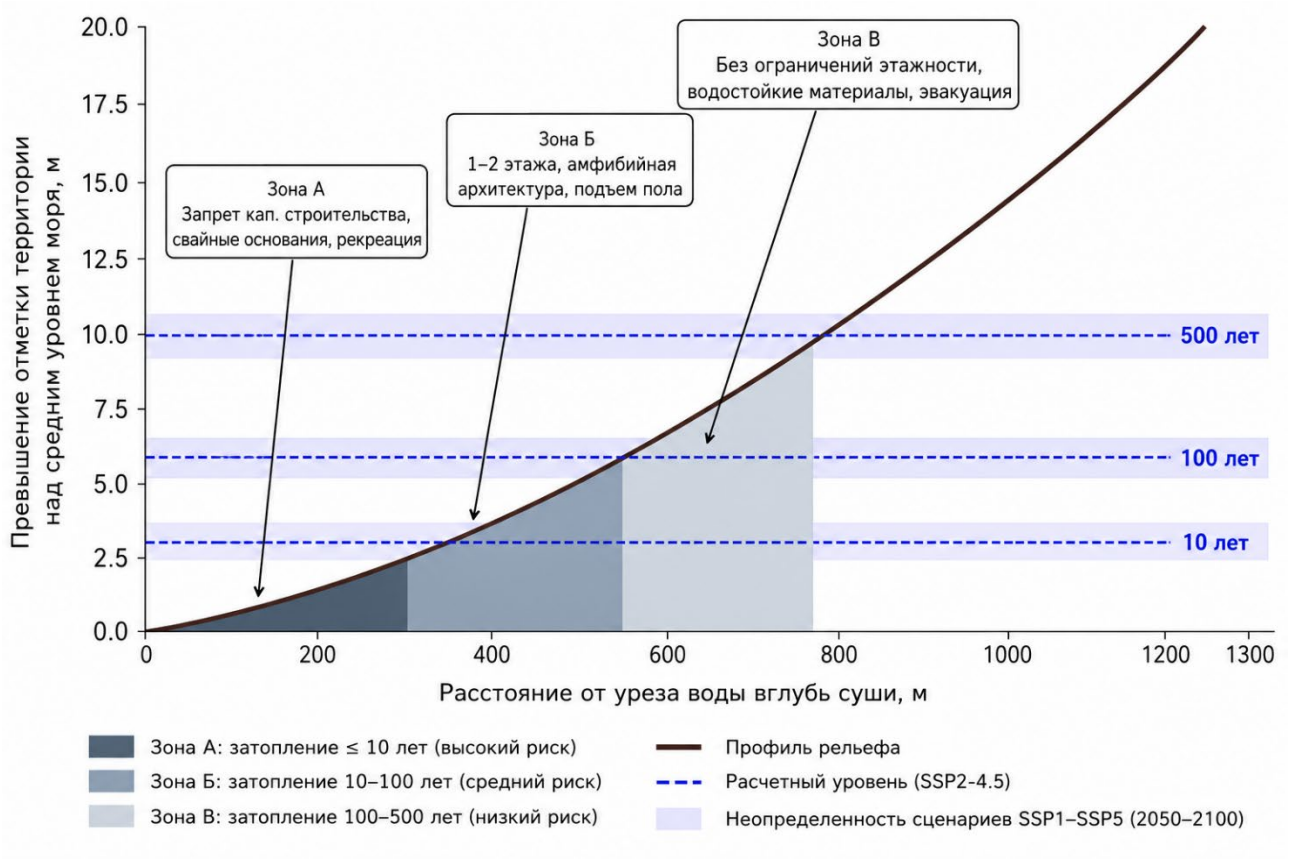


Рисунок 1 - Концептуальная схема зонирования прибрежной территории по степени гидрологической угрозы с привязкой к расчётным периодам повторяемости затопления и сценариям CMIP6 SSP (источник: разработано автором)

При переходе от сценария SSP1-2.6 к SSP5-8.5 граница зоны А смещается вглубь территории на расстояние от 120 до 450 м в зависимости от уклона берегового профиля, а ширина полосы Б увеличивается на 25-60 %. Для пологих дельтовых участков с уклоном менее 1‰ абсолютная величина отступания береговой линии к 2100 году при наихудшем сценарии способна достигать нескольких километров, что делает бессмысленным сохранение существующей функциональной планировки без существенной её переработки (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительная характеристика сценариев CMIP6 SSP применительно к задачам прибрежного территориального планирования на горизонт 2050 года и 2100 года

Параметр	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Целевой радиационный форсинг к 2100 г., Вт/м²	2,6	4,5	8,5
Проекция повышения глобального уровня океана к 2050 г., см	15-30	20-40	25-50
Проекция к 2100 г., см	40-80	50-100	60-180
Ширина неопределённости (межмодельный разброс), % от медианы	±18	±24	±35
Рекомендуемый расчётный период повторяемости для зоны А	10 лет	10 лет	10 лет
Рекомендуемый расчётный период для границы зоны В	200 лет	300 лет	500 лет
Необходимость учёта субсиденции в ЦМР	да, при темпе > 2 мм/год	да, при темпе > 1 мм/год	да, безусловно
Целесообразность пересмотра генерального плана	при изменении границы > 50 м	при изменении границы > 30 м	безусловно

Источник: разработано автором.

При умеренном сценарии SSP2-4.5 ширина неопределённости проекций достигает почти четверти медианного значения, что исключает возможность проектирования защитных сооружений по единственной детерминированной отметке. Градостроительные решения в таких условиях должны закладываться с запасом, перекрывающим межмодельный разброс, либо предполагать поэтапное повышение стандарта защиты по мере уточнения климатических прогнозов. Для удержания относительного риска на постоянном уровне необходимо последовательно снижать вероятность затопления, повышая расчётный стандарт защиты: для Александрии, например, переход от 100-летнего к 270-летнему стандарту требуется при локальном подъёме уровня на 60 см [6]. Аналогичная логика распространяется и на планировочные ограничения: красные линии застройки должны отступать от берега на величину, дополненную резервом, покрывающим неопределённость сценария.

Полученные картографические данные служат основанием для дифференцированного выбора адаптационной стратегии применительно к

конкретному участку прибрежной территории.

Инженерная защита реализуется посредством возведения дамб обвалования, волноломов, бунов, а также формирования искусственных дюнных гряд, выполняющих функцию волногасящего барьера. Нидерландский опыт, на который ссылается автор, демонстрирует, что стратегия наращивания береговой полосы путём намыва песка способна одновременно повышать стандарт безопасности и сохранять рекреационную ценность побережья [1]. Вместе с тем повышение дамб привлекает новую застройку в ранее опасные зоны, вследствие чего при прорыве или переливе ущерб оказывается существенно выше, чем до строительства защиты [1].

Приспособление застройки предполагает сохранение хозяйственного использования территории при условии, что отдельные здания и инфраструктурные объекты проектируются с учётом периодического контакта с водой. К данному классу решений относятся свайные и столбчатые фундаменты, выносящие жилой этаж выше расчётного уровня затопления, амфибийные конструкции, допускающие временное погружение нижних ярусов без потери несущей способности, а также плавучие жилые кварталы, закреплённые на направляющих сваях и способные следовать за колебаниями водной поверхности. Для сельских населённых пунктов дельтовых территорий подобный подход представляет интерес в тех случаях, когда полная защита экономически нецелесообразна, а переселение сопряжено с утратой хозяйственного уклада. В странах с ограниченной адаптационной способностью именно приспособление может оказаться единственной реализуемой стратегией на горизонте ближайших десятилетий [3].

Плановое отступление состоит в организованном переносе застройки и инфраструктуры за пределы зон неприемлемого риска с формированием буферных полос, исключающих последующее капитальное освоение. Распространённое представление о неизбежности массового отступления от берега при подъёме уровня океана не подтверждается анализом затрат и выгод:

для густонаселённых участков стоимость защиты, как правило, оказывается ниже стоимости перемещения активов [3]. Тем не менее, для территорий с низкой плотностью застройки, деградирующими береговыми экосистемами и высоким темпом субсиденции плановое отступление представляет экономически обоснованную альтернативу, позволяющую высвобожденные площади использовать в качестве водно-болотных угодий, рекреационных зон или сельскохозяйственных территорий, не требующих капитальных сооружений (таблица 2).

Таблица 2 - Матрица выбора адаптационной стратегии в зависимости от типа поселения, плотности застройки и темпа относительного подъёма уровня воды

Тип поселения	Плотность застройки, тыс. чел./км²	Темп относительного подъёма, мм/год	Предпочтительная стратегия	Градостроительный инструмент
Крупная портовая агломерация	> 5	< 5	Защита + приспособление застройки	Модернизация дамб, зонирование по периодам повторяемости
Крупная портовая агломерация	> 5	> 5	Защита + частичное плановое отступление	Поэтапный перенос критической инфраструктуры, повышение стандарта защиты
Малый прибрежный город	1–5	< 5	Приспособление застройки + инженерная защита	Свайные фундаменты, локальные волноломы, красные линии
Малый прибрежный город	1–5	> 5	Плановое отступление + приспособление застройки	Буферные зоны, перенос жилой застройки, плавучие конструкции
Сельское поселение (дельтовое)	< 1	< 5	Приспособление застройки	Амфибийная архитектура, сезонное использование территорий
Сельское поселение (дельтовое)	< 1	> 5	Плановое отступление	Плановое переселение, восстановление водно-болотных угодий

Источник: разработано автором.

Для малых прибрежных поселений с низкой плотностью населения и выраженной тенденцией относительного опускания земной поверхности планировочная адаптация должна основываться на сравнительной оценке инженерных, природоориентированных и организационных мероприятий. При скорости локальной субсиденции более 5 мм/год повышается значимость долгосрочного анализа относительного изменения уровня моря и устойчивости существующей инженерной инфраструктуры. В зависимости от особенностей территории могут рассматриваться укрепление береговой линии, восстановление природных защитных элементов, ограничение нового капитального строительства в зонах риска и изменение функционального использования наиболее уязвимых участков. Организованное переселение населения допускается рассматривать как один из альтернативных сценариев при высокой степени территориальной опасности, однако его экономическая и социальная целесообразность требует самостоятельного обоснования. Для крупных прибрежных агломераций приоритетные мероприятия также определяются сопоставлением инженерной защиты, территориальной адаптации и допустимого уровня остаточного риска.

Картографические результаты моделирования получают юридическое закрепление через установление красных линий, отделяющих территорию, на которой капитальное строительство запрещено или существенно ограничено, от зон допустимого освоения. В зоне А (повторяемость затопления 10 лет и чаще) не допускается размещение жилых зданий, объектов социальной инфраструктуры и производственных сооружений; разрешаются лишь временные постройки, объекты рекреации без капитальных фундаментов и инженерные сооружения берегоукрепления. Зона Б (повторяемость 10-100 лет) допускает строительство при условии подъёма отметки пола первого этажа выше расчётного уровня затопления для данного периода повторяемости не менее чем на 0,5 м и применения водостойких материалов в конструкциях ниже этой

отметки. В зоне В (повторяемость 100-500 лет) капитальное строительство не ограничивается, однако инженерные сети следует проектировать с учётом возможности кратковременного подтопления и предусматривать эвакуационные маршруты.

Границы указанных зон подлежат пересмотру не реже одного раза в десять лет с учётом обновления климатических проекций и данных мониторинга субсиденции.

Наряду с инженерными и планировочными мерами адаптации возрастающую роль приобретут подходы, основанные на использовании экосистемных функций прибрежных ландшафтов. Прибрежные водно-болотные угодья (солончаки, мангровые заросли, марши) способны аккумулировать наносы и наращивать собственную высоту со скоростью, сопоставимой с темпом трансгрессии, при условии достаточного седиментационного питания [3]. Деградация данных экосистем лишает прибрежную территорию естественного буфера, смягчающего воздействие штормовых нагонов, и, тем самым, увеличивает нагрузку на инженерные защитные сооружения.

Применительно к Азово-Черноморскому побережью Российской Федерации природным аналогом мангровых зарослей и тропических маршей выступают плавни и лиманные комплексы дельты Кубани, а также солончаковые участки Таманского полуострова. Плавневые территории, занятые тростниковыми и рогозовыми ассоциациями, выполняют функцию естественного волногасящего барьера шириной от нескольких сотен метров до нескольких километров, снижая высоту нагонной волны на 30-60 % в зависимости от плотности растительного покрова и глубины подтопления. Включение плавневых полос в состав буферных зон отступления позволяет не только сократить затраты на инженерную защиту расположенных за ними населённых пунктов, но и сохранить рыбохозяйственное значение лиманов, являющихся нерестилищами ценных видов. Для Калининградского побережья аналогичную роль играют приморские дюнные комплексы с растительностью

колосняка песчаного и приморских лужаек, а также заболоченные участки Куршской косы, где ограничение рекреационной нагрузки и восстановление растительного покрова дюн рассматриваются как элемент адаптационной стратегии наряду с берегоукрепительными сооружениями (рисунок 2).

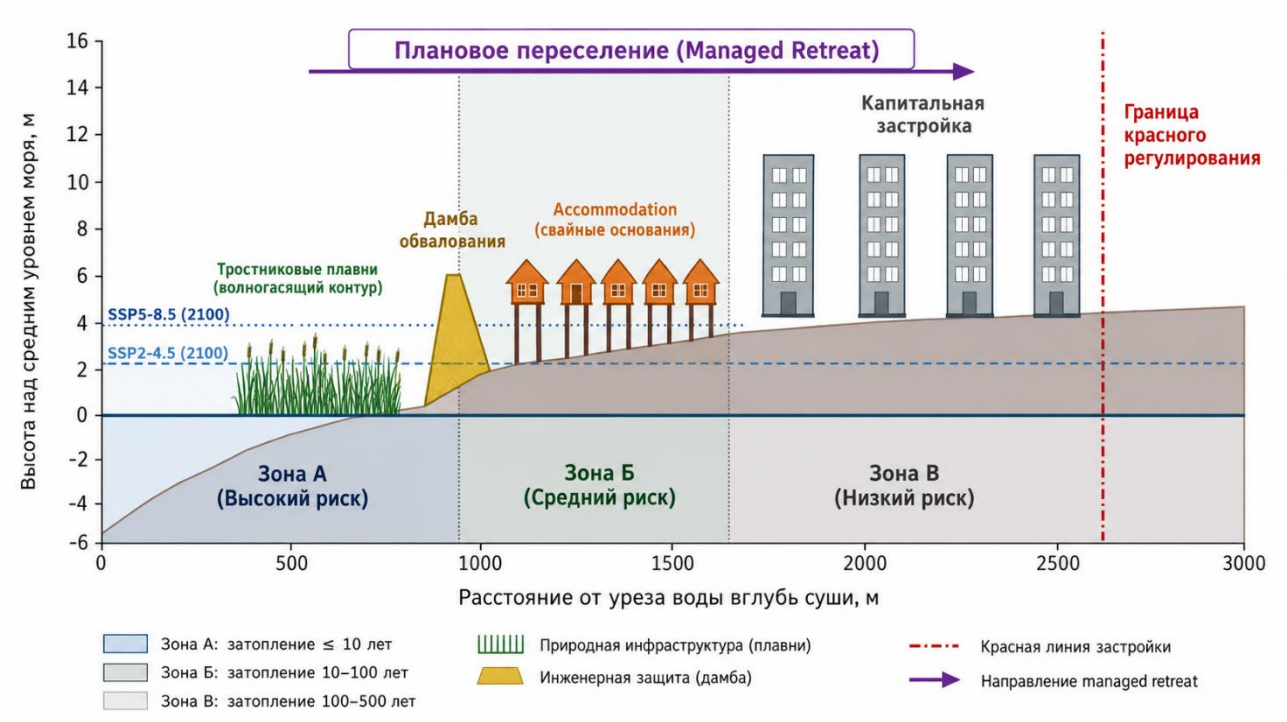


Рисунок 2 - Схема интеграции природной инфраструктуры в систему зонирования прибрежной территории (на примере дельтового участка Азово-Черноморского побережья) (источник: разработано автором)

Плавневая или маршевая полоса, занимающая внешнюю часть зоны А, не является зоной капитального строительства, однако выполняет защитную функцию, снижая расчётную высоту нагона для расположенной за ней дамбы или дюны. Это позволяет уменьшить требуемую высоту инженерного сооружения на 0,5-1,2 м по сравнению с вариантом незащищённого берега, что при значительной протяжённости побережья даёт существенную экономию капитальных вложений. Одновременно данная полоса служит экологическим коридором и местом нереста, что особенно значимо для сельских поселений, хозяйственный уклад которых связан с рыболовством и аквакультурой.

Обсуждение результатов исследования. Представленные данные моделирования и предложенная схема зонирования позволяют выявить ряд

закономерностей, имеющих значение для теории и практики территориального планирования прибрежных поселений. Прежде всего, обращает на себя внимание то обстоятельство, что неопределённость климатических проекций, составляющая 18-35 % медианного значения в зависимости от сценария (таблица 1), делает невозможным установление единственной фиксированной границы зоны затопления на весь расчётный период. Градостроительный регламент, привязанный к конкретной отметке, устаревает по мере поступления новых наблюдательных данных и уточнения моделей ледниковой динамики. Для планировочной практики это означает, что красные линии и границы функциональных зон целесообразно устанавливать как адаптивные, подлежащие сдвигу по мере пересмотра проекций.

Результаты международных сравнительных исследований климатических рисков для совокупности 136 прибрежных городов [3] свидетельствуют о неравномерном распределении потенциальных экономических потерь между территориями различного масштаба и уровня социально-экономического развития. Рассматриваемый массив используется в настоящей работе как внешний аналитический источник и не представляет собой самостоятельную эмпирическую выборку исследуемых российских поселений. При оценке распределения рисков необходимо разграничивать абсолютную величину ожидаемого экономического ущерба и его относительную значимость для местной экономики. Крупные агломерации могут характеризоваться наиболее высокими абсолютными потерями вследствие значительной концентрации населения и капитальных объектов, тогда как для малых населённых пунктов даже сравнительно ограниченный материальный ущерб способен создавать существенную нагрузку на местные бюджеты. Применительно к прибрежным территориям России данные международных сопоставлений следует использовать для обоснования направлений анализа.

Анализ стратегий адаптации показывает, что инженерная защита, оставаясь необходимым элементом обеспечения безопасности, не является

достаточной. При поддержании неизменной вероятности затопления посредством повышения дамб величина потерь при событиях, превышающих расчётный стандарт, возрастает более чем на 50%. Зависимость от защитных сооружений возрастает, однако одновременно повышается уязвимость в случае их отказа или перелива. Данный вывод подкрепляет аргумент в пользу сочетания инженерных мер с планировочными ограничениями: красные линии, запреты на капитальное строительство в зонах высокой повторяемости затопления, требования к отметкам первых этажей и типу фундаментов должны рассматриваться как компонент системы обеспечения безопасности.

Выводы. Итогом работы является обоснование того, что планировочный регламент, фиксирующий допустимые параметры освоения в зависимости от вероятностных характеристик подтопления, выступает первичным инструментом управления риском, а дамбы, волноломы и иные технические конструкции выполняют подчинённую роль, обеспечивая реализацию уже принятого планировочного решения. Подобная инверсия приоритетов составляет, по мнению автора, сдвиг, без которого адаптация прибрежных поселений к прогрессирующей трансгрессии остаётся фрагментарной и экономически неэффективной.

Методологический аппарат, апробированный в настоящей работе, строится на сопряжении климатической проекции, цифровой модели рельефа и гидродинамического расчёта нагонных явлений. Ни один из этих компонентов в отдельности не способен служить основанием для установления нормативных границ застройки; только их совместное использование с оценкой неопределённости по 90-ому перцентилю ансамбля обеспечивает уровень достоверности, достаточный для закрепления результатов в документах территориального планирования. При этом проведённый анализ подтверждает вывод исследователей о том, что неклиматические компоненты относительного подъёма водной поверхности на локальном уровне способны втрое и более перекрывать климатический сигнал [1], что делает мониторинг вертикальных

движений земной поверхности обязательной процедурой при актуализации планировочной документации.

Полученные результаты вносят вклад в развитие теоретических основ планировки сельских населённых пунктов, расположенных в прибрежной полосе, и в совершенствование методического обеспечения территориального планирования в условиях нарастающей гидрологической нестабильности. Сформулированные положения о приоритете планировочного регулирования над инженерной защитой, об адаптивном характере нормативных границ и о необходимости интеграции природных буферных ландшафтов в систему обеспечения безопасности прибрежной застройки могут быть использованы при подготовке нормативных и методических документов федерального и регионального уровней, а также в учебном процессе по направлению подготовки в области градостроительства и территориального планирования.

Список литературы

1. Загребин С. О., Янковская Ю. С. Закономерности развития систем расселения прибрежных арктических регионов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2026. – Т. 28. – №. 2. – С. 9-23.
2. Спирин П. П. Определение морского пространственного планирования в градостроительной системе Российской Федерации // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20. – №. 7. – С. 1000-1016.
3. Родионов Д. Г., Еремина И. А., Золотарев Т. В. Стратегическое планирование пространственного развития крупных городов в условиях цифровой регионализации // Вестник Академии знаний. – 2025. – №. 5 (70). – С. 338-348.
4. Глигич-Золотарева М. В. Стратегия пространственного развития Российской Федерации: старые проблемы, новые решения // Федерализм. – 2024. – Т. 29. – №. 3. – С. 5-23.
5. Дружинин А. Г., Вольхин Д. А., Кузнецова О. В. Приморские муниципалитеты в пространственном развитии России: многомерная типологизация // Балтийский регион. – 2025. – Т. 17. – №. 3. – С. 81-101.

6. Петровская Е. И., Халилова Н. К., Андрияничева К. А., Юлаева Р. И. Особенности развития Балтийских курортов // Architecture and Modern Information Technologies. – 2026. – №. 1 (74). – С. 128-156.

7. Гогоберидзе Г. Г., Косьян Р. Д., Огородов С. А., Чубаренко Б. В., Бурнашов Е. М., Румянцева Е. А. Кадастр морских берегов России: заделы, проблемы, перспективы // Океанологические исследования. – 2024. – Т. 52. – №. 2. – С. 183-205.

8. Грушина О. В., Русановский В. А. Управление агломерационными процессами в развитии субурбанизированных территорий на примере Иркутского региона // Государственное управление. Электронный вестник. – 2023. – №. 97. – С. 112-137.

9. Дубино А. М. Зарубежный опыт включения водно-зеленого каркаса в градостроительную документацию //Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 3 (72). – С. 275-292.

10. Дубино А. М. Многоуровневый подход к формированию водно-зеленого каркаса города с применением водосберегающих технологий // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 2 (71). – С. 232-248.

11. Рюмкин С. В., Рюмкина И. Н., Терютина М. М. Сельские территории как объект развития // Естественно-гуманитарные исследования. – 2023. – №. 3 (47). – С. 208-216.

12. Тутыгин А. Г., Чижова Л. А., Носырев Н. С. Социальная функция транспортного потенциала территории (на примере Архангельской агломерации) // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2024. – №. 11 (169). – С. 25.

13. Дусаева Е. М. Научно-технологическое развитие регионов Арктической зоны Российской Федерации для промышленного рыболовства // Пространство науки. – 2025. – Т. 2. – №. 3. – С. 574-597.

References

1. Zagrebin S. O., Yankovskaya Yu. S. Zakonomernosti razvitiya sistem rasseleniya

pribrezhny`x arkticheskix regionov // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. – 2026. – T. 28. – №. 2. – S. 9-23.

2. Spirin P. P. Opredelenie morskogo prostranstvennogo planirovaniya v gradostroitel`noj sisteme Rossijskoj Federacii // Vestnik MGSU. – 2025. – T. 20. – №. 7. – S. 1000-1016.

3. Rodionov D. G., Eremina I. A., Zolotarev T. V. Strategicheskoe planirovanie prostranstvennogo razvitiya krupny`x gorodov v usloviyax cifrovoj regionalizacii // Vestnik Akademii znanij. – 2025. – №. 5 (70). – S. 338-348.

4. Gligich-Zolotareva M. V. Strategiya prostranstvennogo razvitiya Rossijskoj Federacii: stary`e problemy`, novy`e resheniya // Federalizm. – 2024. – T. 29. – №. 3. – S. 5-23.

5. Druzhinin A. G., Vol`xin D. A., Kuzneczova O. V. Primorskie municipalitety` v prostranstvennom razvitii Rossii: mnogomernaya tipologizaciya // Baltijskij region. – 2025. – T. 17. – №. 3. – S. 81-101.

6. Petrovskaya E. I., Xalilova N. K., Andriyanicheva K. A., Yulaeva R. I. Osobennosti razvitiya Baltijskix kurortov // Architecture and Modern Information Technologies. – 2026. – №. 1 (74). – S. 128-156.

7. Gogoberidze G. G., Kos`yan R. D., Ogorodov S. A., Chubarenko B. V., Burnashov E. M., Rumyanceva E. A. Kadastr morskix beregov Rossii: zadely`, problemy`, perspektivy` // Okeanologicheskie issledovaniya. – 2024. – T. 52. – №. 2. – S. 183-205.

8. Grushina O. V., Rusanovskij V. A. Upravlenie aglomeracionny`mi processami v razvitii suburbanizirovanny`x territorij na primere Irkutskogo regiona // Gosudarstvennoe upravlenie. E`lektronny`j vestnik. – 2023. – №. 97. – S. 112-137.

9. Dubino A. M. Zarubezhny`j opy`t vklyucheniya vodno-zelenogo karkasa v gradostroitel`nuyu dokumentaciyu //Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 3 (72). – S. 275-292.

10. Dubino A. M. Mnogourovnevy`j podxod k formirovaniyu vodno-zelenogo karkasa goroda s primeneniem vodosberegayushhix texnologij // Architecture and Modern

Information Technologies. – 2025. – №. 2 (71). – S. 232-248.

11. Ryumkin S. V., Ryumkina I. N., Teryutina M. M. Sel`skie territorii kak ob``ekt razvitiya // Estestvenno-gumanitarny`e issledovaniya. – 2023. – №. 3 (47). – S. 208-216.

12. Tuty`gin A. G., Chizhova L. A., Nosy`rev N. S. Social`naya funkciya transportnogo potenciala territorii (na primere Arxangel`skoj aglomeracii) // Regional`ny`e problemy` preobrazovaniya e`konomiki. – 2024. – №. 11 (169). – S. 25.

13. Dusaeva E. M. Nauchno-texnologicheskoe razvitie regionov Arkticheskoj zony` Rossijskoj Federacii dlya promy`shlennogo ry`bolovstva // Prostranstvo nauki. – 2025. – T. 2. – №. 3. – S. 574-597.

Статья поступила в редакцию 28.05.2026; одобрена после рецензирования 14.07.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 28.05.2026; approved after peer review 14.07.2026; accepted for publication 08.10.2026.

CONTENTS

2.1.7. Construction Technology and Organization (Technical Sciences) 10

Levitskaya K.M., Sukhanov A.V. INJECTION STABILIZATION OF WATER-SATURATED WEAK SOILS: ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS 10

Ryzhov S.P. ROBOTIC ASSEMBLY OF STEEL BUILDING FRAMES WITH ADAPTIVE WELDING CONTROL 27

Polyakov D.A. INSTALLATION OF VENTILATED FACADES WITH INTEGRATED PHOTOVOLTAIC MODULES: TECHNOLOGICAL AND QUALITY CONTROL OPERATIONS 47

2.1.12. Architecture of Buildings and Structures. Creative Concepts of Architectural Activity (Technical Sciences)..... 65

Bakirov R.T., Kapitonov M.V. FORM-FINDING OF MEMBRANE ROOFS BASED ON THE FORCE DENSITY METHOD AND EVOLUTIONARY SEARCH 65

Pukhova A.I., Starkov A.I. COMPARATIVE ASSESSMENT OF VERTICAL GREENING SYSTEMS FOR FACADES IN A TEMPERATE CONTINENTAL CLIMATE..... 86

Eremeeva V.A. SPATIAL ORGANIZATION OF TRANSPORT INTERCHANGE HUB BUILDINGS: TYPOLOGICAL ANALYSIS..... 103

2.1.13. Urban Planning, Planning of Rural Settlements (Technical Sciences) 120

Buzikaeva A.V., Koshelev A.V. NETWORK ANALYSIS OF PEDESTRIAN ACCESSIBILITY TO EVERYDAY SERVICES IN THE 15-MINUTE CITY MODEL 120

Oleinikova R.E. COMPUTATIONAL ASSESSMENT OF PEDESTRIAN WIND COMFORT FOR DIFFERENT URBAN MORPHOTYPES 142

Amerkhanova G.I. ANALYSIS OF PEDESTRIAN CATCHMENT AREAS OF TRANSIT STOPS IN TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT OF MEDIUM-SIZED CITIES..... 163

Sitdikov V.M. PLANNING APPROACHES TO ADAPTING COASTAL SETTLEMENTS TO SEA-LEVEL RISE RISKS 181