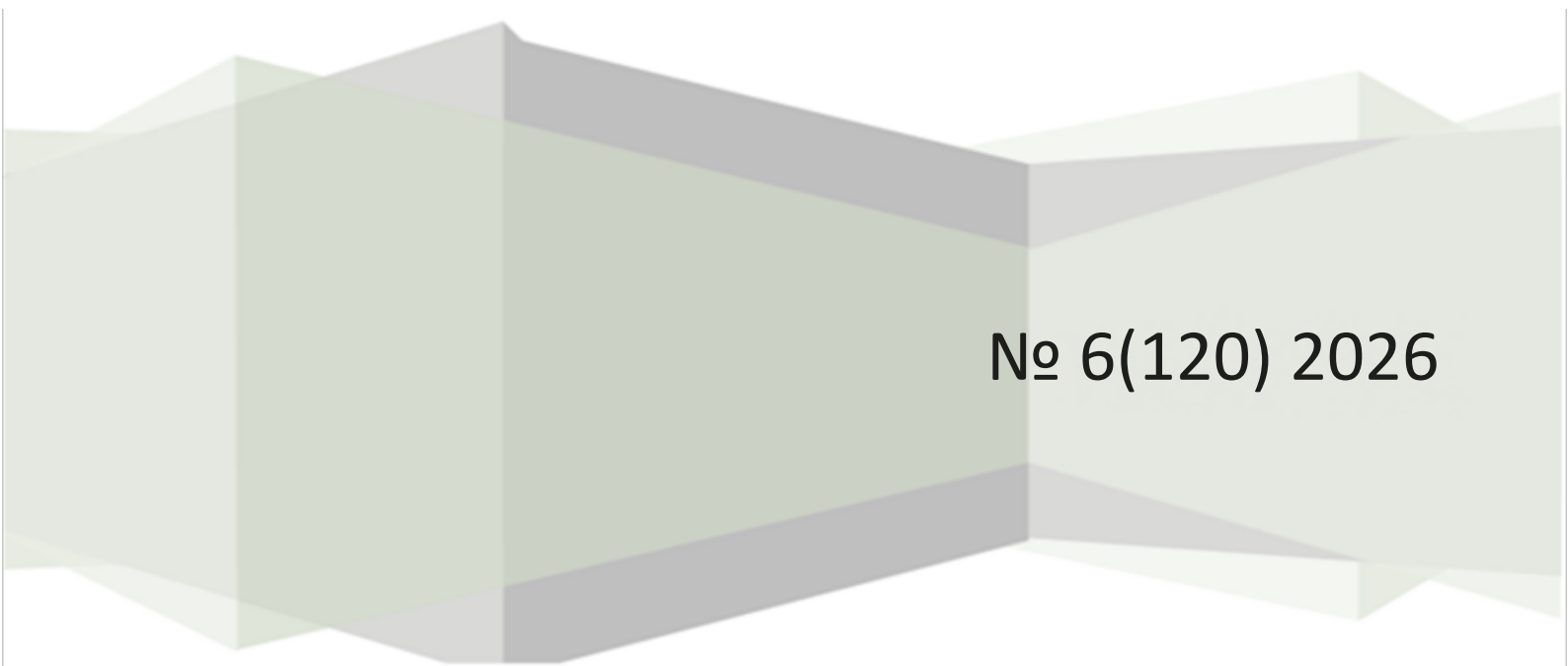


ISSN 1997-9347

Components of Scientific and Technological Progress

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL



№ 6(120) 2026

Санкт-Петербург, 2026

Journal "Components
of Scientific and Technological
Progress"
is published 12 times a year

The journal is registered with
the Federal Service for Supervision
of Communications, Information
Technology and Mass Media and
Cultural Heritage Protection.
Certificate of Mass Media Registration
ПМ № ТУ78-01919.

Founder

Development Fund for Science
and Culture

The journal "Components of Scientific
and Technological Progress" is included
in the list of HAC leading peer-reviewed
scientific journals and publications
in which the main scientific results
of the dissertation for the degree
of doctor and candidate of sciences
should be published

Chief editor

Olga Voronkova

Page planner:

Marina Karina

Copy editor:

Natalia Gunina

Postal address:

13 Shpalernaya St,
St. Petersburg, Russia

Contact phone:

(+357)99-740-463
8(915)678-88-44

E-mail:

tmbprint@mail.ru

Subscription index of Agency
"Rospechat" No 70728
for periodicals.

Information about published
articles is regularly provided to
Russian Science Citation Index
(Contract No 124-04/2011R).

Website:

<http://moofrnk.com/>

Editorial opinion may be different
from the views of the authors.
Please, request the editors'
permission to reproduce
the content published in the journal.

ADVISORY COUNCIL

Voronkova Olga Vasilyevna – Doctor of Economics, Professor,
Academy of the Academy of Natural Sciences, tel.: 8(981)9720993,
E-mail: voronkova@tambov-konfcentr.ru, St. Petersburg (Russia)

Tyutyunnik Vyacheslav Mikhailovich – Doctor of Technical
Sciences, Candidate of Chemical Sciences, Professor, Director of
Tambov branch of Moscow State University of Culture and Arts,
President of the International Information Center for Nobel Prize,
Academy of Natural Sciences, tel.: 8(4752)504600,
E-mail: vmt@tmb.ru, Tambov (Russia)

Bednarzhevsky Sergey Stanislavovich – Doctor of Technical
Sciences, Professor, Head of Department of Safety, Surgut State
University, laureate of State Prize in Science and Technology,
Academy of Natural Sciences and the International Energy Academy,
tel.: 8(3462)762812, E-mail: sbed@mail.ru, Russia

Omar Larouk – PhD, Associate Professor, National School
of Information Science and Libraries University of Lyon,
tel.: +0472444374, E-mail: omar.larouk@enssib.fr, Lyon (France)

Wu Songjie – PhD in Economics, Shandong Normal University,
tel.: +86(130)21696101; E-mail: qdwucong@hotmail.com,
Shandong (China)

Du Kun – PhD in Economics, Associate Professor, Department of
Management and Agriculture, Institute of Cooperation of Qingdao
Agrarian University, tel.: 8(960)6671587,
E-mail: tambovdu@hotmail.com, Qingdao (China)

Andreas Kyriakos Georgiou – Lecturer in Accounting, Department of
Business, Accounting & Finance, Frederick University,
tel.: (00357) 99459477 E-mail: bus.akg@frederick.ac.cy, Limassol
(Cyprus)

Petia Tanova – Associate Professor in Economics, Vice-Dean of
School of Business and Law, Frederick University,
tel.: (00357)96490221, E-mail: ptanova@gmail.com, Limassol
(Cyprus)

Sanjay Yadav – Doctor of Philology, Doctor of Political Sciences,
Head of Department of English, Chairman St. Palus College Science,
tel.: 8(964)1304135, Patna, Bihar (India)

Levanova Elena Alexandrovna – Doctor of Education, Professor, Department of Social Pedagogy and Psychology, Dean of the Faculty of retraining for Applied Psychology, Dean of the Faculty of Pedagogy and Psychology of the Moscow Social and Pedagogical Institute; tel.: 8(495)6074186, 8(495)6074513; E-mail: dekanmospi@mail.ru, Moscow (Russia)

Petrenko Sergey Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Mathematical Methods in Economics, Lipetsk State Pedagogical University, tel.: 8(4742)328436, 8(4742)221983, E-mail: viola@lipetsk.ru, viola349650@yandex.ru, Lipetsk (Russia)

Tarando Elena Evgenievna – Doctor of Economics, Professor of the Department of Economic Sociology, St. Petersburg State University, tel.: 8(812)2749706, E-mail: elena.tarando@mail.ru, St. Petersburg (Russia)

Veress József – PhD, Researcher in Information Systems Department, Business School of Corvinus University, tel.: 36 303206350, 36 1 482 742; E-mail: jozsef.veress@uni-corvinus.hu, Budapest (Hungary)

Kochetkova Alexandra Igorevna – Doctor of Philosophy and Cultural Studies (degree in organizational development and organizational behavior), PhD, Professor, Department of General and Strategic Management Institute of Business Administration of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, E-mail: dak6966@gmail.com, Moscow (Russia)

Bolshakov Sergey Nikolaevich – Doctor of Political Sciences, Doctor of Economics, Vice-Rector for Academic Affairs, Professor, Syktyvkar State University named after Pitirim Sorokin, tel.: 8(921)6334832, E-mail: snbolshakov@mail.ru, Syktyvkar (Russia)

Karakasidou Ellada – A&G, Kotanides LTD, Logistic, tel.: +99346270, E-mail: espavoellada9@gmail.com, Paphos (Cyprus)

Artyukh Angelika Alexandrovna – Doctor of Art History, Professor of the Department of Dramatic and Cinema Studies, St. Petersburg State University of Cinema and Television; tel.: +7(911)9250031; E-mail: s-melnikova@list.ru, St. Petersburg (Russia)

Melnikova Svetlana Ivanovna – Doctor of Art History, Professor, Head of the Department of Dramatic Art and Cinema Studies at the Screen Arts Institute of St. Petersburg State University of Cinema and Television; tel.: +7(911)9250031; E-mail: s-melnikova@list.ru, St. Petersburg (Russia)

Pukharensky Yuri Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Technology and Metrology at St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; tel.: +7(921)3245908; E-mail: tsik@spbgasu.ru, St. Petersburg (Russia)

Содержание

Строительные конструкции, здания и сооружения

Михеев В.С., Круглякова В.М. Методика определения стоимости выполненных работ на объектах культурного наследия в рамках строительно-технической экспертизы: анализ типичных ошибок при применении повышающих коэффициентов 6

Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Карапузова Н.Ю., Хлыбов А.Д., Мимишев А.А. К определению фракционного проскока пыли в инерционных пылеуловителях со встречными закрученными потоками 12

Усадский Д.Г., Зинкин И.В. Определение расчетного воздухообмена для сварочных постов цеха по изготовлению деталей и узлов систем вентиляции 21

Фокин В.М., Нестеренко С.В., Колесников Ф.А., Евстафьева Н.Ю. Система теплоснабжения с флюидным теплоносителем, пластинчатым и спиральным теплообменником (чиллером) 27

Строительные материалы и изделия

Srewi Dhamyaa Ali Kadhim, Obaidi Adham Abdulsattar Hameed, Farah Faaq Taha, Isam Saleem Mhaimeed Concrete with Photoluminescent Properties 32

Технология и организация строительства

Кирсанова А.М., Хубаев А.О. Оптимизация организации возведения монолитных конструкций в жилищном строительстве 41

Руденко А.А., Ласкутина О.С., Михайлов А.Е., Бирюков А.Н. Метод восстановления поврежденных производственных объектов в условиях стесненной городской застройки 48

Savin I.M., Abramov I.L. Organizational and Technical Reserves for Increasing the Efficiency of Construction Production Using Machines and Mechanisms 56

Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Xiao Shuxin, Turkina N.R. Design of an Adjustable Support Device for Maintenance of Metro Cars 63

Мировая экономика

Al-Eryani H.M.H., Zaynullin S.B. External Economic Factors in Yemen's Energy Sector Crisis: A Regional and Global Trade Perspective 69

Воронкова О.В., Саллум М. Инвестиционный климат и его влияние на международное сотрудничество 74

Contents

Civil Structures, Buildings and Related Structures

Mikheev V.S., Kruglyakova V.M. Methodology for Determining the Cost of Completed Works at Cultural Heritage Sites Within Forensic Construction Expertise: Analysis of Typical Errors in Applying Increasing Coefficients.....	6
--	---

Heating, Ventilation, Air Conditioning, Gas Supply and Lighting

Karapuzova N.Y., Khlybov A.D., Mimishev A.A. Determination of the Fractional Dust Leakage in Inertial Dust Collectors with Counter-Swirling Flows	12
Usadsky D.G., Zinkin I.V. Determination of Calculated Air Exchange for Welding Stations in a Workshop Manufacturing Parts and Components of Ventilation Systems.....	21
Fokin V.M., Nesterenko S.V., Kolesnikov F.A., Evstafieva N.Yu. Heat Supply System with Fluid Coolant, Plate and Spiral Heat Exchanger (Chiller)	27

Building Materials and Products

Сриви Дамийа Али Кадим, Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид, Фарах Фаак Таха, Исам Салим мхаймид Бетон с фотолюминесцентными свойствами	32
---	----

Construction Technology and Management

Kirsanova A.M., Khubaev A.O. Optimization of the Organization of Monolithic Construction in Residential Building.....	41
Rudenko A.A., Laskutina O.S., Mikhailov A.E., Biryukov A.N. A Method for Restoring Damaged Industrial Facilities in Constrained Urban Development Conditions.....	48
Савин И.М., Абрамов И.Л. Организационно-технические резервы повышения результативности строительного производства с использованием машин и механизмов	56

Environmental Safety of Construction and Urban Economy

Сяо Шусинь, Туркина Н.Р. Проектирование регулируемого опорного устройства для технического обслуживания вагонов метрополитена.....	63
---	----

World Economy

Аль-Иряни Х.М.Х., Зайнуллин С.Б. Внешнеэкономические факторы кризиса энергетического сектора Йемена: региональный и мирохозяйственный аспект	69
Voronkova O.V., Salloum M. Investment Climate and Its Impact on International Cooperation.....	74

УДК 69.003.13

**Методика определения стоимости
выполненных работ на объектах
культурного наследия в рамках
строительно-технической экспертизы:
анализ типичных ошибок при применении
повышающих коэффициентов**

В.С. Михеев, В.М. Круглякова

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет»,
г. Москва (Россия)*

Ключевые слова и фразы: нормативная документация; объекты культурного наследия; повышающие коэффициенты; реставрация; сметная стоимость; строительно-техническая экспертиза; судебная экспертиза; ценообразование в строительстве.

Аннотация. Объекты культурного наследия (ОКН) занимают исключительное место в системе государственного регулирования строительной деятельности Российской Федерации, что обуславливает повышенные требования к точности стоимостных расчетов при проведении строительно-технических экспертиз.

Цель исследования – разработать и верифицировать методику определения стоимости выполненных работ на ОКН в рамках судебной строительно-технической экспертизы, обеспечивающую корректное применение повышающих коэффициентов и исключение типичных нарушений.

Задачи: систематизировать действующую нормативно-методическую базу ценообразования на ОКН; выявить и классифицировать типичные ошибки при применении повышающих коэффициентов; провести количественную оценку стоимостных последствий нарушений; разработать пошаговую методику верификации применяемых коэффициентов; апробировать методику на реальных экспертных материалах.

Гипотеза: большинство стоимостных искажений на ОКН носит системный характер и обусловлено ограниченным числом повторяющихся методологических нарушений, устранение которых возможно посредством формализованной процедуры верификации.

Методы: сравнительный правовой анализ нормативной базы, экспертное моделирование стоимостных расче-

тов, статистический анализ материалов 47 судебных строительно-технических экспертиз 2019–2024 годов.

Результаты: систематизированы пять групп типичных ошибок (частота 29–68 %), установлен диапазон стоимостных искажений 15–57 %, выявлен устойчивый тренд роста среднего завышения стоимости с 18,2 % до 33,2 % за 2019–2024 гг., разработана и апробирована шестиступенчатая методика верификации коэффициентов (стоимостные отклонения на объектах апробации 27,3–44,8 %).

Введение

Объекты культурного наследия (ОКН) Российской Федерации имеют особый правовой режим, установленный Федеральным законом от 25.06.2002 № 73-ФЗ [1]. Ценообразование на таких объектах регулируется многоуровневой нормативной системой, специфика которой порождает системные ошибки при проведении строительно-технических экспертиз. Цель исследования – систематизировать типичные ошибки при применении повышающих коэффициентов к сметным расценкам на ОКН и разработать верифицированную методику их устранения в рамках судебно-экспертной практики.

Методологическую основу составляет анализ нормативно-правовых актов Минстроя и Минкультуры РФ с применением методов сравнительного правового анализа и экспертного моделирования. Нормативная база ценообразования охватывает три уровня: федеральные сборники ГЭСН-Реставрация [3] и ФЕРр; ведомственные документы – Приказ Минстроя № 421/пр от 04.08.2020 и Постановление Правительства № 87 [2]; региональную базу субъектов РФ. Эмпирическую основу составили 47 строительно-технических экспертиз (2019–2024 гг.) по ОКН федерального, регионального и местного значения в пяти городах России. Каждое заключение верифицировалось по пяти параметрам: наличие нормативного основания коэффициента; соответствие объекта обложения; отсутствие дублирования факторов; корректность территориального применения; правомерность совместного применения нескольких коэффициентов.

Классификация и частота ошибок

По итогам анализа выделено пять групп нарушений (рис. 1): ошибки выбора нормативной базы – 68 %; двойное применение коэффициентов – 54 %; ошибки территориальных коэффициентов – 43 %; необоснованная стесненность – 38 %; ошибки накладных расходов – 29 %. Применение расценок ГЭСН вместо ГЭСН-Реставрация и наоборот искажает стоимость в 2,5–3,5 раза; двойной счет возникает при совместном использовании коэффициента сложных реставрационных работ и коэффициента стесненности, уже учтенного в базовых нормах ГЭСН-Реставрация [3].

Количественная оценка искажений

Модельные расчеты (табл. 1, рис. 2) показывают, что ошибки завышают стоимость на 15–35 % или занижают ее до 57 %. Применение новостроечных расценок вместо реставрационных чаще приводит к занижению, поскольку реставрационные нормы закладывают значительно большие трудозатраты.

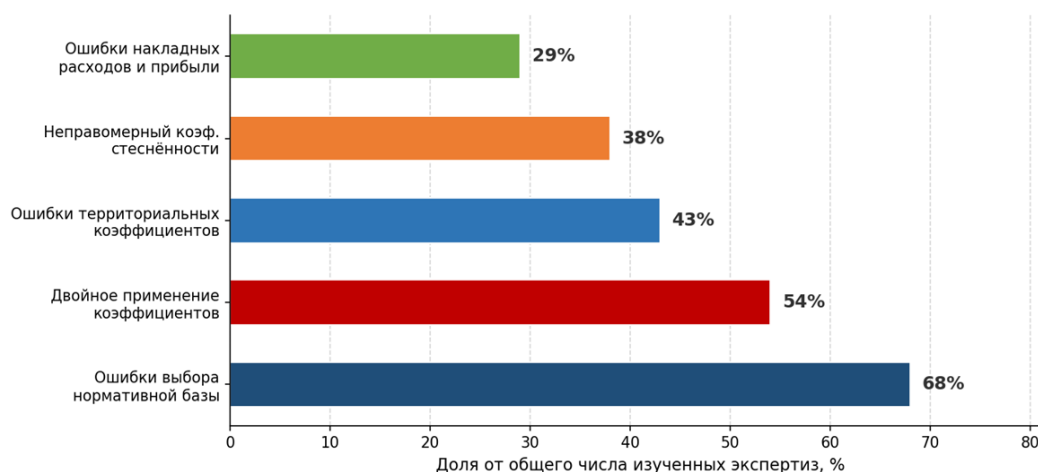


Рис. 1. Частота выявления типичных ошибок при применении коэффициентов на ОКН ($n = 47$)

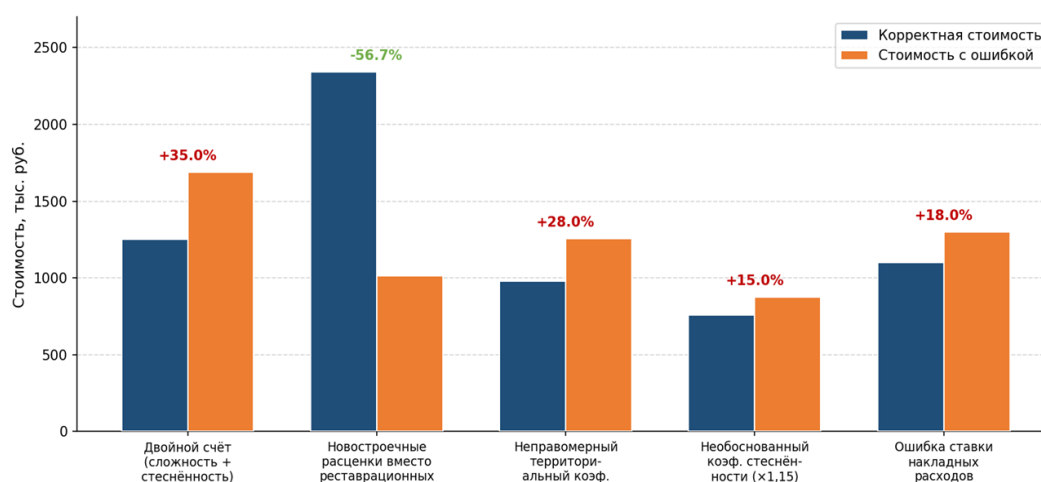


Рис. 2. Сравнение корректной и ошибочной стоимости работ (тыс. руб.)

Таблица 1. Влияние типичных ошибок на стоимость работ (модельный расчет)

Вид ошибки	Корректная стоимость, тыс. руб.	Стоимость с ошибкой, тыс. руб.	Отклонение
Двойной счет: коэффициент сложности + стесненность	1 250,0	1 687,5	+35,0 %
Новостроечные расценки вместо реставрационных	2 340,0	1 014,0	-56,7 %
Неправомерный территориальный коэффициент	980,0	1 254,4	+28,0 %
Необоснованный коэффициент стесненности ($\times 1,15$)	760,0	874,0	+15,0 %
Ошибка ставки накладных расходов	1 100,0	1 298,0	+18,0 %

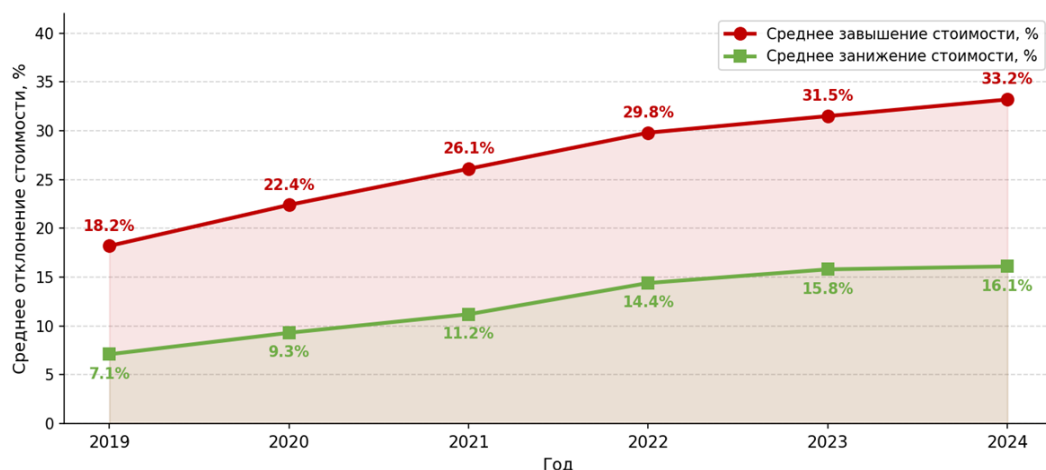


Рис. 3. Динамика стоимостных искажений при применении повышающих коэффициентов на ОКН (2019–2024 гг.)

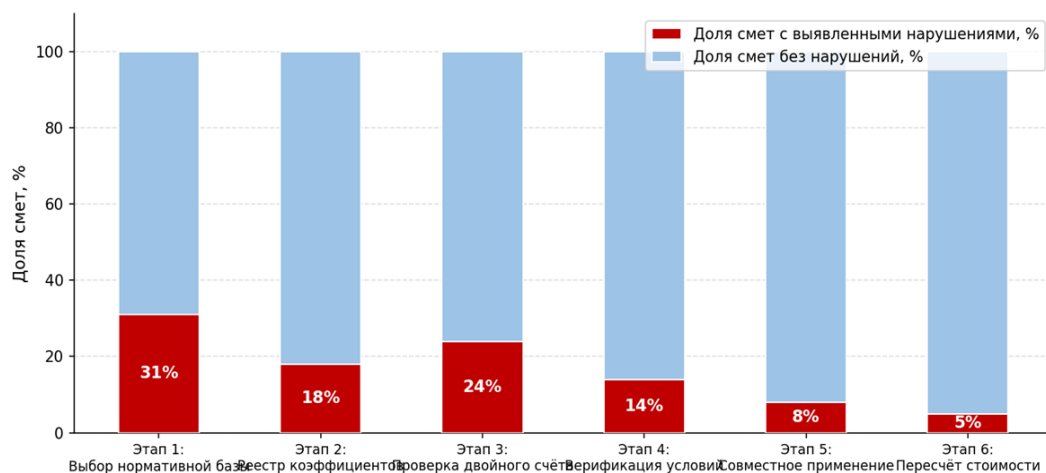


Рис. 4. Доля смет с нарушениями на каждом этапе верификации (n = 47)

Динамика и профиль искажений

За 2019–2024 гг. среднее завышение стоимости выросло с 18,2 % до 33,2 %, занижение – с 7,1 % до 16,1 % (рис. 3), что отражает опережающее усложнение нормативной базы относительно квалификации специалистов. Объекты федерального значения наиболее подвержены ошибкам выбора базы (75 %), региональные – ошибкам территориальных коэффициентов (50 %).

Методика верификации

Разработана шестиступенчатая процедура (рис. 4).

Этап 1 – идентификация нормативной базы (ГЭСН-Реставрация / ГЭСН-Ремонт / ГЭСН).

Этап 2 – реестр коэффициентов с нормативными основаниями.

Этап 3 – проверка двойного счета (максимум нарушений – 24 % смет).

Этап 4 – верификация документального подтверждения ситуационных коэффициентов.

Этап 5 – проверка правомерности совместного применения.

Этап 6 – пересчет итоговой стоимости. Апробация на трех объектах ОКН федерального значения подтвердила эффективность: стоимостные отклонения составили 27,3–44,8 %.

1. Многоуровневость нормативной базы ценообразования на ОКН формирует объективные риски методологических ошибок; их главные источники – неверное понимание сферы применения коэффициентов и недостаточная квалификация специалистов.

2. Пять групп типичных ошибок охватывают 29–68 % изученных экспертиз; стоимостные последствия достигают 57% от обоснованного уровня.

3. Устойчивый рост среднего завышения с 18,2 % до 33,2 % за 2019–2024 гг. свидетельствует о системной проблеме отрасли, требующей методического вмешательства регуляторов.

4. Предложенная шестиэтапная методика верификации обеспечивает системный и воспроизводимый подход и рекомендуется к внедрению в практику судебной строительно-технической экспертизы и государственного финансового контроля на объектах культурного наследия.

Литература

1. Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 26. – Ст. 2519.

2. Приказ Минстроя России от 04.08.2020 № 421/пр (ред. от 30.01.2026) «Об утверждении методики определения сметной стоимости строительства... объектов культурного наследия народов Российской Федерации»; Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации». – М. : Минстрой России, 2020.

3. ГЭСН-Реставрация 81-45-1-2020. Государственные элементные сметные нормы на реставрационно-восстановительные работы. – М. : Минстрой России, 2020. – 416 с.

References

1. Federal'nyj zakon ot 25.06.2002 № 73-FZ «Ob ob»ektah kul'turnogo naslediya (pamyatnikah istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federacii» // Sobranie zakonodatel'stva RF. – 2002. – № 26. – St. 2519.

2. Prikaz Ministroya Rossii ot 04.08.2020 № 421/pr (red. ot 30.01.2026) «Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya smetnoj stoimosti stroitel'stva... ob»ektov kul'turnogo naslediya narodov Rossijskoj Federacii»; Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 16.02.2008 № 87 «O sostave razdelov proektnoj dokumentacii». – M. : Ministroy Rossii, 2020.

3. GESN-Restavraciya 81-45-1-2020. Gosudarstvennye elementnye smetnye normy na restavracionno-vosstanovitel'nye raboty. – M. : Ministroy Rossii, 2020. – 416 s.

**Methodology for Determining the Cost of Completed Works
at Cultural Heritage Sites Within Forensic Construction Expertise:
Analysis of Typical Errors in Applying Increasing Coefficients**

V.S. Mikheev, V.M. Kruglyakova

*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow (Russia)*

Key words and phrases: optimization; heat exchangers; design solutions; energy savings; heating systems.

Abstract. Cultural heritage sites (CHS) occupy an exceptional place in the system of state regulation of construction activities in the Russian Federation, necessitating high accuracy of cost calculations in forensic construction expertise.

The purpose of the study is to develop and validate a methodology for determining the cost of completed works at CHS within forensic construction expertise, ensuring correct application of increasing coefficients and elimination of typical violations.

Objectives: systematise the current regulatory pricing framework for CHS; identify and classify typical errors in applying increasing coefficients; quantify the cost consequences of identified violations; develop a step-by-step coefficient verification methodology; test the methodology on real forensic materials.

Hypothesis: most cost distortions at CHS are systemic and caused by a limited number of recurring methodological violations eliminable through a formalised verification procedure.

Methods: comparative legal analysis of the regulatory framework, expert cost modelling, statistical analysis of 47 forensic construction expertises (2019–2024).

Results: five groups of typical errors (frequency 29–68 %) are systematised; the range of cost distortions is 15–57 %; a sustained growth trend of average cost overstatement from 18.2 % to 33.2 % over 2019–2024 is established; a six-step verification methodology is developed and tested (deviations 27.3–44.8 % on three CHS objects).

© В.С. Михеев, В.М. Круглякова, 2026

УДК 628.511

К определению фракционного проскока пыли в инерционных пылеуловителях со встречными закрученными потоками

Н.Ю. Карапузова, А.Д. Хлыбов, А.А. Мимишев

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»,
г. Волгоград (Россия)*

Ключевые слова и фразы: аппарат со встречными закрученными потоками; дисперсный состав; интегральная функция распределения; мелкодисперсная пыль; PM10; PM2,5; суммарный проскок; формула Азарова; фракционный проскок; эффективность пылеулавливания.

Аннотация. Статья посвящена выводу расчетных формул фракционного коэффициента проскока пыли в инерционных пылеуловителях со встречными закрученными потоками (ВЗП). Цель работы – обоснование метода расчета функции проскока по интегральным функциям распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам. Для достижения цели решены задачи: вывод определения фракционного проскока через приращения масс частиц смежных фракций, предельный переход к производным интегральных функций распределения, а также обоснование устойчивой к погрешностям дифференцирования расчетной формы в вероятностно-логарифмической системе координат (формулы Азарова). Показано, что фракционный проскок равен произведению суммарного проскока на отношение производных функций прохода на выходе и входе аппарата и что формула Азарова развивает классический подход к расчету фракционной эффективности через дисперсный состав пыли до и после аппарата. Теоретические результаты сопоставлены с экспериментальными данными по проскоку в аппаратах ВЗП типоразмеров 100–600 мм в производстве строительных материалов, в том числе для фракций PM10 и PM2,5.

Введение

Предприятия строительной индустрии остаются одним из значимых источников загрязнения атмосферного воздуха твердыми частицами: основную массу выбросов составляет неорганическая пыль, в том числе мелкодисперсные фракции PM10 и PM2,5. Для очистки аспирационных и вентиляционных выбросов от таких частиц широко применяются инер-

ционные аппараты – циклоны и вихревые пылеуловители со встречными закрученными потоками (ВЗП) [1].

Работу пылеулавливающего аппарата традиционно оценивают по общей степени очистки (эффективности) η . Однако при нормировании выбросов мелкодисперсной пыли этого показателя недостаточно: одна и та же общая эффективность может соответствовать существенно различному остаточному содержанию наиболее опасных мелких фракций. Поэтому надзорные органы требуют оценивать не только общую эффективность, но и функцию проскока, то есть зависимость доли неуловленных частиц от их размера. Величина, наиболее полно характеризующая эту зависимость, – фракционный коэффициент проскока $\varepsilon(\delta)$.

Классический подход к расчету фракционной эффективности выражает ее через дисперсный состав пыли до и после аппарата [4; 8]; на этом же принципе основан метод построения кривой фракционной эффективности в вероятностно-логарифмической системе координат. Однако прямое дифференцирование экспериментальных кривых прохода приводит к резкому росту погрешности и результатам, лишенным физического смысла. Для устранения этого недостатка в работах В.Н. Азарова [1] предложена запись фракционного проскока через производные интегральных функций распределения массы частиц с устойчивым дифференцированием спрямленных функций прохода; в дальнейшем такую запись будем называть формулой Азарова. В настоящей работе последовательно выводятся две формы записи фракционного проскока, устанавливается связь между ними и обосновывается формула Азарова с последующим сопоставлением с экспериментом.

Эффективность и проскок как показатели работы пылеуловителя

Степень очистки (эффективность) η определяется как отношение массы уловленного материала к массе материала, поступившего в аппарат за тот же промежуток времени [7]:

$$\eta = M_{\text{ул}}/M_{\text{вх}} = (M_{\text{вх}} - M_{\text{вых}})/M_{\text{вх}} = 1 - M_{\text{вых}}/M_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{вх}}$, $M_{\text{ул}}$, $M_{\text{вых}}$ – массы частиц соответственно на входе в аппарат, уловленных в аппарате и вынесенных с очищенным газом.

Для оценки выброса пыли в атмосферу удобнее пользоваться коэффициентом проскока ε – отношением массы пыли, унесенной газами из пылеуловителя, к массе пыли, поступившей в него за то же время. Из определения непосредственно следует связь суммарного проскока и общей эффективности:

$$\varepsilon_{\Sigma} = M_{\text{вых}}/M_{\text{вх}} = 1 - \eta. \quad (2)$$

Аналогично для отдельной фракции размера δ вводится фракционный коэффициент проскока $\varepsilon(\delta)$ и связанная с ним фракционная эффективность $\eta(\delta)$:

$$\varepsilon(\delta) = 1 - \eta(\delta). \quad (3)$$

Величина $\varepsilon(\delta)$ относится к частицам одного размера, тогда как суммарный (общий) проскок ε_{Σ} характеризует всю массу пыли в целом. Если известна дифференциальная функция распределения массы частиц по размерам $g(\delta)$, то суммарный проскок выражается через фракционный интегралом по всему спектру размеров [4; 6]:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \int_0^{\infty} \varepsilon(\delta) g(\delta) d\delta. \quad (4)$$

Таким образом, суммарный проскок – интегральная характеристика, зависящая от дисперсного состава конкретной пыли, а фракционный проскок – характеристика самого аппарата при данном режиме работы. Задача состоит в том, чтобы получить расчетную формулу для $\varepsilon(\delta)$, пригодную для обработки натурных измерений дисперсного состава до и после пылеуловителя.

Определение фракционного проскока через приращения масс частиц

Рассмотрим интегральные (кумулятивные) функции массы частиц: пусть $M_{\text{вх}}(\delta)$ – масса частиц на входе в аппарат, имеющих эквивалентный диаметр не более δ , и аналогично $M_{\text{вых}}(\delta)$ – на выходе. Обе функции монотонно возрастают от нуля (при $\delta \rightarrow 0$) до полной массы соответствующего потока (при $\delta \rightarrow \infty$).

Выделим узкий интервал размеров $[\delta, \delta + \Delta]$. Масса частиц этой фракции, поступившая в аппарат, равна приращению $M_{\text{вх}}(\delta + \Delta) - M_{\text{вх}}(\delta)$, а масса той же фракции, вынесенная с очищенным газом, равна $M_{\text{вых}}(\delta + \Delta) - M_{\text{вых}}(\delta)$. По определению проскока доля частиц данной фракции, прошедшая сквозь аппарат, есть отношение этих приращений. Переходя к пределу при $\Delta \rightarrow 0$, получаем фракционный коэффициент проскока в точке δ :

$$\varepsilon(\delta) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{M_{\text{вых}}(\delta + \Delta) - M_{\text{вых}}(\delta)}{M_{\text{вх}}(\delta + \Delta) - M_{\text{вх}}(\delta)}. \quad (5)$$

Содержательный смысл формулы: фракционный проскок равен отношению «выходной» и «входной» масс частиц в бесконечно узком диапазоне размеров вблизи δ , то есть отношению локальных плотностей массы. Записанная в форме предела, формула наглядно показывает, что $\varepsilon(\delta)$ – производная характеристика: и в числителе, и в знаменателе стоят приращения кумулятивных масс, а не сами массы. Однако в таком виде формула для расчета неудобна, поскольку оперирует непосредственно приращениями измеряемых масс, каждое из которых несет свою погрешность.

Переход к интегральным функциям распределения массы частиц

Нормируем кумулятивные массы на полные массы потоков. Обозначим суммарные массы на входе и выходе $M_{\text{вх}}^{\Sigma}$ и $M_{\text{вых}}^{\Sigma}$ и введем интегральные функции распределения массы частиц по диаметрам:

$$D_{\text{вх}}(\delta) = \frac{M_{\text{вх}}(\delta)}{M_{\text{вх}}^{\Sigma}}, \quad D_{\text{вых}}(\delta) = \frac{M_{\text{вых}}(\delta)}{M_{\text{вых}}^{\Sigma}}. \quad (6)$$

Каждая из функций $D(\delta)$ представляет долю массы, приходящуюся на частицы диаметром не более δ ; это безразмерные монотонно возрастающие функции, изменяющиеся от 0 до 1. Подставим выражения $M(\delta) = M^{\Sigma} D(\delta)$ в формулу предела. Постоянные множители $M_{\text{вх}}^{\Sigma}$ и $M_{\text{вых}}^{\Sigma}$ выносятся за знак приращения; разделив числитель и знаменатель на Δ и перейдя к пределу, получаем в числителе и знаменателе производные интегральных функций распределения:

$$\varepsilon(\delta) = \frac{M_{\text{ВЫХ}}^{\Sigma}}{M_{\text{ВХ}}^{\Sigma}} \cdot \frac{\lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{D_{\text{ВЫХ}}(\delta + \Delta) - D_{\text{ВЫХ}}(\delta)}{\Delta}}{\lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{D_{\text{ВХ}}(\delta + \Delta) - D_{\text{ВХ}}(\delta)}{\Delta}} = \frac{M_{\text{ВЫХ}}^{\Sigma}}{M_{\text{ВХ}}^{\Sigma}} \cdot \frac{\frac{dD_{\text{ВЫХ}}(\delta)}{d\delta}}{\frac{dD_{\text{ВХ}}(\delta)}{d\delta}}. \quad (7)$$

Первый множитель $M_{\text{ВЫХ}}^{\Sigma}/M_{\text{ВХ}}^{\Sigma}$ по определению есть суммарный коэффициент проскока ε_{Σ} . Окончательно:

$$\varepsilon(\delta) = \varepsilon_{\Sigma} \cdot \frac{\frac{dD_{\text{ВЫХ}}(\delta)}{d\delta}}{\frac{dD_{\text{ВХ}}(\delta)}{d\delta}}. \quad (8)$$

Полученное соотношение и представляет собой формулу Азарова для фракционного проскока. Вторая форма записи не является самостоятельной гипотезой – она строго следует из определения проскока через приращения масс предельным переходом при нормировании масс на полные потоки. Единственное содержательное дополнение состоит в том, что отношение полных масс выделено в отдельный множитель – суммарный проскок ε_{Σ} , который на практике измеряется независимо по общей эффективности аппарата.

Поскольку производная интегральной функции распределения есть дифференциальная функция распределения (плотность) массы частиц, $f(\delta) = dD(\delta)/d\delta$, формулу Азарова можно записать в эквивалентной, наиболее употребительной форме [2]:

$$\varepsilon(\delta) = \varepsilon_{\Sigma} \cdot \frac{f_{\text{ВЫХ}}(\delta)}{f_{\text{ВХ}}(\delta)}, \quad (9)$$

где $f_{\text{ВХ}}(\delta)$ и $f_{\text{ВЫХ}}(\delta)$ – дифференциальные функции распределения массы частиц по диаметрам для пыли на входе и выходе. Практическая ценность формулы очевидна: фракционный проскок можно рассчитать, зная лишь суммарный проскок ε_{Σ} (из общей эффективности) и granulometric состав пыли до и после аппарата, без прямого измерения масс отдельных фракций.

Вывод в вероятностно-логарифмической системе координат

Полученная формула требует дифференцирования интегральных функций распределения. Если дифференцировать экспериментальную кривую прохода непосредственно, погрешность резко возрастает, а результат нередко теряет физический смысл. Поэтому целесообразно перейти в такую систему координат, в которой интегральная функция распределения спрямляется, а дифференцирование становится устойчивым [1; 2].

Введем преобразование координатной сетки $x = \Psi(\delta)$, $y = \varphi(D)$ с монотонно возрастающими функциями Ψ и φ . В вероятностно-логарифмической сетке по оси абсцисс откладывают $x = \lg \delta$, а по оси ординат – $y = \Phi^{-1}(D)$, где Φ^{-1} – функция, обратная нормированной функции Лапласа. В этих координатах логарифмически-нормально распределенный дисперсный состав изображается прямой линией, что и обеспечивает устойчивость численного дифференцирования.

Пусть интегральная функция прохода связана с нормированной переменной t

соотношением

$$D(\delta) = \operatorname{erf}(t), \quad (10)$$

где t монотонно зависит от x и, через x , от δ . Дифференцируя обе части по δ по правилу дифференцирования сложной функции, получаем

$$\frac{dD}{d\delta} = \frac{d \operatorname{erf}(t)}{dt} \cdot \frac{dt}{dx} \cdot \frac{dx}{d\delta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2} \cdot t'_x \cdot \frac{dx}{d\delta}. \quad (11)$$

Записав это выражение отдельно для входа и выхода и подставив в формулу для $\varepsilon(\delta)$, замечаем, что общий множитель $dx/d\delta$ сокращается. В результате приходим к рабочей форме, в которой все величины вычисляются по спрямленным (а значит, устойчиво дифференцируемым) функциям:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_{\Sigma} \cdot \frac{\frac{dy_{\text{ВЫХ}}(x)}{dx}}{\frac{dy_{\text{ВХ}}(x)}{dx}} \cdot \frac{e^{-\frac{y_{\text{ВХ}}^2}{2}}}{e^{-\frac{y_{\text{ВЫХ}}^2}{2}}}. \quad (12)$$

Логарифмируя, получаем удобную для регрессионной обработки аддитивную форму:

$$\lg \varepsilon(\delta) = \lg \varepsilon_{\Sigma} + \lg \frac{t'_{\text{ВЫХ}}}{t'_{\text{ВХ}}} + (t_{\text{ВЫХ}}^2 - t_{\text{ВХ}}^2). \quad (13)$$

При спрямлении интегральных функций распределения в вероятностно-логарифмической сетке производные $y'_{\text{ВХ}}$ и $y'_{\text{ВЫХ}}$ постоянны и определяются просто наклоном прямых, поэтому формула Азарова дает физически осмысленные значения $\varepsilon(\delta)$ даже тогда, когда прямое дифференцирование экспериментальной кривой заведомо неприемлемо. Она сохраняет строгую связь $\varepsilon(\delta)$ с производными функций прохода, но выполняет дифференцирование не над «сырой» кривой, а над ее гладким спрямленным приближением.

Важно подчеркнуть, что формула Азарова развивает классический подход к расчету фракционной эффективности через дисперсный состав пыли до и после аппарата [4; 8]. Ее принципиальное отличие – переход от прямого дифференцирования экспериментальной кривой к дифференцированию спрямленных функций прохода, что и обеспечивает вычислительную устойчивость метода и делает его пригодным для обработки натуральных измерений на действующих аппаратах.

Отдельный практически важный случай возникает, когда законы распределения массы частиц на входе и выходе аппарата логарифмически-нормальны. Тогда, как показано в [1; 3], сама функция фракционного проскока приобретает вид усеченного логарифмически-нормального закона, а входящие в нее параметры выражаются в замкнутой форме через medianные диаметры и стандартные отклонения входного и выходного распределений. Детальный вывод этого случая, анализ нормирующего множителя усеченного закона и следствия для оценки выбросов мелкодисперсной пыли выходят за рамки настоящей работы и составляют предмет отдельной публикации, продолжающей данную статью.

Таблица 1. Эквивалент проскока частиц при скорости в среднем сечении 3–5 м/с

Фракционная эффективность $\eta(\delta)$, %	Проскок $\varepsilon(\delta)$, %	Фракционная эффективность $\eta(\delta)$, %	Проскок $\varepsilon(\delta)$, %
100	0,333	50	0,167
90	0,300	40	0,133
80	0,267	30	0,100
70	0,233	20	0,067
60	0,200	10	0,033

Экспериментальные результаты проскока в аппаратах ВЗП

Полученные формулы применялись для обработки натурных измерений в системах аспирации предприятий по производству керамзита, силикатного кирпича и асбестоцементных изделий, оснащенных аппаратами ВЗП [3; 5]. Дисперсный состав определялся методом микроскопии; интегральные функции распределения строились в вероятностно-логарифмической и двойной логарифмической сетках, что позволяло устойчиво находить производные, входящие в формулу Азарова.

Эксперименты при условной скорости в среднем сечении 3–5 м/с показали, что аппараты ВЗП меньшего диаметра эффективнее улавливают крупные частицы. Для частиц 50 мкм проскок снижается с ростом диаметра аппарата: у ВЗП-200 он составил около 0,33 %, у ВЗП-600 – около 0,30 %. Для частиц 10 мкм проскок в ВЗП-200 находился в диапазоне 0,30–0,32 %, а в ВЗП-600 – 0,28–0,30 %, то есть частицы 10 мкм также несколько лучше улавливаются аппаратом меньшего диаметра. Для наиболее мелкой фракции 2,5 мкм наблюдается обратная картина: проскок в ВЗП-200 составил 0,05–0,06 %, а в ВЗП-600 – 0,011–0,06 %, поэтому для улавливания частиц РМ2,5 предпочтительнее аппарат большего диаметра. Соответствие эквивалента проскока и фракционной эффективности приведено в табл. 1.

Для аппаратов ВЗП-100 и ВЗП-300 получены регрессионные зависимости фракционного проскока частиц РМ2,5 и РМ10 от условной скорости v в среднем сечении и соотношения расходов K_n через нижний ввод в виде полных полиномов второго порядка по каждой переменной, например для ВЗП-100:

$$\varepsilon_{2,5} = 1,827 - 0,0565 v - 8,29 K_n + 0,0585 v^2 - 22,61 K_n^2 - 1,845 v K_n + 0,2368 v^2 K_n + 5,018 v K_n^2 - 0,5577 v^2 K_n^2. \quad (14)$$

Эти зависимости позволяют предварительно оценивать фракционную эффективность в зависимости от типоразмера, скорости и соотношения расходов. Проверочные расчеты показывают, что при варьировании v в диапазоне 3,3–5,3 м/с и $K_n = 0,1$ –0,3 проскок для крупных частиц остается малым, тогда как для мелкой фракции он существенно выше, что согласуется с общей закономерностью ухудшения улавливания с уменьшением размера частиц.

Поскольку дисперсный состав поступающей пыли меняется во времени, общую эффективность аппарата целесообразно оценивать не одним числом, а как случайную величину [3; 7]. Для пыли асбеста по выборке объемом 25 измерений оценки параметров суммарного проскока составили: среднее значение $M_\varepsilon = 0,0521$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,00678$. Проверка по критерию χ^2 Пирсона при уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($\chi^2 = 1,89$ при

критическом значении 16,9) подтвердила гипотезу о нормальном законе, поэтому плотность распределения суммарного проскока записывается в виде

$$f(\varepsilon_{\Sigma}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon_{\Sigma}-M_{\varepsilon})^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0,00678\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon_{\Sigma}-0,0521)^2}{0,00009}}. \quad (15)$$

Представление ε_{Σ} как случайной величины в сочетании с выведенной формулой позволяет переносить статистический характер суммарного проскока на фракционный проскок $\varepsilon(\delta)$ и, тем самым, оценивать вероятность превышения нормативов по мелкодисперсной пыли PM10 и PM2,5 в атмосферном воздухе.

Выводы

Фракционный коэффициент проскока $\varepsilon(\delta)$ допускает две эквивалентные формы записи: через приращения кумулятивных масс смежных фракций и через производные интегральных функций распределения массы частиц по диаметрам. Вторая форма строго выводится из первой предельным переходом при нормировании масс на полные потоки; множителем при отношении производных выступает суммарный проскок $\varepsilon_{\Sigma} = 1 - \eta$.

Прямое дифференцирование экспериментальных кривых прохода недопустимо из-за резкого роста погрешности. Переход в вероятностно-логарифмическую систему координат спрямляет интегральные функции распределения и делает дифференцирование устойчивым, сохраняя строгую связь $\varepsilon(\delta)$ с производными функций прохода.

На участках спектра, где распределения массы частиц на входе и выходе логарифмически-нормальны, функция фракционного проскока подчиняется усеченному логарифмически-нормальному закону, параметры которого выражаются через медианные диаметры и стандартные отклонения входного и выходного распределений.

Экспериментальные данные по аппаратам ВЗП типоразмеров 100–600 мм подтверждают теоретические зависимости: с уменьшением диаметра аппарата улучшается улавливание крупных фракций (50 и 10 мкм), тогда как для фракции PM2,5 предпочтительны аппараты большего диаметра. Суммарный проскок целесообразно рассматривать как случайную величину, что позволяет оценивать вероятность выполнения нормативов по мелкодисперсной пыли в системах обеспыливающей вентиляции строительных производств.

Литература

1. Азаров, В.Н. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов / В.Н. Азаров, Н.М. Сергина // Строительные материалы. – 2003. – № 8. – С. 14–15. – EDN: IBEJVB.
2. Сергина, Н.М. Пылеуловители со встречными закрученными потоками в системах очистки пылевых выбросов в производстве строительных материалов / Н.М. Сергина, М.С.А. Абдулджалил, Л.М. Абрамова // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ivdon.ru>. – EDN: VHSBPR.
3. Азаров, А.В. Снижение фракционного проскока пыли гипса при обеспыливании выбросов в вихревых пылеуловителях на встречных закрученных потоках как метод повышения уровня защищенности воздушной среды от мелкодисперсной пыли / А.В. Азаров // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www>.

ivdon.ru. – EDN: WWRIMD

4. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов : 3-е изд., перераб. / П.А. Коузов. – Л. : Химия, 1987. – 264 с.

5. Сергина, Н.М. Об опыте применения пылеуловителей на встречных закрученных потоках в системах обеспыливания промышленных выбросов / Н.М. Сергина, Д.С. Дружинина, В.А. Евсеева, С.А. Орлов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ivdon.ru>. – EDN: YJKTAN.

6. Шияев, М.И. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования : учеб. пособие / М.И. Шияев, А.Р. Дорохов. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 1999. – 209 с.

7. Биргер, М.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию : 2-е изд., перераб. и доп. / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др.; под общ. ред. А.А. Русанова. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.

8. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки : учеб. пособие / А.Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с. – EDN: QNEBZZ.

References

1. Azarov, V.N. Sistemy pyleulavlivaniya s inertsionnymi apparatami v proizvodstve stroitelnykh materialov / V.N. Azarov, N.M. Sergina // Stroitelnye materialy. – 2003. – № 8. – S. 14–15. – EDN: IBEJVB.

2. Sergina, N.M. Pyleuloviteli so vstrechnymi zakruchennymi potokami v sistemakh ochistki pylevykh vybrosov v proizvodstve stroitelnykh materialov / N.M. Sergina, M.S.A. Abduldzhali, L.M. Abramova // Inzhenernij vestnik Dona. – 2015. – № 3 [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.ivdon.ru>. – EDN: VHSBPR.

3. Azarov, A.V. Snizhenie fraktsionnogo proskoka pyli gipsa pri obespylivanii vybrosov v vikhrevykh pyleulovitelnykh na vstrechnykh zakruchennykh potokakh kak metod povysheniya urovnya zashchishchennosti vozduшной среды от мелкодисперсной пыли / A.V. Azarov // Inzhenernij vestnik Dona. – 2016. – № 2 [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.ivdon.ru>. – EDN: WWRIMD

4. Kouzov, P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pylej i izmelchennykh materialov : 3-e izd., pererab. / P.A. Kouzov. – L. : KHimiya, 1987. – 264 s.

5. Sergina, N.M. Ob opyte primeneniya pyleulovitelej na vstrechnykh zakruchennykh potokakh v sistemakh obespylivaniya promyshlennykh vybrosov / N.M. Sergina, D.S. Druzhinina, V.A. Evseeva, S.A. Orlov // Inzhenernij vestnik Dona. – 2016. – № 2 [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.ivdon.ru>. – EDN: YJKTAN.

6. SHilyaev, M.I. Metody rascheta i printsipy komponovki pyleulavlivayushchego oborudovaniya : ucheb. posobie / M.I. SHilyaev, A.R. Dorokhov. – Tomsk : Izd-vo TGASU, 1999. – 209 s.

7. Birger, M.I. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu : 2-e izd., pererab. i dop. / M.I. Birger, A.YU. Valdberg, B.I. Myagkov i dr.; pod obshch. red. A.A. Rusanova. – M. : Energoatomizdat, 1983. – 312 s.

8. Vetoshkin, A.G. Protsessy i apparaty pyleochistki : ucheb. posobie / A.G. Vetoshkin. – Penza : Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2005. – 210 s. – EDN: QNEBZZ.

Determination of the Fractional Dust Leakage in Inertial Dust Collectors with Counter-Swirling Flows

N.Yu. Karapuzova, A.D. Khlybov, A.A. Mimishev

*Volgograd State Technical University,
Volgograd (Russia)*

Key words and phrases: fractional penetration; total penetration; Azarov formula; CSF device; integral distribution function; disperse composition; dust collection efficiency; fine dust; PM10; PM2.5.

Abstract. This article is derives of calculation formulas for the fractional dust penetration coefficient in inertial dust collectors with counter swirling flows (**CSF**). The objective of the study is to substantiate a method for calculating the penetration function based on the integral mass distribution functions of particles by equivalent diameters. To achieve this goal, the following tasks were addressed: derivation of the definition of fractional penetration through the mass increments of adjacent fractions, the limit transition to the derivatives of integral distribution functions, and substantiation of a calculation form in the probability-logarithmic coordinate system that is resistant to differentiation errors (the Azarov formula). It is shown that the fractional penetration is equal to the product of the total penetration and the ratio of the derivatives of the passage functions at the outlet and inlet of the device, and that the Azarov formula develops the classical approach to calculating fractional efficiency through the disperse composition of dust before and after the device. The theoretical results are compared with experimental data on penetration in CSF devices of standard sizes 100–600 mm in the production of building materials, including for the PM10 and PM2.5 fractions.

© Н.Ю. Карапузова, А.Д. Хлыбов, А.А. Мимишев, 2026

УДК 697.911

Определение расчетного воздухообмена для сварочных постов цеха по изготовлению деталей и узлов систем вентиляции

Д.Г. Усадский, И.В. Зинкин

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»,
г. Волгоград (Россия)

Ключевые слова и фразы: промышленная вентиляция; расчетный воздухообмен; сварочный пост.

Аннотация. Целью данной работы является выбор наиболее корректного способа определения требуемого воздухообмена для сварочных постов в цехе по производству деталей систем вентиляции. Задачи исследования включали сравнение двух методов расчета: по марке сварочных материалов и по удельному выделению загрязняющих веществ, а также анализ полученных значений воздухообмена. Гипотеза заключалась в предположении, что оба метода могут давать близкие результаты, однако наибольшее влияние на итоговое значение будет оказывать химический состав сварочного аэрозоля, в частности выделения марганца. В ходе работы применялись методы инженерного расчета на основе справочных данных (ПДК, удельные показатели), а также сравнительный анализ. Основные результаты показали, что максимальный воздухообмен требуется при полуавтоматической сварке проволокой Св-0,8Г2С: по первому методу получено 1220 м³/ч, по второму – 1160 м³/ч (лимитирующий фактор – соединения марганца). Расхождение оказалось незначительным, что подтверждает корректность и взаимозаменяемость обоих подходов для практического проектирования вентиляции.

Сварочные работы считаются одними из наиболее опасных для здоровья человека. Ключевым неблагоприятным фактором здесь выступает сварочный аэрозоль. Он представляет собой сложную смесь, включающую оксиды различных металлов (например, железа, марганца, никеля, хрома), токсичные газы (озон, оксид углерода, оксиды азота, фтороводород), а также сверхмелкие частицы ультрадисперсного размера.

Эффективная вентиляция является основным средством обеспечения безопасных условий труда. Недостаточный воздухообмен приводит к превышению предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ, профессиональным заболеваниям (пневмокониоз, сидероз, поражение нервной системы и др.) и создает взрывопожароопасную обстановку.

Расчет воздухообмена позволяет вычислить, сколько воздуха нужно подать в помещение, чтобы в рабочей зоне сохранялись допустимые параметры воздуха. При этом учитываются три режима: теплый, холодный и переходный периоды года.

В данной работе будут рассматриваться два метода определения требуемого воздухообмена, применение которых будет зависеть от известных исходных данных.

Требуемый воздухообмен будет выполняться по марке сварочного материала и по удельному количеству загрязняющих веществ, попадающих в воздух рабочей зоны.

1. По марке сварочного материала.

В основу вычислений требуемого воздухообмена закладывается техзадание, которое в обязательном порядке содержит сведения о марке и часовом расходе материала (кг/ч). Это относится как к оборудованию, оснащенному локальными отсосами, так и к случаям выполнения сварочных работ без жесткой привязки к одному месту (рассеянная сварка).

По технологическому заданию известно, что на предприятии расположено 2 сварочных поста, на которых производятся сварочные работы ручной дуговой сваркой электродами УОНИ-13/55 с расходом электрода 0,15 кг/ч и АНО-4 с расходом электрода 0,15 кг/ч и полуавтоматической сваркой сталей в среде углекислого газа электродной проволокой Св-0,8Г2С с расходом проволоки 0,61 кг/ч.

Согласно приложению 1 документа [2], для каждой марки сварочного материала находится свое значение удельного расхода воздуха ($\text{м}^3/\text{кг}$). Если сварка выполняется рассредоточено (не у одного поста) и применяется общеобменная вентиляция, то общий потребный воздухообмен получают путем суммирования объемов воздуха, необходимых для разбавления вредных выделений от электродов всех используемых марок:

$$L_{\text{расч}} = L_1 \cdot G_1 + L_2 \cdot G_2 + \dots + L_n \cdot G_n,$$

где G – расходуемый материал сварочного оборудования, кг/ч; L_1 – удельное количество приточного воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Технологической документацией может быть предусмотрено одновременное использование как стационарных (фиксированных), так и передвижных (нефиксированных) сварочных постов или мест резки. В таких ситуациях та часть вредных выбросов, которая не была захвачена системами локального отсоса (составляющая 10 % либо 25 %), обязательно принимается в расчет при вычислении объема подаваемого воздуха. Этот воздух необходим для разбавления вредных компонентов, образующихся в ходе рассредоточенной сварки или резки.

При рассеянной и фиксированной сварке учитывают, что часть вредных веществ улавливают локальные вытяжные устройства, которые перехватывают определенную долю вредных выделений. В связи с этим в расчетные формулы вводятся соответствующие коэффициенты, зависящие от типа местного отсоса и расхода сварочного материала: $K = 0,1$ – для вытяжных шкафов, $K = 0,25$ – для всех прочих разновидностей местных отсосов. На данном предприятии местные отсосы не предусмотрены, поэтому расчет выполняется без добавочных коэффициентов.

Когда все исходные данные известны, можно приступить к самому расчету воздухообмена:

- для ручной сварки электродами АНО-4 требуемый воздухообмен равен:
 $L_{\text{расч}} = 0,15 \cdot 2000 = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- для ручной сварки электродами УОНИ-13/55: $L_{\text{расч}} = 0,15 \cdot 4600 = 690 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- для полуавтоматической сварки сталей в среде углекислого газа электродной про-

Таблица 1. Значения удельных выбросов загрязняющих веществ, образующихся в процессе сварки

Наименование	Расчетный параметр		
	Характеристика, обозначение	единица	значение
Ручная дуговая сварка сталей. Электроды АНО-4			
Удельный показатель выделения i -го ЗВ, K_{Mi} :			
дижелезо триоксид		г/кг	15,73
Марганец и его соединения		г/кг	1,66
Пыль неорганическая, содержащая 70–20 % SiO_2		г/кг	0,41
Ручная дуговая сварка сталей. Электроды УОНИ-13/55			
Удельный показатель выделения i -го ЗВ, K_{Mi} :			
дижелезо триоксид		г/кг	13,90
Марганец и его соединения		г/кг	1,09
Азота диоксид		г/кг	2,16
Азот (II) оксид		г/кг	0,35
Углерод оксид		г/кг	13,3
Фтористые газообразные соединения		г/кг	0,93
Фториды неорганические плохо растворимые		г/кг	1
Пыль неорганическая, содержащая 70–20 % SiO_2		г/кг	1
Полуавтоматическая сварка сталей в среде углекислого газа электродной проволокой. Проволока Св-0,8Г2С			
Удельный показатель выделения i -го ЗВ, K_{Mi} :			
дижелезо триоксид		г/кг	7,67
Марганец и его соединения		г/кг	1,90
Пыль неорганическая, содержащая 70–20 % SiO_2		г/кг	0,43

локой Св-0,8Г2С: $L_{\text{расч}} = 0,61 \cdot 2000 = 1220 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Отсюда следует, что за расчетный воздухообмен принимается $L_{\text{расч}} = 1220 \text{ м}^3/\text{ч}$, полученный при расчете полуавтоматической сваркой электродной проволокой.

2. На основе удельных значений вредных веществ, попадающих в воздух рабочей зоны.

Все значения удельных выбросов загрязняющих веществ, образующихся в процессе сварки, приведены в табл. 1.

Когда все показатели загрязняющих веществ известны, определить требуемый воздухообмен можно по формуле:

$$L_{\text{тр}} = m_i / (\text{ПДК}_i \cdot C_{\text{ф}}),$$

где ПДК_i – предельно допустимая концентрация i -го вещества; $C_{\text{ф}}$ – фоновая концентрация загрязняющих веществ в приточном воздухе, $\text{мг}/\text{м}^3$; m_i – удельное количество загрязняющих веществ, попадающих в воздух рабочей зоны, $\text{г}/\text{ч}$, $m_i = K_{Mi} \cdot B$, где B – часовой расход применяемых сырья и материалов ($\text{кг}/\text{ч}$), который вычисляется, исходя из фактически израсходованных объемов и нормативных значений образования отходов при функционировании

технологического оборудования; K_{Mi} – удельный показатель выделения i -го загрязняющего вещества на единицу массы расходуемых (приготавливаемых) сырья и материалов, г/кг.

На первом этапе следует вычислить суммарное количество всех вредных веществ, которые попадают в воздух рабочей зоны при выполнении ручной дуговой сварки с использованием электродов марки АНО-4:

$$\begin{aligned} m_{\text{диЖ}} &= 15,73 \cdot 0,15 = 2,36 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{М}} &= 1,66 \cdot 0,15 = 0,25 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{ПН}} &= 0,41 \cdot 0,15 = 0,06 \text{ г/ч.} \end{aligned}$$

Требуемый воздухообмен по каждому из веществ составит:

$$\begin{aligned} L_{\text{тр диЖ}} &= 2,36/0,04 = 59 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр М}} &= 0,25/0,001 = 250 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр ПН}} &= 0,06/0,1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч.} \end{aligned}$$

Количество загрязняющих веществ при ручной дуговой сварке электродами УОНИ-13/55 равно:

$$\begin{aligned} m_{\text{диЖ}} &= 13,9 \cdot 0,15 = 2,09 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{М}} &= 1,09 \cdot 0,15 = 0,16 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{А}} &= 2,16 \cdot 0,15 = 0,32 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{А(II)}} &= 0,35 \cdot 0,15 = 0,05 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{у}} &= 13,3 \cdot 0,15 = 2,0 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{ФГ}} &= 0,93 \cdot 0,15 = 0,14 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{ФН}} &= 1,0 \cdot 0,15 = 0,15 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{ПН}} &= 1,0 \cdot 0,15 = 0,15 \text{ г/ч.} \end{aligned}$$

Требуемый воздухообмен по каждому из веществ составит:

$$\begin{aligned} L_{\text{тр диЖ}} &= 2,09/0,04 = 52,25 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр М}} &= 0,16/0,001 = 160 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр А}} &= 0,32/0,1 = 3,2 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр А(II)}} &= 0,05/0,4 = 0,12 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр у}} &= 2,0/3 = 0,67 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр ФГ}} &= 0,14/0,014 = 10 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр ФН}} &= 0,15/0,03 = 5 \text{ м}^3/\text{ч;} \\ L_{\text{тр ПН}} &= 0,15/0,1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч.} \end{aligned}$$

Количество загрязняющих веществ при полуавтоматической сварке сталей в среде углекислого газа электродной проволокой Св-0,8Г2С составит:

$$\begin{aligned} m_{\text{диЖ}} &= 7,67 \cdot 0,61 = 4,68 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{М}} &= 1,9 \cdot 0,61 = 1,16 \text{ г/ч;} \\ m_{\text{ПН}} &= 0,43 \cdot 0,61 = 0,26 \text{ г/ч.} \end{aligned}$$

Требуемый воздухообмен по каждому из веществ составит:

$$\begin{aligned}L_{\text{тр диЖ}} &= 4,68/0,04 = 117 \text{ м}^3/\text{ч}; \\L_{\text{тр М}} &= 1,16/0,001 = 1160 \text{ м}^3/\text{ч}; \\L_{\text{тр ПН}} &= 0,26/0,1 = 2,6 \text{ м}^3/\text{ч}.\end{aligned}$$

Из вышеприведенных расчетов видно, что при полуавтоматической сварке для марганца и его соединений требуемый воздухообмен $L_{\text{тр М}} = 1160 \text{ м}^3/\text{ч}$ – максимальный из всех остальных, поэтому принимается за расчетный.

По итогам выполнения расчетов необходимого воздухообмена, а также проведенного анализа применительно к сварочным постам цеха, выпускающего детали и узлы для вентиляционных систем, были использованы две методики определения:

- 1) по марке сварочного материала;
- 2) по удельному количеству ЗВ, образующихся в процессе сварки.

Сравнение показало, что наибольший расчетный воздухообмен наблюдается при полуавтоматической сварке сталей в среде углекислого газа электродной проволокой Св-0,8Г2С, что обусловлено повышенным выделением марганца и его соединений.

В первом расчете по марке сварочного материала мы получили $L_{\text{расч}} = 1220 \text{ м}^3/\text{ч}$. Во втором расчете, по удельному количеству загрязняющих веществ, требуемый воздухообмен составил $L_{\text{тр М}} = 1160 \text{ м}^3/\text{ч}$. Незначительные расхождения в величинах расчетного воздухообмена объясняются различиями в исходных данных и методиках учета вредных веществ, однако они не оказывают существенного влияния на итоговый результат.

Таким образом, оба метода расчета могут быть признаны корректными и взаимозаменяемыми. Для практического применения допускается использование любого из них, исходя из требований точности, доступности исходных данных и особенностей технологического процесса.

Литература

1. Карпас, А.А., Вентиляция и отопление сварочных; гальванических, окрасочных цехов и зарядных аккумуляторных станций. Университет технического прогресса в машиностроении / А.А. Карпас, Ю.М. Мейлихов, Ф.Б. Резник. – М. : Машиностроение, 1977. – 68 с.
2. Рекомендации по проектированию отопления и вентиляции заготовительных и сборочно-сварочных цехов. Серия АЗ-499и. – М. : Госстрой СССР, Сантехпроект, 1972. – 27 с.
3. Методические указания к выполнению курсового и дипломного проектов : учеб. пособие / сост. Ю.Я. Кувшинов, О.Д. Самарин. – М. : Московский государственный строительный университет, 2006. – 35 с.
4. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферный воздух при сварочных работах (на основе удельных показателей): расчетная методика / НИИ Атмосфера. – СПб., 2021. – 71 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.nii-atmosphere.ru/wp-content/uploads/2021/08/utochn-metodika-svarka-2021.pdf>.
5. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – М. : Минстрой России, 2020. – 120 с.
6. ГН2.2.5.686-98. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны / Минздрав России. – М., 1998.

References

1. Karpas, A.A., Ventilyatsiya i otoplenie svarochnykh; galvanicheskikh, okrasochnykh tsekhov

i zaryadnykh akkumulyatornykh stantsij. Universitet tekhnicheskogo progressa v mashinostroenii / A.A. Karpas, YU.M. Mejlikhov, F.B. Reznik. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 68 s.

2. Rekomendatsii po proektirovaniyu otopleniya i ventilyatsii zagotovitelnykh i sborochno-svarochnykh tsekhov. Seriya AZ-499i. – M. : Gosstroj SSSR, Santekhproekt, 1972. – 27 s.

3. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu kursovogo i diplomnogo proektov : ucheb. posobie / sost. YU.YA. Kuvshinov, O.D. Samarin. – M. : Moskovskij gosudarstvennij stroitel'nyj universitet, 2006. – 35 s.

4. Metodika rascheta vydelenij (vybrosov) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfere pri svarochnykh rabotakh (na osnove udelnykh pokazatelej): raschetnaya metodika / NII Atmosfera. – SPb., 2021. – 71 s. [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.nii-atmosphere.ru/wp-content/uploads/2021/08/utochn-metodika-svarka-2021.pdf>.

5. SP 60.13330.2020. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh. – M. : Minstroj Rossii, 2020. – 120 s.

6. GN2.2.5.686-98. Predelno dopustimye kontsentratsii (PDK) vrednykh veshchestv v vozdukh rabochej zony / Minzdrav Rossii. – M., 1998.

Determination of Calculated Air Exchange for Welding Stations in a Workshop Manufacturing Parts and Components of Ventilation Systems

D.G. Usadsky, I.V. Zinkin

*Volgograd State Technical University,
Volgograd (Russia)*

Key words and phrases: design air exchange; welding station; industrial ventilation.

Abstract. The purpose of this work is to select the most correct method for determining the required air exchange for welding stations in a workshop manufacturing ventilation system components. The research objectives included comparing two calculation methods (by the grade of welding materials and by the specific emission of pollutants) and analyzing the obtained air exchange values. The hypothesis was that both methods can yield similar results, but the greatest influence on the final value would be exerted by the chemical composition of welding fume, particularly manganese emissions. The study employed engineering calculation methods based on reference data (MPC, specific emission rates) as well as comparative analysis. The main results showed that the maximum air exchange is required for semi-automatic welding with Sv-0.8G2S wire: the first method yielded 1220 m³/h, while the second gave 1160 m³/h (limiting factor – manganese compounds). The discrepancy proved insignificant, confirming the correctness and interchangeability of both approaches for practical ventilation design.

© Д.Г. Усадский, И.В. Зинкин, 2026

УДК 697.4:621.565.954

Система теплоснабжения с флюидным теплоносителем, пластинчатым и спиральным теплообменником (чиллером)

В.М. Фокин, С.В. Нестеренко,
Ф.А. Колесников, Н.Ю. Евстафьева

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»,
г. Волгоград (Россия)*

Ключевые слова и фразы: пластинчатый теплообменник; система теплоснабжения; спиральный теплообменник; флюидный теплоноситель; энергоаудит.

Аннотация. В статье приводится устройство экспериментальной установки для изучения, исследования, проведения энергетического обследования и энергоаудита системы теплоснабжения с флюидным теплоносителем, пластинчатыми теплообменниками и спиральным теплообменником (чиллером). Цель: разработка экспериментальной установки для изучения системы теплоснабжения и теплообменных аппаратов с флюидным теплоносителем. Задачи: разработка методик энергетического аудита пластинчатого теплообменника и спирального теплообменника (чиллера). Гипотеза: повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения и теплообменных аппаратов. Метод исследования: математический и физический эксперимент. Достигнутый результат: разработка устройств и методик для исследования теплообменных аппаратов с флюидным теплоносителем.

Государственными органами постоянно ставятся задачи повышения энергетической эффективности тепловых и энергетических установок. В частности, многоконтурные флюидные системы теплоснабжения применяются для теплоэнергетических систем теплоснабжения объектов нефтегазоконденсатных месторождений, где широкое применение имеют теплоносители из группы антифризы – этиленгликоль, теплоносители из группы органических – глицерин, из группы солевых рассолов – ацетат натрия 8 %.

Флюиды для систем теплоснабжения – это совокупность жидкостей и растворов, насыщенных газами, обладающих уникальными свойствами. Система теплоснабжения с флюидным теплоносителем, пластинчатыми теплообменниками и спиральным теплообменником, имеют:

- первый основной контур циркуляции системы теплоснабжения с трубопроводами и теплогенератором, заполненными водой;
- второй промежуточный контур с трубопроводами и двумя пластинчатыми теплооб-

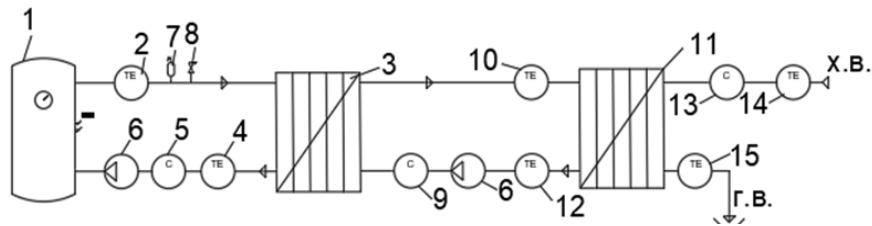


Рис. 1. Схема устройства для исследования и проведения энергетического аудита пластинчатых теплообменников и системы горячего водоснабжения:

1 – теплогенератор, 2 – термометр подающей горячей воды первого контура, 3 – пластинчатый теплообменник, 4 – термометр обратной воды первого контура, 5 – расходомер первого контура, 6 – циркуляционный насос, 7 – воздушосборник, 8 – предохранительный клапан, 9 – расходомер, 10 – термометр нагретого флюида второго контура, 11 – пластинчатый теплообменник на горячее водоснабжение, 12 – термометр охлажденного флюида второго контура; 13 – расходомер воды на горячее водоснабжение третьего контура, 14 и 15 – термометры холодной и горячей воды третьего контура

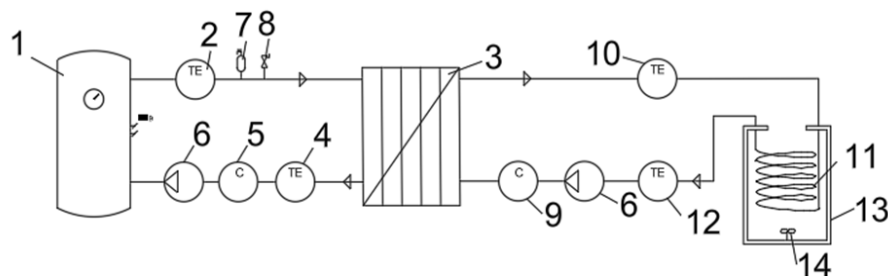


Рис. 2. Схема устройства для исследования и проведения энергетического аудита спирального теплообменника (чиллера):

1 – теплогенератор, 2 – термометр подающей горячей воды первого контура, 3 – пластинчатый теплообменник, 4 – термометр обратной воды первого контура, 5 – расходомер первого контура, 6 – циркуляционный насос, 7 – воздушосборник, 8 – предохранительный клапан, 9 – расходомер второго контура, 10 – термометр нагретого флюида второго контура, 11 – спиральный теплообменник (чиллер), 12 – термометр охлажденного флюида второго контура, 13 – калориметр, 14 – мешалка калориметра

менниками, заполненными флюидом;

– третий и четвертый вспомогательные контуры для системы горячего водоснабжения или нагрева исследуемой жидкости (в зависимости от схемы).

Оценка энергетической эффективности преобразования тепловой энергии и КПД пластинчатых теплообменников проводится на разработанной авторами экспериментальной установке, приведенной на рис. 1.

Оценка энергетической эффективности преобразования тепловой энергии и КПД спирального теплообменника (чиллера) проводится на разработанной авторами экспериментальной установке, приведенной на рис. 2.

Разработанные научно-экспериментальные установки (рис. 1 и рис. 2) предназначены для сравнительного анализа и окончательного решения по выбору теплообменных аппаратов различного назначения, теплотехнического оборудования и приборов, а также жидкого теплоносителя (флюида), используемых в многоконтурных флюидных системах теплоснабжения. Полученные результаты обследования позволят повысить универсальность экспериментальной установки за счет одновременного изучения энергетической эффективности систем теплоснабжения, а также сравнивать эффективность различных типов теплообмен-

ных аппаратов и теплоносителей для флюидных многоконтурных систем теплоснабжения.

Оба устройства (рис. 1 и рис. 2) включают в себя основные элементы: электрический водонагреватель (теплогенератор), воздухосборник, предохранительный клапан с манометром, циркуляционные насосы, термометры, расходомеры, пластинчатые теплообменники и спиральный теплообменник (чиллер), трубопроводы системы теплоснабжения и другое оборудование.

В качестве теплогенерирующей установки использован проточный электрический водонагреватель с позиционным регулятором температуры и автоматическим регулятором температуры.

Температура теплоносителей (воды и флюида) на входе и выходе теплогенератора, а также давление в системе контролируются датчиками температуры и давления. Безопасность работы обеспечивают автоматические выключатели и приборы безопасности.

Передача тепловой энергии между контурами циркуляции осуществляется через пластинчатые противоточные рекуперативные теплообменные аппараты (пластинчатый теплообменник). Температура на входе и выходе теплообменных аппаратов со стороны первого, второго и третьего контуров контролируется датчиками температуры.

Разберем работу многоконтурной системы теплоснабжения (рис. 1 и рис. 2).

Первый контур – тепловая сеть, заполненная водой.

В электрический котел 1 из обратного трубопровода теплосети циркуляционным насосом 6, подается обратная сетевая вода с температурой t_c'' , где нагревается в котле до температуры t_c' , откуда подается в подающий трубопровод теплосети. Нагретая вода из тепловой сети переходит в пластинчатый теплообменник 3, где передает свою теплоту воде второго контура.

Охлажденная вода из теплообменника поступает в обратный трубопровод тепловой сети с температурой t_c'' . По показанию расходомера 5 первого контура циркуляции определяется расход воды в системе теплоснабжения $G_{ст}$. Воздухосборник 7 и предохранительный клапан 8 контролируют и обеспечивают надежную работу системы теплоснабжения.

Второй контур – система, заполненная флюидом, для пластинчатого теплообменника и спирального теплообменника (чиллера).

Флюид с температурой $t_{хф}$ подается в пластинчатый теплообменник 3, где нагревается сетевой водой первого контура до температуры $t_{гф}$ и нагретый флюид поступает в пластинчатый теплообменник или спиральный теплообменник (чиллер). По показанию расходомера флюида 9 второго контура циркуляции определяется расход флюида в системе $G_{ф}$.

Третий контур циркуляции (рис. 1) – система, заполненная водой в пластинчатом теплообменнике 11, где теплота от теплоносителя (флюида) промежуточного (второго) контура передается холодной воде из водопровода вспомогательного (третьего) контура циркуляции для нагрева воды системы горячего водоснабжения.

Четвертый контур (рис. 2) – система спирального теплообменника 11 (чиллера), погруженного в калориметр 13, заполненного исследуемой жидкостью, где теплота от теплоносителя (флюида) промежуточного (второго) контура циркуляции передается жидкости калориметра. Мешалка калориметра 14 предназначена для перемешивания исследуемой жидкости.

Разработанные в статье устройства и методики проведения энергоаудита для системы теплоснабжения с флюидным теплоносителем позволяют провести оценку теплотехнических параметров приборов и энергетической эффективности преобразования тепловой энергии, а также КПД пластинчатого теплообменника и спирального теплообменника (чиллера). Экспериментальные установки (рис. 1 и рис. 2) позволяют проводить энергетический

аудит контуров циркуляции, заполненных водой или флюидом.

Дополнительно для второго контура циркуляции и пластинчатых теплообменников 3 и 11 (рис. 1) проводят исследования:

- тепловой мощности и КПД пластинчатого теплообменника;
- коэффициента теплоотдачи и теплопередачи в теплообменнике;
- площади пластинчатого теплообменника.

Дополнительно для четвертого контура циркуляции и спирального теплообменника 11 (чиллера), погруженного в жидкость калориметра 13, где теплота от теплоносителя (флюида) промежуточного (второго) контура циркуляции передается жидкости калориметра, проводятся исследования:

- тепловой мощности и КПД калориметра;
- теплоемкости и объема исследуемой жидкости в калориметре;
- площади спирального теплообменника 11 (чиллера).

Дополнительно на экспериментальной установке (рис. 1 и рис. 2) проводятся исследования удельного теплового потока от трубопроводов и теплогенератора к наружному воздуху и определение КПД контуров циркуляции.

Исследованию данных вопросов посвящены работы авторов [1–7].

Литература

1. Фокин, В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита / В.М. Фокин. – М. : Машиностроение-1, 2006. – ISBN: 5-94275-279-6. – EDN: QMJGGF.
2. Фокин, В.М. Экспериментальная установка для проведения энергоаудита теплоэнергетической системы теплоснабжения / В.М. Фокин, С.В. Нестеренко, А.В. Ковылин, И.В. Стефаненко, В.В. Федоров // Перспективы науки. – Тамбов : НТФ РИМ. – 2026. – № 2(197). – С. 67–71. – EDN: VLUPNL.
3. Нестеренко, С.В. Исследование энергетического потенциала флюидных скважин для систем теплоснабжения / С.В. Нестеренко, В.М. Фокин, В.В. Федоров // Перспективы науки. – Тамбов : НТФ РИМ. – 2026. – № 3(198). – С. 132–135. – EDN: XMIATV.
4. Карапузова, Н.Ю. Исследование теплопроводности теплоизоляционных органических пористых материалов методом математического эксперимента / Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин, А.А. Чеботарев, В.И. Карапузов // Components of Scientific and Technological Progress. – 2026. – № 1(115). – С. 12–20. – EDN: NVYVDA.
5. Карапузова, Н.Ю. Температурное поле в пластине при конвективном симметричном охлаждении / Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин, А.А. Чеботарев, В.И. Карапузов // Перспективы науки. – Тамбов : НТФ РИМ. – 2026. – № 2(197). – С. 144–148. – EDN: NWXMZK.
6. Иванов, В.Н. Влияние параметров климата на эксплуатацию систем теплообеспечения зданий / В.Н. Иванов, А.Н. Колодезникова // Перспективы науки. – Тамбов : ТМБпринт. – 2021. – № 11(146). – С. 90–93. – EDN: UCZUML.
7. Будикин, А.Е. Технические решения по устройству систем отопления и основные эксплуатационные проблемы в малоэтажных жилых зданиях в Арктической полосе Республики Саха (Якутия) / А.Е. Будикин, Е.Г. Слободчиков // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 12(90). – С. 14–18. – EDN: RFOSIU.

References

1. Fokin, V.M. Osnovy energosberezheniya i energoaudita / V.M. Fokin. – M. : Mashinostroenie-1,

2006. – ISBN: 5-94275-279-6. – EDN: QMJGGF.

2. Fokin, V.M. Eksperimentalnaya ustanovka dlya provedeniya energoaudita teploenergeticheskoy sistemy teplosnabzheniya / V.M. Fokin, S.V. Nesterenko, A.V. Kovylin, I.V. Stefanenko, V.V. Fedorov // Perspektivy nauki. – Tambov : NTF RIM. – 2026. – № 2(197). – S. 67–71. – EDN: VLUPNL.

3. Nesterenko, S.V. Issledovanie energeticheskogo potentsiala flyuidnykh skvazhin dlya sistem teplosnabzheniya / S.V. Nesterenko, V.M. Fokin, V.V. Fedorov // Perspektivy nauki. – Tambov : NTF RIM. – 2026. – № 3(198). – S. 132–135. – EDN: XMIATV.

4. Karapuzova, N.YU. Issledovanie teploprovodnosti teploizolyatsionnykh organicheskikh poristyykh materialov metodom matematicheskogo eksperimenta / N.YU. Karapuzova, V.M. Fokin, A.A. Chebotarev, V.I. Karapuzov // Somponents of Scientific and Technological Progress. – 2026. – № 1(115). – S. 12–20. – EDN: NVYVDA.

5. Karapuzova, N.YU. Temperaturnoe pole v plastine pri konvektivnom simmetrichnom okhlazhdenii / N.YU. Karapuzova, V.M. Fokin, A.A. Chebotarev, V.I. Karapuzov // Perspektivy nauki. – Tambov : NTF RIM. – 2026. – № 2(197). – S. 144–148. – EDN: NWXMZK.

6. Ivanov, V.N. Vliyanie parametrov klimata na ekspluatatsiyu sistem teploobespecheniya zdaniy / V.N. Ivanov, A.N. Kolodeznikova // Perspektivy nauki. – Tambov : TMBprint. – 2021. – № 11(146). – S. 90–93. – EDN: UCZUML.

7. Budikin, A.E. Tekhnicheskie resheniya po ustrojstvu sistem otopeniya i osnovnye ekspluatatsionnye problemy v maloetazhnykh zhilykh zdaniyakh v Arkticheskoy polose Respubliki Sakha (Yakutiya) / A.E. Budikin, E.G. Slobodchikov // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 12(90). – S. 14–18. – EDN: RFOSIU.

Heat Supply System with Fluid Coolant, Plate and Spiral Heat Exchanger (Chiller)

V.M. Fokin, S.V. Nesterenko, F.A. Kolesnikov, N.Yu. Evstafieva

*Volgograd State Technical University,
Volgograd (Russia)*

Key words and phrases: heat supply system; fluid coolant; plate heat exchanger; spiral heat exchanger; energy audit.

Abstract. The article presents the design of an experimental installation for studying, researching, conducting an energy survey and energy audit of a heat supply system with a fluid coolant, plate heat exchangers and a spiral heat exchanger (chiller). Objective: to develop an experimental installation for studying the heat supply system and heat exchangers with a fluid coolant. Objectives: to develop energy audit techniques for a plate heat exchanger and a spiral heat exchanger (chiller). Hypothesis: increasing the energy efficiency of heat supply systems and heat exchangers. Research method: mathematical and physical experiment. Result achieved: development of devices and techniques for the study of heat exchangers with a fluid coolant.

© В.М. Фокин, С.В. Нестеренко, Ф.А. Колесников, Н.Ю. Евстафьева, 2026

УДК 691.32

Concrete with Photoluminescent Properties

Srewi Dhamyaa Ali Kadhim, Obaidi Adham Abdulsattar
Hameed, Farah Faaq Taha, Isam Saleem Mhaimeed

University of Diyala, Diyala (Iraq)

Key words and phrases: decorative concrete; luminescent concrete; luminescence intensity; photoluminescent pigment; smart roads.

Abstract. The aim of this study is a comprehensive analysis of the current status, properties, and potential applications of photoluminescent concrete in construction and architecture. This work included systematizing scientific literature from 2015–2025, identifying key components and production technologies, assessing the functional capabilities and limitations of the material under study, and standardizing terminology. The study is based on the hypothesis that the integration of phosphorescent pigments and modified additives into a cement matrix significantly improves the decorative and performance properties of concrete, providing significant energy savings and increasing infrastructure safety without compromising its strength properties. The methodology included a systematic search and screening of publications in Web of Science, Scopus, and Google Scholar, standardization of keywords, bibliometric data processing using BibExcel, and a comparative analysis of the optical, mechanical properties, and durability of the composites. As a result, the property of the material to absorb natural and artificial light and emit it for 8–12 hours was confirmed, priority areas of application were identified, the main barriers to implementation were determined, and a 20 % increase in research activity per year was recorded, demonstrating the high potential of photoluminescent concrete as a basis for energy-efficient, safe and aesthetically expressive urban environments.

Introduction

The development of building materials science aims to improve the functionality, reliability, environmental friendliness, and decorative aesthetics of materials. Among the tasks and priority areas of current issues in urban development and improvement are highlighting the architectural character of construction, eliminating the monotony and homogeneity of buildings, structures, and small architectural forms. In this regard, the need for new generation concrete with specific performance indicators is growing, creating the necessary conditions for systematically improving

the quality and comfort of the urban environment [1–16]. Possible solutions for increasing the efficiency of photoconcrete and its derivatives include the integrated use of waste rock, modified additives, and modern pigments. The functional possibilities of concrete can be expanded and its quality indicators improved by using photoconcrete pigments, which introduce new principles for concrete design and increase technical and economic efficiency thanks to the introduction of modern energy-saving technologies [4]. Photoconcrete is being studied from the perspective of geoarchitectural engineering, which seeks to solve the problem of improving the living environment and enriching the natural and aesthetic landscape of the area as a whole [16–22]. This article presents the properties and applications of photoluminescent concrete, discussing the components and factors affecting concrete, and the challenges it faces [15].

The durability, structural performance, and design aspects of luminous concrete for infrastructure applications are examined in [28], while [26] reviews the properties of luminous materials used in glow in the dark concrete together with installation methods, material behaviour, and manufacturing techniques. The potential and capabilities of raw materials for glow in the dark concrete, including their performance, compatibility, and the challenges involved in achieving the desired effects, are analysed in [18]. A broader overview of recent developments in luminous concrete – its applications, properties, and production technologies – is provided in [7]. Advanced phosphorescent materials employed in glow in the dark photoluminescent concrete, discussing their potential uses, manufacturing routes, and physical characteristics are highlighted in [13]. The influence of nano sized phosphor particles on glow in the dark concrete, particularly their effects on optical, mechanical, and thermal properties, is reviewed in [12].

In [27], long-chain phosphorescent materials, $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}_2\text{p}$ and $\text{Dy}3\text{p}$, were prepared using the strong-state response technique. Their luminescence properties were enhanced by changing the reaction parameters. Long-chain phosphorescent materials are a type of photoluminescent material. These materials can store energy when exposed to natural or artificial sunlight, and after storing the energy, they self-luminize and glow in the dark, making them energy-saving and environmentally friendly [25]. Due to the development of long-glow materials, many scientists have used them and considered them to be iridescent coatings [5]. By blending glitter shades and additives, luminous coatings are manufactured. They can be used for flashing signals and warning functions because they can adapt to various road conditions [14]. Further studies explore examples of light-emitting material components and technologies for integrating light-emitting structures containing luminescent materials and pigments [16; 24]. In [16], a test method is proposed to measure the intensity and duration of luminance of coated concrete surfaces, with luminance used as a key indicator of radiant sealant performance. Finally, high mechanical performance, including compressive strength and slip resistance, is reported to be achievable by incorporating glowing strontium aluminate, which provides a luminous effect lasting up to ten hours.

Hojjat Hashempour Jafghani and Hadi Barghalam report on the construction of light emitting concrete structures, detailing the manufacturing process and different concrete formulations incorporating light emitting pigments and materials such as sulfide powder, titanium powder, resins, cement, sand, gravel, and water. Their work provides a practical account of how photoluminescent components can be integrated into concrete mixes to achieve light emitting behaviour [9].

Another study investigates a soybean based luminescent sealant composed of soybean polystyrene methyl ester and strontium aluminate phosphorescent powder, applied to enhance the brightness of concrete surfaces [1–3; 17]. The authors focus on testing procedures for measuring the duration and intensity of luminescence of coated concrete, highlighting luminance measurement as a key parameter for evaluating sealant performance [1–3; 17].

Materials and Methods

The first stage of the literature review involved formulating research questions, which played a significant role in defining the scope of the study and guiding the review process. The systematic review aimed to examine the global development of luminous concrete, including various aspects such as the definition of luminous concrete, its features, applications, drawbacks, and benefits, as well as its various methods and components, in addition to the challenges and difficulties facing the process [8]. In this review, we sought to gain a comprehensive understanding of the topic and present a model study on luminous concrete.

Our research questions are:

1. What is luminous concrete?
2. Is luminous concrete environmentally friendly?
3. What are the challenges facing the use of luminous concrete?

We established criteria to determine which research articles would be included or excluded after identifying research topics. Which involved using specific keywords to search Google Scholar and the Web of Science core collection. The review proposes a two-stage process for selecting and analyzing research papers.

Stage 1. Locating, evaluating, and screening studies

We looked through the Web of Science and Scopus databases for potential publications for evaluation. We developed several keyword lists to help find and search research. The terms “What is photoluminescent concrete, its components, uses, its relation to sustainability, and its role in architecture” were the research criteria.

Stage 2. Data extraction and coherence analysis were performed using BibExcel BibExcel was used to extract the article title, authors, journal, year of publication, and other published information. This program enables us to draw a diagram of the relationships between articles. More details are provided below (Table 1).

Data extraction and screening of related research papers

In line with the objective of our study, we adhered to the suggested guidelines for selecting relevant published research for our systematic literature review and extracting relevant data from them. The process involved several steps, including screening research papers based on titles, keywords, abstracts, and titles.

Protocol development

The protocol regulates the research methodology and review of published research. The protocol included the following: a Google Scholar search was conducted to identify study publications. Only peer-reviewed research publications published within the past few years were included in the search criteria. The search terms “photoconcrete”, “advantages”, “disadvantages”, “components”, and “uses” were selected for use in research published by other researchers. By following these steps, we were able to extract any research paper containing the term “photoconcrete” in its title, keywords, or content. Published scientific dissertations and peer-reviewed articles were included.

Exclusion based on keywords and titles

Titles and keywords were used to sort the research and scientific articles found through the search protocol. Research and scientific articles that were not related to the primary research area were excluded. This step reduced the number of research papers to be screened.

Results

Keyword selection and standardization

Based on an analysis of more than 100 research papers and scientific reviews in the field of

Table 1. Most frequently used keywords (Top 10)

No.	Key word	Frequency, %
1	Luminescent concrete	98
2	Phosphorescent materials	92
3	Photoluminescence	85
4	Luminescence intensity	80
5	Glow duration	78
6	Optical properties	75
7	Self-illuminating concrete	70
8	Sustainable infrastructure	65
9	Smart roads	60
10	Energy-saving building materials	55

photoluminescent concrete from 2015 to 2025, detailed data indicated that the average number of keywords per research paper was 5–8 words at most. Due to the overlap of many of them, the keywords were standardized [30]. Therefore, related phrases such as “glow-in-the-dark photoluminescent concrete”, “phosphorescent materials”, “photoluminescence”, “afterglow duration”, “optical properties”, “self-luminescent concrete”, “sustainable infrastructure”, and “energy-efficient building materials” were used. Keywords in the same field were then standardized into a single, most commonly used term. Examples include “photoluminescent concrete”, “self-luminescent concrete”, and “glowing concrete”, all of which are now “photoluminescent concrete.” Table 1 shows the most commonly used terms.

Analysis of research published annually

One hundred fifty to two hundred scientific research papers (research papers, conference proceedings, patents, and reviews) were published in this field during the period 2015–2025. At the beginning of the field’s spread in 2015, the number of published research papers was approximately 10–15. Between 2016 and 2018, the number of published research papers was approximately 40–50. Research in this field has continued to increase at a rate of 20 % annually.

Discussion

Definition of luminous concrete

In domestic and foreign practices, issues of production and application of architectural and decorative concrete and products based on it have been widely studied [11; 20]. Depending on the purpose, pigments or modifiers can be added to the composition of luminous concrete to obtain products with high aesthetic and functional properties [21; 29]. The aesthetic value of luminous concrete products lies in the architectural expression of the surface structure. The introduction of a luminous pigment into the composition of decorative concrete, while maintaining all the required performance characteristics, will provide an additional property – glowing – for the architectural expressiveness of products at night. The significance of this study lies in the fact that the glowing effect allows for expanding the functional scope of architectural and decorative products, increasing their technical and economic efficiency by saving energy by eliminating the need for additional lighting sources in public spaces, and increasing the safety of traffic and pedestrian flows [6; 10]

Currently, the uses of luminous pigment in concrete have not been sufficiently studied. The well-known method of introducing luminous pigments into decorative concrete products, which aims to ensure the glow of only the upper decorative layer, has several significant drawbacks: it does not provide glow throughout the entire operational period, does not technically allow for the production of products with complex configurations, and reduces the physical and mechanical properties of the material [23]. This study aims to investigate the properties of photochromic pigments and the formation of luminous decorative surfaces of products using photochromic pigments. This allows the production of products with a front surface formed in various positions and configurations, while maintaining the physical and mechanical properties of concrete, ensuring high architectural and decorative expression in daylight and a stable glow in the dark throughout the entire period of use [19].

Applications on luminous concrete

Luminous concrete (or glow-in-the-dark concrete) incorporates phosphorescent aggregates that absorb UV light (sunlight or artificial) and emit a soft glow for hours afterward. It is primarily used for aesthetic, safety, and wayfinding purposes. Here are notable projects worldwide:

1. Van Gogh-Roosegaarde Cycle Path (Nuenen, Netherlands, 2014).

Description: The most famous example. Designed by artist Daan Roosegaarde, this 1km bike path near Eindhoven celebrates Van Gogh. Thousands of luminous stones are embedded in the concrete surface.

Effect: Creates swirling, starry night patterns inspired by "The Starry Night," glowing for up to 8 hours after dusk. Enhances safety and provides a magical experience.

Material: Luminous stones set in concrete, coated with a weather-resistant layer.

2. Przelomy Centre (Szczecin, Poland, 2016).

Description: A museum/park commemorating WWII history designed by Robert Konieczny / KWK Promes.

Implementation: The large, sloping concrete plaza surrounding the building incorporates luminous aggregate.

Effect: After sunset, the vast surface emits a subtle, ethereal glow, transforming the memorial space and providing ambient light. It creates a contemplative atmosphere and gentle wayfinding.

3. Luminaid Pathway (Budapest, Hungary – Concept/Prototype).

Description: A concept design by Zsuzsanna Pósfai & Áron Losonczy (the latter being a pioneer in translucent concrete) for a temporary installation along the Danube.

Effect: Envisioned as glowing stepping-stones or pathways along the riverbank, enhancing nighttime ambiance and safety for pedestrians.

Status: Showcases the potential for urban beautification and safety, though often cited as a smaller-scale or conceptual application.

4. Glowing Path, Nowy Sacz (near Kraków), Poland.

Details: The Polish Institute of Polymer Technology developed luminous concrete and used it in 2021 to create a path approximately 100 meters long in a park.

Property: The material can glow for more than 10 hours after being charged by natural or artificial light.

5. Decorative panels & urban furniture (various locations)

Description: Smaller-scale applications are becoming more common.

Applications: Benches, plinths for sculptures, decorative wall panels in public spaces, facades of commercial buildings, signage elements.

Effect: Adds visual interest and subtle illumination after dark, contributing to unique urban identity and safer public spaces. Often used in parks, plazas, or cultural districts.

6. Experimental pavements & sidewalks (various trials):

Description: Cities and research institutions are testing luminous concrete in sidewalks and crosswalks.

Goal: Improve pedestrian safety at night, reduce reliance on streetlights (lowering energy consumption and light pollution), and add aesthetic value.

Challenges: Scaling up production, ensuring long-term durability under heavy wear, and managing cost-effectiveness compared to traditional materials plus lighting.

7. Pilot projects in Japan.

Details: Several Japanese universities and companies (such as Tokyo University of Science and Takenaka) are developing luminous concrete.

Applications: It has been used in limited sections of sidewalks or as decorative elements in some public parks or experimental exhibitions to study durability, performance, and sustainability.

8. Architectural and interior design elements (global).

Details: Some interior design companies and designers around the world have begun using luminous concrete as a luxury product.

Examples: It can be found in interior wall panels (unique cafes, restaurants, or shops); interior flooring (limited indoor or semi-indoor spaces); furniture or sculptures, such as tables, benches, or artwork; limited facade cladding as an aesthetic element.

Key considerations and limitations

Luminous concrete has several limitations that need to be considered in practice. It is significantly more expensive than standard concrete because of the specialized aggregates required. In terms of durability and maintenance, it is generally robust, but the exposed aggregate surface can wear under heavy traffic, which may reduce glow intensity over time; resin-based versions may also yellow and therefore require appropriate sealing. Its performance depends on light exposure: the material must receive sufficient UV light, ideally sunlight, to “charge”, and glow intensity diminishes over the night and is weaker on cloudy days or in shaded locations. The glow itself provides ambient illumination and wayfinding rather than task lighting; it is relatively subtle, with an afterglow lasting around 8–12 hours and gradually fading. At present, most large-scale applications remain prototypes, art installations, or limited features rather than full roads or structures, mainly because of cost and technical constraints. In terms of material forms, luminous concrete can be produced as pure concrete with luminous aggregate, as terrazzo-style surfaces where aggregate is embedded in resin, as prefabricated luminous stones or pavers set into standard concrete, or as cast-in-place concrete.

Conclusion

This article provides the assessment of studies related to luminous concrete. It provides an overview of the current status of the field of luminous concrete and addresses gaps in the relevant literature that need to be developed to improve the performance, environmental friendliness, and decorative aesthetics of the materials. To increase the efficiency of luminous concrete and products made from it, such as waste rock, modified additives, and modern pigments, their quality can be enhanced using luminous pigments. These pigments provide new principles for concrete design, increase technical and economic efficiency, save energy, and enhance the natural environment and aesthetic impact of the area. A review of the current literature reveals that luminous concrete represents a promising breakthrough in the field of sustainable and smart building materials. Studies demonstrate this material's ability to absorb natural or artificial light during the day and emit it at night in the form of a visible glow. This phenomenon is attributed to a delayed light

emission mechanism, which has been thoroughly researched to improve its efficiency and duration. In conclusion, luminous concrete is a revolutionary technology that opens new horizons for sustainable architecture and smart infrastructure.

References

1. Lima, N.B. A Comprehensive Strategy to Boost the Quantum Yield of Luminescence of Europium Complexes / N.B. Lima, S.M. Goncalves, S.A. Junior, A.A. Simas // Scientific Reports. – 2013. – № 3. – P. 203–211.
2. Xiang, P. Frontier Research on High Performance Concrete and Mechanical Properties / P. Xiang, H. Yang, J. Yan // Lecture Notes in Civil Engineering. – Vol. 518. – DOI: 10.1007/978-981-97-4090-1_31.
3. Smet, P.F. Persistent luminescence in nitride and oxynitride phosphors / P.F. Smet, J. Botterman, K. Van den Eeckhout, K. Korthout, D. Poelman // Optical Materials. – 2014. – Vol. 36(11). – P. 1913–1919. – DOI: 10.1016/j.optmat.2014.05.026.
4. Батраков, В.Г. Модифицированный бетон. Теория и практика : 2-е изд., перераб. и доп. / В.Г. Батраков. – М. : Стройиздат, 1998. – 768 с.
5. Bi, Y. Preparation and Characterization of Luminescent Paint for Road Markings / Y. Bi, J. Pei, Z. Chen, L. Zhang, R. Li, D. Hu. // Int. J. Pavement Res. Technol. – 2021. – Vol. 14(2). – P. 252–258. – DOI: 10.1007/s42947-020-0229-3. – EDN: KGRRPN.
6. Vorobchuk, V. White Cement-Based Decorative Concrete: Resource Provision, Technology, Properties, and Economic Efficiency / V. Vorobchuk, M. Matveeva, A. Peshkov // MATEC Web of Conferences EDP Sciences. – 2018. – Vol. 212. – P. 110–117.
7. Garg, A. Luminous Concrete: Recent Developments, Properties, and Potential Applications / A. Garg, A.P. Gupta // Journal of Structural Engineering. – 2021. – Vol. 44. – P. 103–378.
8. IS 10262:2003. Proportioning of Concrete Mixtures – Guidelines.
9. IS 456:2000. Code of Practice for Plain and Reinforced Concrete. – Bureau of Indian Standards, New Delhi.
10. Sundari, S. Experimental Study on Luminescent Concrete / S. Sundari, A. Sriswarnambigai // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2021.
11. Калашников, В.И. Бетоны нового поколения и реологические матрицы / В.И. Калашников // Новые энерго- и ресурсосберегающие высокотехнологичные технологии в производстве строительных материалов, 2011. – С. 25–41.
12. Калашников, В.И. Бетоны старого и нового поколений. Состояние и перспективы / В.И. Калашников // Наука: XXI век. – 2012. – № 1. – С. 60–67.
13. Liu, S. Recent Advances in Phosphorescent Materials for Glow-in-the-Dark Cementitious Composites / S. Liu, L. Yu, J. Xu, Y. Xu // Cement and Concrete Composites. – 2021. – Vol. 122.
14. Liu, T. Temperature and Pressure Sensitivity of Luminescent Paints in Aerodynamics / T. Liu, B.T. Campbell, S.P. Burns, J.P. Sullivan // Appl. Mech. Rev. – 1997. – Vol. 50(4). – P. 227–246. – DOI: 10.1115/1.3101703. – EDN: XZLDKY.
15. Pal, S. A Review on the Properties and Potential of Glow-in-the-Dark Concrete / S. Pal, S.K. Paul, S. Ghosh, A. Ghosh // Construction Materials. – 2018. – Vol. 165. – P. 541–549.
16. Salim, M. Luminescent Concrete Composites and Products / M. Salim, N.I.A. Blaisi; Imam Abdulrahman Bin Faisal University.
17. Glow-in-the-Dark Concrete Aggregates // Concrete Network [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.concretenetwork.com>.
18. Soetens, K., Hertogs, J., De Bely, N., & Elsen, J. (2020). A Critical Review of the Potential of

Glow-in-the-Dark Aggregates in Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, 262, 120316.

19. Сулейманова, Л.А. Повышение архитектурной выразительности бетонных тротуарных плит. Высокие технологии и инновации / Л.А. Сулейманова, А.М. Гридчин, М.В. Малюкова, Т.В. Морозова // Юбилейная международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ имени В.Г. Шухова (XXI научные чтения), 2014. – С. 347–353. – EDN: TGVNRN.

20. Сулейманова, Л.А. Технология бетона строительных изделий и конструкций / Л.А. Сулейманова, В.С. Лесовик, А.Г. Сулейманов. – Белгород : БГТУ, 2009. – 218 с. – EDN: RRTCHN.

21. Сулейманова, Л.А. Высокопрочный декоративный бетон / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, Е.А. Крушельницкая // Наука и инновации в строительстве. Международная научно-практическая конференция (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова). – Белгород : БГТУ, 2018. – С. 422–425.

22. Сулейманова, Л.А. Декоративные элементы как способ эстетического осмысления пространства / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, И.А. Погорелова, Е.А. Яковлева, А.А. Корякина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 7–13. – EDN: VWZDMB.

23. Tolstoy, A.D. Improvement of New Generation Concretes (NGCs) by Incorporating Man-Made Materials / A.D. Tolstoy, V.S. Lesovik, A.S. Milkina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.

24. Barglameh, H. Composition of light-emitting concrete and a method for synthesizing the light-emitting concrete structure / H. Barglameh, H.H. Ghavvani, publication US20170029696A1.

25. Hu, S.W. Preparation and Properties of Long-Afterglow Eu- and Dy-Doped Strontium Aluminate-Based Nanomaterials / S.W. Hu, H. Yan, T.T. Guo, D.H. Shu, W.F. Shan, G.Z. Li, D.Q. Guo. // *Ceram. Int.* – 2018. – Vol. 44(7). – P. 755.

26. Chen, W. A Review of Production Technologies and Properties of Luminescent Materials for Glow-in-the-Dark Concrete / W. Chen, Q. Li, S. Li // *Construction Materials and Materials*. – 2020. – Vol. 258. – Art. 120493. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105214.

27. Schalm, O. Performance and Design of Luminescent Concrete for Infrastructure Applications / O. Schalm, A. de Boer, K. van Bruegel // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – Vol. 99. – P. 135–145.

28. Shang, B. Preparation of Highly Luminescent Materials and Application of Luminescent Coatings in Road Construction / B. Shang, et al. // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2022. – Vol. 34.8. – Art. 04022159. – DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004305.

29. Yan Li. Decorative Building Materials / Yan Li, Shuxia Ren // *Woodhead Series in Civil and Structural Engineering*, 2011. – P. 10–24.

30. Bohong Zhang. In situ monitoring of the hydration of calcium silicate minerals in cement with a remote fiber-optic Raman probe / Bohong Zhang, Wenyu Liao, Hongyan Ma, Jie Huang // *Cement and Concrete Composites*. – 2023. – Vol. 142. – Art. 105214. – DOI:10.1016/j.cemconcomp.2023.105214.

References

4. Batrakov, V.G. Modifitsirovannij beton. Teoriya i praktika : 2-e izd., pererab. i dop. / V.G. Batrakov. – M. : Strojizdat, 1998. – 768 s.

11. Kalashnikov, V.I. Betony novogo pokoleniya i reologicheskie matritsy / V.I. Kalashnikov // *Novye energo- i resursosberegayushchie vysokotekhnologichnye tekhnologii v proizvodstve stroitelnykh materialov*, 2011. – S. 25–41.

12. Kalashnikov, V.I. Betony starogo i novogo pokolenij. Sostoyanie i perspektivy / V.I. Kalashnikov // Nauka: XXI vek. – 2012. – № 1. – S. 60–67.

19. Sulejmanova, L.A. Povyshenie arkhitekturnoj vyrazitelnosti betonnykh trotuarnykh plit. Vysokie tekhnologii i innovatsii / L.A. Sulejmanova, A.M. Gridchin, M.V. Malyukova, T.V. Morozova // YUbilejnaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 60-letiyu BGTU imeni V.G. SHukhova (XXI nauchnye chteniya), 2014. – S. 347–353. – EDN: TGVNRN.

20. Sulejmanova, L.A. Tekhnologiya betona stroitelnykh izdelij i konstruksij / L.A. Sulejmanova, V.S. Lesovik, A.G. Sulejmanov. – Belgorod : BGTU, 2009. – 218 s. – EDN: RRTCHH.

21. Sulejmanova, L.A. Vysokoprochnij dekorativnij beton / L.A. Sulejmanova, M.V. Malyukova, E.A. Krushelnitskaya // Nauka i innovatsii v stroitelstve. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (k 165-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. SHukhova). – Belgorod : BGTU, 2018. – S. 422–425.

22. Sulejmanova, L.A. Dekorativnye elementy kak sposob esteticheskogo osmysleniya prostranstva / L.A. Sulejmanova, M.V. Malyukova, I.A. Pogorelova, E.A. YAKovleva, A.A. Koryakina // Vestnik BGTU im. V.G. SHukhova. – 2016. – № 6. – S. 7–13. – EDN: VWZDMB.

Бетон с фотолюминесцентными свойствами

Сриви Дамийа Али Кадим, Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид, Фарах Фаак Таха,
Исам Салим Мхаймид

Университет Диялы, г. Дияла (Ирак)

Ключевые слова и фразы: декоративный бетон; интенсивность люминесценции; люминесцентный бетон; умные дороги; фотолюминесцентный пигмент.

Аннотация. Целью данного исследования является комплексный анализ современного состояния, свойств и перспектив применения фотолюминесцентного бетона в строительстве и архитектуре. В рамках работы решались задачи по систематизации научной литературы за 2015–2025 гг., идентификации ключевых компонентов и технологий производства, оценке функциональных возможностей и ограничений материала, а также унификации терминологического аппарата. Исследование базируется на гипотезе, согласно которой интеграция фосфоресцентных пигментов и модифицированных добавок в цементную матрицу позволяет существенно улучшить декоративные и эксплуатационные характеристики бетона, обеспечивая значительную экономию энергии и повышение безопасности инфраструктуры без снижения его прочностных параметров. Методология включала систематический поиск и скрининг публикаций в базах Web of Science, Scopus и Google Scholar, стандартизацию ключевых слов, библиометрическую обработку данных с помощью BibExcel, а также сравнительный анализ оптических, механических свойств и долговечности композитов. В результате подтверждена способность материала поглощать естественное и искусственное освещение и излучать его в течение 8–12 ч., выявлены приоритетные сферы применения, определены основные барьеры внедрения и зафиксирован рост исследовательской активности на 20 % в год, что доказывает высокий потенциал фотолюминесцентного бетона как основы для энергоэффективной, безопасной и эстетически выразительной городской среды.

© Srewi Dhamyaa Ali Kadhim, Obaidi Adham A. Hameed, Farah Faaq Taha,
Isam Saleem Mhaimeed, 2026

УДК 69.05

Оптимизация организации возведения монолитных конструкций в жилищном строительстве

А.М. Кирсанова, А.О. Хубаев

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет»,
г. Москва (Россия)*

Ключевые слова и фразы: бетонирование; жилищное строительство; захватки; монолитные конструкции; опалубочные работы; организационно-технологические решения; организация строительства; технологические ограничения.

Аннотация. Статья посвящена оптимизации организации возведения монолитных конструкций в жилищном строительстве. Рассмотрена связь между подготовительными, опалубочными, арматурными, бетонными и контрольными операциями, от которых зависит продолжительность производства работ. Показано, что увеличение сроков часто связано с разрывами между смежными процессами: неупорядоченной подачей материалов, доработкой элементов на монтажном горизонте, задержками приемки и несогласованностью перехода между захватками. Предложен порядок выбора организационно-технологических решений, основанный на выявлении операций, создающих задержки, их группировке по зонам управления и проверке технологических ограничений до изменения графика производства работ. Оптимизация рассматривается как управление всей последовательностью бетонных работ, без сведения задачи к ускорению отдельной операции.

Монолитные железобетонные конструкции широко применяются в жилищном строительстве, так как несущий каркас формируется непосредственно на площадке и может быть адаптирован к планировке здания. Организация таких работ строится вокруг повторяемой последовательности на типовом этаже: опалубка, армирование, приемка, бетонирование, выдерживание и распалубка. При трудоемкости 1 м³ монолитных железобетонных конструкций 4–8 чел-ч основная доля затрат приходится на подготовку и сборку конструкций: опалубочные работы занимают 40–45 %, арматурные – 30–35 %, бетонные – 20–25 % [1]. Оптимизация организации работ должна рассматриваться через согласование смежных операций: подготовку материалов, оборот опалубки, работу по захваткам, приемку и соблюдение технологических ограничений при бетонировании.

Рассмотрим, как связь опалубочных, арматурных, бетонных и приемочных операций

определяет организацию возведения монолитного каркаса и выбор показателей для оценки принятых решений.

Процесс устройства монолитных конструкций включает заготовку, транспортировку и операции на строительной площадке; их связь определяет возможность сокращения продолжительности работ [2]. В этой логике резерв сокращения срока связан с подготовкой материалов, подачей арматуры, готовностью опалубки и приемкой участка перед укладкой смеси.

Качество смеси, способ подачи, уплотнение, состояние опалубки, климатические условия, оборудование, квалификация рабочих, контроль качества и арматурные работы влияют на срок через готовность участка к следующей операции [3]. Жесткая или расслоившаяся смесь усложняет укладку в зоне арматуры, недостаточное уплотнение приводит к пустотам, неподготовленная опалубка увеличивает время монтажа и распалубки, срыв поставки нарушает режим бетонирования. Эти условия должны быть отражены в ППР и технологических картах до начала работ: по захваткам, поставке смеси, приемке скрытых работ, зимнему режиму и контролю прочности. При типовой подготовке документации без привязки к объекту такие решения переносятся на площадку, а задержки начинают накапливаться уже в ходе работ [4].

После выявления причин задержек организационные решения проверяются по сопоставимым показателям: продолжительность работ на типовом этаже, длительность повторяемых операций и наличие простоев между смежными процессами. Сравнение выполняется при одинаковых исходных условиях: составе работ, способе подачи материалов, порядке транспортировки и монтажа [5]. Для каждого решения фиксируется изменение срока и длительности операций до и после корректировки.

После бетонирования опалубочный комплект остается на конструкции до набора бетоном требуемой прочности. Ранняя распалубка может формально освободить захватку, но при недостаточной прочности бетона возрастает риск повреждения кромок, нарушения геометрии и дефектов поверхности [6]. Тип опалубочной системы учитывается через время оборота комплекта, трудоемкость монтажа и распалубки, а также зависимость от механизации [7]. Выбор опалубочного комплекта также связан с продолжительностью операции: недостаточная жесткость щитов может вызвать смещение арматурных каркасов, плохо подготовленная палуба усложняет демонтаж и увеличивает время распалубки. При корректировке схемы организации производства работ срок снятия опалубки должен назначаться по фактическому набору прочности бетона, без привязки к желаемой скорости выполнения работ.

Выявленные причины задержек сводятся к одной производственной задаче: убрать с монтажного горизонта операции, которые можно выполнить до подачи материалов на этаж. Для этого рассматривается порядок работ, при котором подбор арматурных элементов, их нарезка и комплектация выполняются заранее, а на этаж передаются элементы, готовые к установке в пределах назначенной захватки [8]. Рабочие зоны разделяются по очередности выполнения операций, чтобы арматурные, опалубочные и бетонные работы не блокировали друг друга. Изменение продолжительности при таком порядке организации показаны в табл. 1.

Сравнение до и после изменения организации работ задает логику дальнейшего выбора решений. Сначала фиксируются проблемные места на монтажном горизонте: поиск материалов, ручная доработка элементов, ожидание приемки, лишние перемещения опалубки и задержка передачи участка под следующую операцию. Затем эти причины группируются по зонам управления: материалы, заготовка, передача участка, приемка, опалубка и распалубка. Для каждой группы назначается решение, связанное с предварительной подготовкой

Таблица 1. Изменение продолжительности цикла возведения типового этажа [8]

Показатель	До корректировки	После корректировки
Типовой этаж, верхняя граница исходного диапазона	14 рабочих дней	6 рабочих дней
Типовой этаж, нижняя граница исходного диапазона	10 рабочих дней	6 рабочих дней
Установка и обвязка одного пилона	40 мин	8 мин
Монтаж балки	4 ч	5 мин

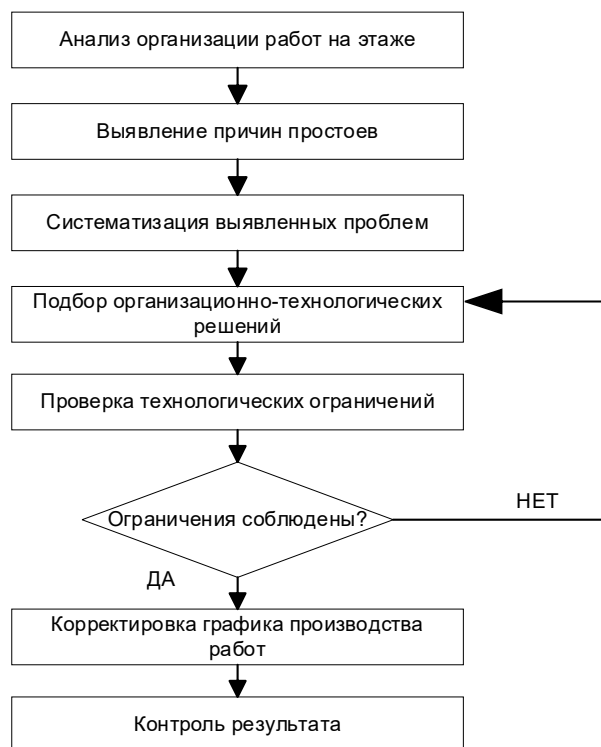


Рис. 1. Схема выбора организационно-технологических решений для оптимизации бетонных работ

элементов, разделением работ по захваткам и согласованием арматурных, опалубочных и бетонных операций. Изменение порядка работ выполняется после проверки технологических ограничений, а результат оценивается по продолжительности работ на типовом этаже и длительности повторяемых операций.

Перед изменением графика производства работ проверяются ограничения, связанные с режимом бетонирования и работой опалубки. Для вертикальных конструкций ключевым параметром является боковое давление свежесуспензированной бетонной смеси. Оно зависит от скорости бетонирования, высоты слоя, подвижности смеси, температуры и объемного веса. При росте скорости подачи увеличивается нагрузка на щиты, крепления и соединения, поэтому сокращение срока за счет ускоренной укладки требует отдельной проверки.

При высоте бетонирования 3,3 м, температуре смеси 15 °С, толщине стены 250 мм, осадке конуса 75 мм и объемном весе смеси 25 кН/м³ увеличение скорости бетонирования с 3,0 до 3,5 м/ч приводит к росту бокового давления с 47,7 до 51,75 кН/м². Прирост составляет



Рис. 2. Влияние скорости бетонирования на боковое давление бетонной смеси на опалубку по данным [9]

8,49 % [9]. При попытке сократить продолжительность работ за счет более быстрой подачи бетона возрастает боковое давление на опалубку, увеличивается нагрузка на щиты, крепления и соединения, усложняется контроль геометрии конструкции и качества поверхности бетона (рис. 2). Изменение схемы организации работ должно опираться на проверку технологических параметров, а не на механическое увеличение скорости бетонирования.

В зимний период к этим ограничениям добавляется режим твердения бетона. При отрицательной температуре срок распалубки зависит от фактического набора прочности и поддержания расчетной температуры в конструкции. Термоактивная опалубка со встроенным саморегулирующимся кабелем 40 Вт/м поддерживает температуру бетона выше +6 °C при наружной температуре до -30 °C; при полевых испытаниях после заливки температура стабилизировалась на уровне 8–10 °C, распалубка через 14 суток не выявила поверхностных трещин [10]. При зимнем бетонировании срок распалубки и переход к следующей операции должны назначаться по фактическому температурному режиму и набору прочности бетона.

Увеличение продолжительности возведения монолитных конструкций связано прежде всего с несогласованностью смежных операций. Задержки возникают при подготовке и подаче арматуры, ожидании приемки, перестановке опалубки, нарушении режима бетонирования и несвоевременной распалубке. Ускорение одной операции не дает устойчивого результата, если сохраняются ожидания между подготовкой материалов, армированием, опалубочными работами, бетонированием и контролем качества.

Для решения этой задачи предложен порядок выбора организационно-технологических решений: сначала определяются операции, создающие задержки в производстве работ, затем они группируются по зонам управления, после чего назначаются мероприятия по подготовке материалов, работе по захваткам, согласованию арматурных, опалубочных и бетонных операций. Перед изменением схемы производства работ проверяются технологические ограничения: давление бетонной смеси на опалубку, срок распалубки, температурный режим и фактический набор прочности бетона. Такой порядок позволяет рассматривать оптимизацию как управление всей последовательностью возведения монолитных конструкций, без сведения задачи к ускорению отдельных операций.

Литература

1. Канаков, И.Д. Анализ монолитных железобетонных конструкций в гражданском строительстве: преимущества, актуальные проблемы и возможные пути их решения / И.Д. Ка-

наков, М.Ю. Новиков, Ю.Г. Кислякова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2022. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-monolitnyh-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-v-grazhdanskom-stroitelstve-preimuschestva-aktualnye-problemy-i-vozmozhnye-puti-ih>. – EDN: LKWQCA.

2. Степанов, А.Е. Оптимизация монолитных работ при возведении жилых зданий / А.Е. Степанов, А.Б. Малыгин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 2(32) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-monolitnyh-rabot-pri-vozvedenii-zhilyh-zdaniy>. – EDN: GGGYEV.

3. Бидов, Т.Х. Организационно-технологические решения, влияющие на результативность возведения монолитных конструкций при организации строительства жилых зданий и сооружений / Т.Х. Бидов, М.А. Котляров, Г.Г. Ахвердашвили, Р.Х. Байчоров, А.А. Урусов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskie-resheniya-vliayuschie-na-rezultativnost-vozvedeniya-monolitnyh-konstruktsiy-pri-organizatsii>. – EDN: LETPIH.

4. Бидов, Т.Х. Организационно-техническое моделирование комплексной системы производства бетонных работ в зимний период при возведении жилых зданий / Т.Х. Бидов, А.О. Хубаев, А.А. Шабанова // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12. – № 2. – С. 15–25. – DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.02. – EDN: RUNKQJ.

5. Абакумов, Р.Г. Онтология исследования эффективности и перспектив крупнопанельного и монолитного железобетонного строительства жилых объектов / Р.Г. Абакумов, И.П. Авилова, М.М. Абакумова, С.А. Анисимов // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. – 2019. – № 10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/ontologiya-issledovaniya-effektivnosti-i-perspektiv-krupnopanelnogo-i-monolitnogo-zhelezobetonного-stroitelstva-zhilyh-obektov>. – DOI: 10.34031/article_5db33b395b0bb8.51040783. – EDN: KZILGG.

6. Baskova, R. A Dynamic Model for Effective and Optimal Planning of Formwork in Construction Projects / R. Baskova, A. Tazikova, Z. Strukova, M. Kozlovska, J. Cabala // Buildings. – 2023. – Vol. 13. – No. 7. – Art. 1794. – DOI: 10.3390/buildings13071794. – EDN: VZMCWI.

7. Terzioglu, T. Formwork System Selection in Building Construction Projects Using an Integrated Rough AHP-EDAS Approach: A Case Study / T. Terzioglu, G. Polat // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – No. 8. – Art. 1084. – DOI: 10.3390/buildings12081084. – EDN: LYNNIL.

8. Розанцева, Н.В. Формирование эффективного графика производства работ при строительстве монолитного железобетонного дома / Н.В. Розанцева, В.В. Золотарев // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19. – № 10. – С. 1676–1686. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1676-1686. – EDN: FFXIM.

9. Рязанова, Г.Н. Оптимизация технологических параметров укладки бетона в различные варианты опалубок при производстве работ в стесненных условиях строительства / Г.Н. Рязанова, В.И. Алешичев // Градостроительство и архитектура. – 2024. – Т. 14. – № 4. – С. 108–117. – DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.16. – EDN: LMCTFA.

10. Ирбатыров, А.А. Исследование твердения бетона в зимних эксплуатационных условиях с использованием термоактивной опалубки / А.А. Ирбатыров, Д.О. Базарбаев // Вестник науки. – 2025. – № 5(86) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tverdeniya-betona-v-zimnih-ekspluatatsionnyh-usloviyah-s-ispolzovaniem-termoaktivnoy-opalubki>. – EDN: VIVJXF.

References

1. Kanakov, I.D. Analiz monolitnykh zhelezobetonnykh konstruktsij v grazhdanskom

stroitelstve: preimushchestva, aktualnye problemy i vozmozhnye puti ikh resheniya / I.D. Kanakov, M.YU. Novikov, YU.G. Kislyakova // Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. – 2022. – № 3 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-monolitnyh-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-v-grazhdanskom-stroitelstve-preimushchestva-aktualnye-problemy-i-vozmozhnye-puti-ih>. – EDN: LKWQCA.

2. Stepanov, A.E. Optimizatsiya monolitnykh rabot pri vozvedenii zhilykh zdaniy / A.E. Stepanov, A.B. Malygin // Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya. – 2020. – № 2(32) [Electronic resource]. – Access mode : <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-monolitnyh-rabot-pri-vozvedenii-zhilykh-zdaniy>. – EDN: GGGYEV.

3. Bidov, T.KH. Organizatsionno-tekhnologicheskie resheniya, vliyayushchie na rezultativnost vozvedeniya monolitnykh konstruktsiy pri organizatsii stroitelstva zhilykh zdaniy i sooruzheniy / T.KH. Bidov, M.A. Kotlyarov, G.G. Akhverdashvili, R.KH. Bajchorov, A.A. Urusov // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2020. – № 6 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskie-resheniya-vliyayushchie-na-rezultativnost-vozvedeniya-monolitnyh-konstruktsiy-pri-organizatsii>. – EDN: LETPIH.

4. Bidov, T.KH. Organizatsionno-tekhnicheskoe modelirovanie kompleksnoy sistemy proizvodstva betonnykh rabot v zimnij period pri vozvedenii zhilykh zdaniy / T.KH. Bidov, A.O. KHubaev, A.A. SHabanova // Construction and Geotechnics. – 2021. – T. 12. – № 2. – S. 15–25. – DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.02. – EDN: RUNKQJ.

5. Abakumov, R.G. Ontologiya issledovaniya effektivnosti i perspektiv krupnopanelnogo i monolitnogo zhelezobetonного stroitelstva zhilykh obektov / R.G. Abakumov, I.P. Avilova, M.M. Abakumova, S.A. Anisimov // Vestnik BGTU imeni V.G. SHukhova. – 2019. – № 10 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cyberleninka.ru/article/n/ontologiya-issledovaniya-effektivnosti-i-perspektiv-krupnopanelnogo-i-monolitnogo-zhelezobetonного-stroitelstva-zhilykh-obektov>. – DOI: 10.34031/article_5db33b395b0bb8.51040783. – EDN: KZILGG.

8. Rozantseva, N.V. Formirovanie effektivnogo grafika proizvodstva rabot pri stroitelstve monolitnogo zhelezobetonного doma / N.V. Rozantseva, V.V. Zolotarev // Vestnik MGSU. – 2024. – T. 19. – № 10. – S. 1676–1686. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1676-1686. – EDN: FFXIM.

9. Ryazanova, G.N. Optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov ukladki betona v razlichnye varianty opalubok pri proizvodstve rabot v stesnennykh usloviyakh stroitelstva / G.N. Ryazanova, V.I. Aleshichev // Gradostroitelstvo i arkhitektura. – 2024. – T. 14. – № 4. – S. 108–117. – DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.16. – EDN: LMCTFA.

10. Irbatyrov, A.A. Issledovanie tverdeniya betona v zimnikh ekspluatatsionnykh usloviyakh s ispolzovaniem termoaktivnoy opalubki / A.A. Irbatyrov, D.O. Bazarbaev // Vestnik nauki. – 2025. – № 5(86) [Electronic resource]. – Access mode : <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tverdeniya-betona-v-zimnih-ekspluatatsionnykh-usloviyakh-s-ispolzovaniem-termoaktivnoy-opalubki>. – EDN: VIVJXF.

Optimization of the Organization of Monolithic Construction in Residential Building

A.M. Kirsanova, A.O. KHubaev

*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow (Russia)*

Key words and phrases: concreting; residential construction; work sections; monolithic

structures; formwork works; construction organization; organizational and technological solutions; technological constraints.

Abstract. The article deals with the optimization of the organization of monolithic construction in residential building. The relationship between preparatory, formwork, reinforcement, concreting and control operations is considered, as this relationship affects the duration of construction works. It is shown that schedule delays are often caused by gaps between adjacent processes: disordered material supply, rework of elements on the working level, delays in inspection and poor coordination between work sections. A procedure is proposed for selecting organizational and technological solutions based on identifying operations that cause delays, grouping them by management areas and checking technological constraints before changing the work sequence. Optimization is considered as the management of the entire sequence of concrete works, without reducing the task to the acceleration of a single operation.

© А.М. Кирсанова, А.О. Хубаев, 2026

УДК 69.05

Метод восстановления поврежденных производственных объектов в условиях стесненной городской застройки

А.А. Руденко¹, О.С. Ласкутина¹, А.Е. Михайлов¹,
А.Н. Бирюков²

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»;

² ФГКВООУ ВО «Военная академия
материально-технического обеспечения»,
г. Санкт-Петербург (Россия)

Ключевые слова и фразы: производственный объект; ремонтно-восстановительные работы; стесненная городская застройка; факторы строительства.

Аннотация. В статье рассматривается метод восстановления поврежденных производственных объектов в условиях стесненной городской застройки. Цель исследования – оценка значимости факторов, влияющих на эффективность восстановления поврежденных зданий в условиях стесненной городской застройки. Задачи исследования: сформировать массив исследуемых факторов, на основании регрессионного анализа разработать математическую модель, учитывающую влияние каждого фактора на результирующий показатель.

Научная гипотеза исследования заключается в предположении, что восстановление поврежденных объектов следует рассматривать как комплексную инженерно-организационную задачу, решение которой требует одновременного учета конструктивных, технологических, пространственно-логистических и социально-экологических факторов. В качестве методов исследования в данной статье использованы многофакторный регрессионный анализ, экспертно-аналитическая оценка, моделирование.

Полученные результаты исследования позволили определить в качестве наиболее значимых такие факторы, как ограниченность строительной площадки, близость существующих зданий и сооружений, сложность логистики доставки материалов, интенсивность транспортного движения, наличие подземных коммуникаций, климатические и погодные условия.

Восстановление поврежденных производственных объектов в условиях плотной город-

ской застройки представляет собой одну из наиболее сложных задач современного строительства.

Анализ существующих подходов к планированию ремонтно-восстановительных работ показывает, что традиционные методы, основанные на нормативных показателях, не всегда обеспечивают требуемую точность в специфических условиях городской застройки [1]. Это обусловлено влиянием множества взаимосвязанных факторов, таких как ограниченность строительной площадки, близость существующих зданий и сооружений, наличие подземных коммуникаций, ограничение зоны работы грузоподъемных механизмов, а также особенности координации участников строительного процесса в условиях пространственных ограничений [2].

В последние годы для решения задач оценки и учета факторов стесненности в строительстве все чаще применяются методы математического моделирования, в частности регрессионный анализ. Данный подход позволяет установить количественные зависимости между показателями качества ремонтно-восстановительных работ и влияющими на них факторами стесненной застройки, что создает основу для обоснованного планирования и управления строительными процессами [3].

Для выявления и последующей оценки факторов стесненности, влияющих на качество ремонтно-восстановительных работ при устранении повреждений производственных объектов, в качестве базового подхода принят метод экспертных оценок, позволяющий формализовать профессиональные суждения специалистов и получить сопоставимые результаты для дальнейшего расчета.

В табл. 1 отражены результаты ранжирования 23 факторов, влияющих на качество ремонтно-восстановительных работ. Оценки экспертов формировались по шкале от 1 до 23 баллов, где 1 — наименее значимый фактор, а 23 — наиболее значимый фактор.

Таблица 1. Отбор факторов по экспертным оценкам

№	Наименование фактора	Эксперты											Σ рангов	Вес фактора
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	Наличие подземных коммуникаций	19	19	20	16	17	18	19	20	16	17	20	201	0,0662
2	Близость существующих зданий и сооружений	21	22	23	21	22	23	21	22	23	21	23	242	0,0797
3	Классификация рабочих	6	6	7	8	9	10	7	8	9	10	8	88	0,0290
4	Сложность логистики доставки материалов	18	18	19	20	16	17	18	19	20	16	19	200	0,0659
5	Организация строительного генерального плана	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	31	0,0102
6	Выбор и размещение строительной техники	14	15	14	15	11	12	13	14	15	11	12	146	0,0481
7	Технология возведения несущего каркаса	13	14	13	14	15	11	12	13	14	15	11	145	0,0478
8	Требования надзорных органов	20	20	16	17	18	19	20	16	17	18	16	197	0,0649

Таблица 1. Отбор факторов по экспертным оценкам (продолжение)

№	Наименование фактора	Эксперты											Σ рангов	Вес фактора
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
10	Климатические и погодные условия	17	17	18	19	20	16	17	18	19	20	18	199	0,0655
11	Уровень механизации СМР	15	11	15	11	12	13	14	15	11	12	13	142	0,0468
12	Применение специализированного оборудования	11	12	11	12	13	14	15	11	12	13	14	138	0,0455
13	Обеспеченность строительной техникой	9	9	10	6	7	8	10	6	7	8	6	86	0,0283
14	Соблюдение технологии СМР	8	8	9	10	6	7	9	10	6	7	10	90	0,0296
15	Качество и полнота проектной документации	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	32	0,0105
16	Ограничение поворота стрелы крана	16	16	17	18	19	20	16	17	18	19	17	193	0,0636
17	Своевременная поставка материалов	10	10	6	7	8	9	6	7	8	9	7	87	0,0287
18	Ограниченность строительной площадки	23	21	22	23	21	22	23	21	22	23	22	243	0,0800
19	Интенсивность транспортного движения	22	23	21	22	23	21	22	23	21	22	21	241	0,0794
20	Обеспеченность трудовыми ресурсами	7	7	8	9	10	6	8	9	10	6	9	89	0,0293
21	Наличие и достаточность финансирования	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	35	0,0115
22	Оперативность принятия управленческих решений	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	33	0,0109
23	Координация между участниками процесса	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	34	0,0112

По итогам обработки и анализа экспертных оценок были определены 6 критически значимых факторов, оказывающих наиболее сильное влияние на качество ремонтно-восстановительных работ в условиях стесненной городской застройки:

- 1) ограниченность строительной площадки – x_1 ;
- 2) близость существующих зданий и сооружений – x_2 ;
- 3) интенсивность транспортного движения – x_3 ;
- 4) наличие подземных коммуникаций – x_4 ;
- 5) сложность логистики доставки материалов – x_5 ;
- 6) климатические и погодные условия – x_6 .

Следующим этапом является ранжирование выбранных факторов по степени их значимости с целью оценить согласованность экспертных суждений посредством коэффициента конкордации Кендалла:

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)}, \quad (1)$$

где S – сумма квадратов отклонений всех оценок рангов каждого объекта экспертизы от среднего значения; n – количество экспертов; m – количество факторов.

Значение коэффициента равно 0,96, что свидетельствует о высокой степени согласованности мнений экспертов.

Для десяти объектов, подлежащих ремонтно-восстановительным работам, были оценены ранее отобранные критически значимые факторы. На основе полученных данных было построено уравнение множественной регрессии:

$$y_x = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6, \quad (2)$$

где a – свободный член регрессии; $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ – частные коэффициенты регрессии, отражающие влияние каждого фактора.

Далее оценивается адекватность и применимость модели на практике методом разложения переменной $Y_{\text{кач}}$ на несколько составляющих:

- сумма квадратов относительно среднего:

$$\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 = TSS = 0,321;$$

- сумма квадратов, обусловленная регрессией:

$$\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = RSS = 0,319;$$

- сумма квадратов, обозначающая ошибку регрессии:

$$\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2 = ESS = 0,002.$$

В ходе исследования было выявлено 6 критически значимых факторов, влияющих на качество ремонтно-восстановительных работ в условиях стесненной городской застройки.

Результаты ранжирования по балльной шкале приведены в табл. 2.

На основе полученных данных с применением метода наименьших квадратов определены коэффициенты регрессии для каждого из факторов, обеспечивающие основу для построения уравнения множественной линейной регрессии:

$$y_x = 0,108x_1 + 0,065x_2 + 0,063x_3 + 0,068x_4 + 0,101x_5 + 0,067x_6 - 0,327.$$

Проверка регрессии и коэффициент детерминации определяются по формулам (3) и (4) соответственно:

$$TSS = RSS + ESS = 0,319 + 0,002 = 0,321, \quad (3)$$

Таблица 2. Ранжирование факторов

№	Наименование фактора	Расшифровка понятия	Оценочный балл
1	Ограниченность строительной площадки	Площадь участка < 0,5 Sзд, плотная окружающая застройка, практически отсутствуют зоны складирования, дороги одностороннего движения	1
		Площадь участка 0,5–1,0 Sзд, средняя плотность застройки, ограниченные зоны складирования	2
		Площадь участка > 1,0 Sзд, возможна организация полноценного строительного генерального плана (СГП) с зонами складирования	3
2	Близость существующих зданий и сооружений	Расстояние от строительной зоны до ближайшего здания < 5 м, требуется усиление фундаментов и защита конструкций соседних объектов	1
		Расстояние 5–15 м, необходим мониторинг деформаций и ограниченная зона работы техники	2
		Расстояние > 15 м, минимальное влияние на окружающую застройку, стандартные меры безопасности	3
3	Интенсивность транспортного движения	Высокоинтенсивное движение (> 1000 авт./ч), въезд техники возможен только в ночное время, требуется оцепление и регулировщики	1
		Умеренное движение (500–1000 авт./ч), ограниченный временной коридор для доставки, частичное перекрытие полосы	2
		Низкая интенсивность (< 500 авт./ч), свободный режим въезда, не требует специальных мер по организации движения	3
4	Наличие подземных коммуникаций	Плотная сеть коммуникаций (газ, электропровод, водопровод, теплотрасса) с необходимостью перекладки или подвески, ограничение применения свайного оборудования	1
		Наличие отдельных сетей с частичной перекладкой, применение щадящих методов земляных работ	2
		Коммуникации отсутствуют или вынесены за пределы строительной зоны, стандартные методы производства работ	3
5	Сложность логистики доставки материалов	Узкие подъезды (< 4 м), въезд только в ночное время, отсутствие площадки разгрузки, требуется перегрузка с малого транспорта	1
		Подъезды 4–6 м, ограниченный временной коридор доставки (6–22 ч), наличие небольшой разгрузочной зоны	2
		Широкие подъезды (> 6 м), свободный режим доставки, наличие разгрузочной площадки и буферной зоны хранения	3
6	Климатические и погодные условия	Неблагоприятные условия (t < –15 °С или > +35 °С, сильные осадки, ветер > 10 м/с), необходимость устройства защитных укрытий и прогрева конструкций	1
		Умеренно неблагоприятные условия (t от –15 °С до 0 °С или от +25 °С до +35 °С), применение дополнительных технологических мер	2
		Благоприятные климатические условия (t от 0 °С до +25 °С), стандартная технология производства работ без дополнительных затрат	3

$$R^2 = \frac{RSS}{TSS} = \frac{TSS - ESS}{TSS} = 1 - \frac{ESS}{TSS} = 0,99. \quad (4)$$

Значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,99$) отражает высокую значимость регрессионной модели, а также подтверждает точность прогнозирования показателей качества ремонтно-восстановительных работ.

Проверка статистической значимости уравнения регрессии с использованием F -критерия Фишера определяется по формуле:

$$F_R = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m} = 31,9, \quad (5)$$

где R^2 – коэффициент детерминации; n – количество объектов; m – число независимых переменных.

Критическое значение критерия F -критерия Фишера ($F_{\text{крит}}$) составляет 2,92 при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ и значениях степеней свободы $k_1 = m = 6$, $k_2 = n - m - 1 = 3$.

Сравнивая значение F_R и $F_{\text{крит}}$, выполняется условие:

$$F_R > F_{\text{крит}}. \quad (6)$$

Исходя из выполненного условия, нулевая гипотеза была отклонена.

Таким образом, разработанное уравнение регрессии $y_x = 0,108x_1 + 0,065x_2 + 0,063x_3 + 0,068x_4 + 0,101x_5 + 0,067x_6 - 0,327$ признано статистически значимым с уровнем надежности 95 %.

Полученные в настоящем исследовании результаты позволяют рассматривать восстановление поврежденных производственных объектов в условиях стесненной городской застройки как комплексную инженерно-организационную задачу, решение которой требует одновременного учета конструктивных, технологических, пространственно-логистических и социально-экологических факторов. Предложенная методика, объединяющая количественное ранжирование факторов стесненности, многофакторное регрессионное моделирование и поэтапную процедуру организационно-технологической подготовки, согласуется с современной парадигмой устойчивого строительства и развивает существующие подходы к реконструкции и ремонтно-восстановительным работам на производственных объектах [1; 2].

Полученные в настоящем исследовании коэффициенты регрессии ($b_1 = 0,108$ для ограниченности площадки и $b_5 = 0,101$ для логистики доставки материалов) количественно подтверждают доминирующую роль именно этих факторов, что согласуется с данными исследований [5], в которых приводится приоритетность организационно-пространственных ограничений при выполнении работ в центральных районах мегаполисов.

Высокое значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,99$) и значимое превышение фактического F -критерия Фишера над табличным ($F_R = 31,9 > F_{\text{крит}} = 2,92$) свидетельствуют о статистической устойчивости построенной модели и ее пригодности для практического прогнозирования показателя качества ремонтно-восстановительных работ ($Y_{\text{кач}}$). Аналогичные значения адекватности регрессионных моделей отмечены в исследованиях [4–6], что подтверждает корректность применения метода наименьших квадратов и планирования эксперимента к задачам строительного производства.

В результате проведенного исследования разработана методика учета факторов стесненной городской застройки при восстановлении поврежденных производственных объектов, объединяющая количественный анализ значимых параметров и многофакторное регрессионное моделирование. На основании выполненной работы сформулированы следующие выводы.

1. Систематизированы и классифицированы факторы, определяющие качество ремонтно-восстановительных работ на производственных объектах в условиях стесненной городской застройки. Сформированный перечень включает 23 фактора.

2. Посредством метода экспертных оценок с участием 11 специалистов и с использованием коэффициента конкордации Кендалла ($W = 0,96$) установлена высокая степень согласованности мнений экспертов и выделены шесть критически значимых факторов.

3. Построено уравнение множественной линейной регрессии $Y_{\text{кач}} = 0,108x_1 + 0,065x_2 + 0,063x_3 + 0,068x_4 + 0,101x_5 + 0,067x_6 - 0,327$, коэффициенты которого получены методом наименьших квадратов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: расширение выборки объектов для уточнения коэффициентов регрессии и выявления нелинейных зависимостей между факторами; учет сезонных и региональных особенностей производства работ; интеграция предложенной методики в информационное моделирование зданий (BIM) для автоматизированного формирования календарных планов и СГП; разработка цифровых инструментов поддержки принятия решений при восстановлении производственных объектов в условиях стесненной городской застройки.

Литература

1. Сергеев, В.В. Анализ нормативных документов в сфере оценки технического состояния объектов строительства / В.В. Сергеев, К.А. Артемов, Д.В. Саранова, Е.Н. Карпушко // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сборник международной научно-практической конференции, Волгоград, 15–16 декабря 2022 года. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 573–575. – EDN: IQCUAI.

2. Юрова, А.И. Строительство в условиях плотной городской застройки / А.И. Юрова // Наука и общество на пути к модернизации: современные взгляды, новые горизонты : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 12 февраля 2023 года. – Ростов-на-Дону : Манускрипт, 2023. – С. 15–16. – EDN WIWHJG.

3. Суй, В. Система интервальных шкал и критериев для анализа факторов риска при строительстве и восстановлении технически сложных объектов / В. Суй, А.А. Руденко // Перспективы науки. – Тамбов : НТФ РИМ. – 2025. – № 5(187). – С. 124–132. – EDN: WKPXAD.

4. Слепенкова, М.В. Математическая модель, методика планирования и динамической корректировки продолжительности восстановительного ремонта объектов после взрывного воздействия / М.В. Слепенкова, А.А. Руденко, А.Н. Бирюков // Экономика строительства. – 2026. – № 2. – С. 676–680. – EDN: SZWTVP.

References

1. Sergeev, V.V. Analiz normativnykh dokumentov v sfere otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya obektov stroitelstva / V.V. Sergeev, K.A. Artemov, D.V. Saranova, E.N. Karpushko // Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa : sbornik mezhdunarodnoj nauchno-

prakticheskoy konferentsii, Volgograd, 15–16 dekabrya 2022 goda. – Volgograd : Volgogradskij gosudarstvennij tekhnicheskij universitet, 2022. – S. 573–575. – EDN: IQCUAI.

2. YUrova, A.I. Stroitelstvo v usloviyakh plotnoj gorodskoj zastroyki / A.I. YUrova // Nauka i obshchestvo na puti k modernizatsii: sovremennye vzglyady, novye gorizonty : Materialy III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 12 fevralya 2023 goda. – Rostov-na-Donu : Manuskript, 2023. – S. 15–16. – EDN WIWHJG.

3. Suj, V. Sistema intervalnykh shkal i kriteriev dlya analiza faktorov riska pri stroitelstve i vosstanovlenii tekhnicheskikh slozhnykh obektov/ V. Suj, A.A. Rudenko // Perspektivy nauki. – Tambov : NTF RIM. – 2025. – № 5(187). – S. 124–132. – EDN: WKPXAD.

4. Slepenskova, M.V. Matematicheskaya model, metodika planirovaniya i dinamicheskoy korrekcirovki prodolzhitel'nosti vosstanovitel'nogo remonta obektov posle vzryvnogo vozdejstviya / M.V. Slepenskova, A.A. Rudenko, A.N. Biryukov // Ekonomika stroitelstva. – 2026. – № 2. – S. 676–680. – EDN: SZWTVP.

A Method for Restoring Damaged Industrial Facilities in Constrained Urban Development Conditions

A.A. Rudenko¹, O.S. Laskutina¹, A.E. Mikhailov¹, A.N. Biryukov²

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering;

² Military Academy of Logistic Support,
S. Petersburg (Russia)

Key words and phrases: repair and restoration works; constrained urban development; industrial facility; construction factors.

Abstract. The article discusses a method for restoring damaged production facilities in a densely built-up urban environment. The purpose of the study is to assess the significance of factors that affect the effectiveness of restoring damaged buildings in a densely built-up urban environment. The objective of the study is to create a set of factors to be investigated and, based on regression analysis, develop a mathematical model that takes into account the impact of each factor on the resulting indicator.

The scientific hypothesis of the study is based on the assumption that the restoration of damaged facilities should be considered as a complex engineering and organizational task that requires simultaneous consideration of structural, technological, spatial-logistical, and socio-environmental factors. The research methods used in this article include multivariate regression analysis, expert analysis, and modeling.

The research results allowed us to identify the most significant factors, such as the limited size of the construction site, the proximity of existing buildings and structures, the complexity of logistics for delivering materials, the intensity of traffic, the presence of underground utilities, and the climate and weather conditions.

© A.A. Руденко, О.С. Ласкутина, А.Е. Михайлов, А.Н. Бирюков, 2026

УДК 69.05

Organizational and Technical Reserves to Increase the Efficiency of Construction Production Using Machines and Mechanisms

I.M. Savin, I.L. Abramov

*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow (Russia)*

Key words and phrases: organizational and technical reserves; construction equipment; production efficiency; machinery fleet optimization; organizational and technological reliability; redundancy; simulation modeling; predictive analytics; maintenance and repair; digitalization of management.

Abstract. This article examines organizational and technical reserves for improving the efficiency of construction production by optimizing the use of machinery and mechanisms. It analyzes modern approaches to the formation of construction equipment fleets, methods for technical and economic evaluation of machine efficiency, and innovative approaches to the automation and digitalization of construction processes. Particular attention is paid to the practical aspects of implementing monitoring, simulation, redundancy, and predictive analytics systems, which can significantly improve productivity and reduce operating costs. The need for an integrated approach to realizing organizational and technical reserves is substantiated, including optimizing the structure of the equipment fleet, improving maintenance and repair systems, applying redundancy methods, computer modeling, and digitalizing the management of mechanized operations. The results of an analysis of scientific research and practical experience are presented, confirming the possibility of increasing labor productivity through systematic efforts to identify and utilize these reserves.

Introduction

Modern construction is characterized by a high degree of mechanization and automation of technological processes. In the face of increasing competition and the need to reduce project implementation timelines, the task of improving the efficiency of machinery and mechanisms as the main component of the production potential of construction organizations is particularly relevant.

Organizational and technical reserves are understood as untapped opportunities for increasing production efficiency associated with improving the organization and technology of work, improving

equipment utilization, and implementing innovative solutions. Implementing these potentials typically does not require significant capital investment but can provide a significant increase in productivity and a reduction in the cost of construction and installation work [1].

The study aims to analyze organizational and technical potential for improving construction efficiency, identify areas for optimizing the use of machinery and equipment, and substantiate methods for their practical implementation based on modern scientific approaches and technological solutions.

The efficiency of construction equipment is characterized by a system of metrics, among which productivity, reliability, fuel efficiency, shift efficiency, and technical availability are key. A comprehensive assessment of these metrics allows us to identify bottlenecks in equipment operation and determine areas for optimization.

One of the key factors in the reliability of construction equipment is its utilization rate. Researchers note that many regulatory documents provide outdated data on machine utilization rates during working hours, which require updating, as machines are constantly being improved [5]. Reliable assessment of machine operating time requires full-scale testing and the creation of up-to-date databases. An analysis of the performance of high-performance excavators at Russian mining enterprises shows that the actual average monthly productivity achieved is 30 % or more lower than the estimated technical performance [6]. To increase productivity, it is necessary to minimize negative factors and optimize the operation of machine systems. This feasibility is supported by available information on record productivity figures established during industrial experiments [6].

Identifying reserves is based on a systems analysis of production processes and factors influencing machine performance. Classifying reserves by various criteria is crucial: by location and use, time, life cycle stage, and reproduction process [1]. Particular attention is required to ensure the completeness of reserves for the three components of the labor process (means of labor, objects of labor, and labor resources), since a reserve determined for one resource cannot be realized if reserves for other resources are insufficient [1]. This underscores the importance of an integrated approach to planning efficiency improvement measures. An important methodological tool is the technical and economic assessment of the use of machines, which allows the goal to determine the efficiency of using both individual units of equipment and sets of machines, taking into account the compatibility of their technical characteristics.

One of the significant organizational reserves is the rational formation of a fleet of construction machinery. Experience shows that in many organizations, the structure of the fleet of equipment does not fully correspond to the volume and types of work performed, leading to equipment downtime and inefficient use of resources. Researchers propose a new approach to the formation of resource-saving fleets, complexes, and sets of roads, construction, and lifting and transport equipment based on the synthesis of investment and organizational-technological design, construction process modeling, models of technical and economic performance indicators for machine sets, databases, and modern information technologies [3].

An important factor influencing the implementation of investment projects in construction is the organizational and technological reliability of machines and processes during construction and installation work [3; 5]. Organizational and technological reliability is understood as the ability of technological, organizational, managerial, and economic decisions to ensure the achievement of a specified construction result under the random disturbances inherent in construction as a complex probabilistic system [3; 5]. Significant potential for improving efficiency lies in the use of redundancy methods in construction. Redundancy consists of the use of additional (backup) elements that ensure the system's operability in the event of failures of primary elements.

The research shows that the reliability of a construction project increases when certain parts

of the project can be restored during operation, and the presence of a reserve fund of machines, structures, and crews significantly facilitates recovery processes in emergency situations [9]. By reducing the recovery time for failed assets with a reserve fund, both the availability and reliability of the project can be significantly increased. The results of a study of the reliability indicators of construction process systems with the simultaneous operation of backup and primary elements allow for an assessment of the effectiveness of the selected work organization scheme [4; 8]. The dependence of reliability indicators on the use of the simultaneous operation of primary and backup components of the production process enables a well-founded approach to the selection of the optimal redundancy structure. In the factory production of modular, prefabricated devices, various redundancy methods—structural and functional—are used to improve the reliability and stability of process flows [10]. These principles can be effectively applied to the organization of construction processes. Significant potential for increased efficiency lies in improving the maintenance and repair (M&R) system. The traditional system of scheduled preventive maintenance, focused on standard service life, does not always take into account the actual technical condition of the machines and their operating intensity. An important area is improving the reliability of process equipment at the design stage and maintaining this reliability during operation [10]. This requires the development and implementation of diagnostic systems that enable a transition to condition-based maintenance.

An effective method for identifying and implementing potential redundancies is the use of computer simulation modeling, not only for individual components (excavators, dump trucks, and complexes), but also for the entire transport system [6]. Modeling allows for the evaluation of the efficiency and reliability of machines at any facility and the most accurate prediction of the completion times and costs of individual types of work, even at the design stage [5]. The Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences has developed a computer program, “Quarry Transport System,” aimed at solving the problems of optimizing excavator-dump truck complexes [6]. The use of such a universal research and optimization tool allows for significant results in substantiating rational equipment parameters for specific operating conditions and increasing the machine utilization rate through organizational and technological solutions [6]. Simulation modeling takes into account the impact of possible reactions to various situations arising during construction on the efficiency of the investment project being implemented [3]. For example, an algorithm for substantiating the efficiency of an investment project can be developed using the Monte Carlo method. To automate the design of resource-saving technology for the construction of buildings and structures, methodological and mathematical support is being developed using simulation and multifactor mathematical models [3]. An important condition for automating the calculation of technical and economic indicators is the creation of reference databases as a key component of technological processes. Researchers note that the volume of reference information for organizational and technological processes is comparable to the volume of reference information for construction machinery and equipment [3]. Without creating a reference database, it is virtually impossible to automate the calculation of technical and economic indicators for the relevant technological processes, whether excavation, concrete, or installation work.

To assess the reliability and service life of machines, researchers have created a database based on the results of in-kind tests of tamping and leveling machines, cranes, excavators, bulldozers, pipelayers, drilling rigs, and dredgers [5]. To validate the database values, two stages of verification are conducted: logical and mathematical, including verification of the sample’s normal distribution using the Pearson goodness-of-fit test [5].

The use of predictive analytics methods for forecasting the technical condition of machines deserves special attention. Analyzing equipment performance data collected through telematics systems allows for the identification of patterns that precede failures and timely maintenance

Table 1. Key organizational and technical reserves and methods for their implementation:

Reserve focus	Implementation Methods	Expected Effect
Fleet optimization	Development of resource-saving systems, consideration of organizational and technological reliability	Increased productivity, reduced downtime
Redundancy Structural and functional redundancy	Creation of reserve funds	Increased reliability, reduced losses from failures
Improved maintenance and repair	Condition-based maintenance, diagnostics	Increased periods between repairs, reduced unscheduled downtime
Computer modeling Simulation modeling	Monte Carlo method	Justified selection of parameters, forecasting deadlines and costs
Information support	Creation of reference information databases, full-scale testing	Reliability of calculations, updating of standards

planning. The use of modern data analysis technologies to optimize operations is particularly relevant in the context of the digitalization of the construction industry. The proposed model for justifying machine operating time allows for the assessment of equipment efficiency and reliability, as well as the risk of completing the planned scope of work within the target timeframe [5].

The challenging operating conditions of construction companies, caused by crises and increased competition, require the exploration and mobilization of reserves in the field of construction mechanization [7]. Over the past decades, the technical equipment of the construction industry has declined, and the number of machines with expired service lives has increased, making the restoration and efficient use of construction equipment a pressing issue [7].

The primary strategic goal of developing and utilizing technical potential is to ensure the necessary technological advancement not only for individual organizations, but also for the regional and national construction industry as a whole [7]. An integral part of the strategy for developing and utilizing technical potential is the organizational and economic mechanisms that implement it, which together constitute a strategic management system. The practical implementation of developed strategic decisions requires the phased implementation of organizational, technological, and marketing measures, as well as the specification and concretization of proposed activities [7].

The economic component is crucial in utilizing potential for improving production efficiency. This means that all identified and utilized potential has a specific effect, which must be determined and summarized across all measures taken to implement it [1]. Researchers note that the use of high-performance construction machinery and mechanisms enables higher rates of process intensification. However, this leads to additional costs, both in labor and material resources, which affects the increase in the cost of construction products [2]. Identifying and studying reserves for intensifying technological processes and developing measures for their application are aimed at ensuring the reduction of additional costs while choosing rational solutions [2].

Organizational and technical reserves for improving the efficiency of construction production using machines and mechanisms represent significant potential for the development of construction organizations. Realizing this potential requires an integrated approach, including: optimization of the structure of the machine and mechanism fleet based on organizational and technological reliability and the formation of resource-saving systems; the use of redundancy methods to increase the reliability of construction systems and reduce losses from failures Implementation of modern methods for organizing technical maintenance and repairs, including condition-based

maintenance; the use of computer simulation modeling to validate rational equipment parameters and forecast work schedules and costs; creation and updating of reference databases based on field tests; digitalization of mechanized work management and the use of predictive analytics; strategic planning for the development of technical potential, taking into account the economic efficiency of proposed solutions.

Scientific research and practical experience confirm that systematic work to identify and utilize organizational and technical reserves can significantly increase labor productivity, reduce operating costs, and ensure the stability of production processes. In today's economic environment, these factors are becoming key to maintaining the competitiveness and sustainable development of construction organizations. Further research in this area should be aimed at developing industry-specific reserve assessment methods, adapting simulation modeling and machine learning methods to the challenges of construction production, and creating standard solutions for automating the management of mechanized work for enterprises of various sizes.

References

1. Савин, И.М. Организационно-технические резервы повышения результативности строительного производства / И.М. Савин, И.Л. Абрамов // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № 6. – EDN: LAZZVS.
2. Михайлова, Е.В. Искусственный интеллект как новая строка развития в строительстве / Е.В. Михайлова, И.М. Савин // Дни студенческой науки: сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института промышленного и гражданского строительства. – М., 2023. – С. 587–589. – ISBN: 978-5-7264-3218-2.
3. Савин, И.М. Некоторые особенности эффективности применения искусственного интеллекта в сметах (на примере оптимизации календарных графиков) / И.М. Савин // OpenScience. – 2022. – Т. 4. – № 1. – С. 75–82. – DOI: 10.51632/2658-7939_2022_4_1_75. – EDN: RHEIMR.
4. Мурадов, А.Н. Некоторые особенности оптимизации календарных графиков в модульном строительстве / А.Н. Мурадов, И.М. Савин // Наука и культура: поиски и открытия : материалы XV Международной научно-практической конференции. – Балашиха, 2022. – С. 110–113. – EDN: GIMLNS.
5. Макеева, Т.Ю. Некоторые особенности оптимизации затрат в возведении зданий и сооружений / Т.Ю. Макеева, И.М. Савин // Актуальные проблемы экономики, финансов и образования в условиях цифровизации : материалы национальной межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Балашиха, 2022. – С. 161–165. – EDN: NTYBLC.
6. Савин, И.М. Оптимизация экономически выгодной стратегии в современных условиях в строительной отрасли / И.М. Савин, М.В. Савин, А.А. Мариничев // OpenScience. – 2022. – Т. 4. – № 3. – С. 24–32. – DOI: 10.51632/2658-7939_2022_4_3_24. – EDN: ILMLQK.
7. Савин, И.М. Разработка календарного плана в условиях ограниченных ресурсов / И.М. Савин, Е.М. Михайлова // Наука и культура: поиски и открытия : материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Балашиха, 2021. – С. 153–159. – EDN: UCVPBG.

References

1. Savin, I.M. Organizacionno-tekhnicheskie rezervy povysheniya rezul'tativnosti stroitel'nogo

производства / I.M. Savin, I.L. Abramov // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2024. – T. 16. – № 6. – EDN: LAZZVS.

2. Mihajlova, E.V. Iskusstvennyj intellekt kak novaya stroka razvitiya v stroitel'stve / E.V. Mihajlova, I.M. Savin // Dni studencheskoj nauki: sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoj konferencii po itogam nauchno-issledovatel'skih rabot studentov instituta promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva. – M., 2023. – S. 587–589. – ISBN: 978-5-7264-3218-2.

3. Savin, I.M. Nekotorye osobennosti effektivnosti primeneniya iskusstvennogo intellekta v smetah (na primere optimizacii kalendarnyh grafikov) / I.M. Savin // OpenScience. – 2022. – T. 4. – № 1. – S. 75–82. – DOI: 10.51632/2658-7939_2022_4_1_75. – EDN: RHEIMR.

4. Muradov, A.N. Nekotorye osobennosti optimizacii kalendarnyh grafikov v modul'nom stroitel'stve / A.N. Muradov, I.M. Savin // Nauka i kul'tura: poiski i otkrytiya : materialy HV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Balashiha, 2022. – S. 110–113. – EDN: GIMLNS.

5. Makeeva, T.YU. Nekotorye osobennosti optimizacii zatrat v vozvedenii zdaniy i sooruzhenij / T.YU. Makeeva, I.M. Savin // Aktual'nye problemy ekonomiki, finansov i obrazovaniya v usloviyah cifrovizacii : materialy nacional'noj mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. – Balashiha, 2022. – S. 161–165. – EDN: NTYBLC.

6. Savin, I.M. Optimizaciya ekonomicheskij vygodnoj strategii v sovremennykh usloviyah v stroitel'noj otrasli / I.M. Savin, M.V. Savin, A.A. Marinichev // OpenScience. – 2022. – T. 4. – № 3. – S. 24–32. – DOI: 10.51632/2658-7939_2022_4_3_24. – EDN: ILMLQK.

7. Savin, I.M. Razrabotka kalendarnogo plana v usloviyah ogranichennykh resursov / I.M. Savin, E.M. Mihajlova // Nauka i kul'tura: poiski i otkrytiya : materialy HIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Balashiha, 2021. – S. 153–159. – EDN: UCVPBG.

**Организационно технических резервы
повышения результативности строительного производства
с использованием машин и механизмов**

И.М. Савин, И.Л. Абрамов

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет»,
г. Москва (Россия)*

Ключевые слова и фразы: имитационное моделирование; оптимизация парка машин; организационно-технические резервы; организационно-технологическая надежность; предиктивная аналитика; резервирование; строительная техника; техническое обслуживание и ремонт; цифровизация управления; эффективность производства.

Аннотация. В статье рассматриваются организационно-технические резервы повышения эффективности строительного производства за счет оптимизации использования машин и механизмов. Анализируются современные подходы к формированию парков строительной техники, методы технико-экономической оценки эффективности машин, а также инновационные направления автоматизации и цифровизации строительных процессов. Особое внимание уделяется практическим аспектам внедрения систем мониторинга, имитационного моделирования, резервирования и предиктивной аналитики, позволяющих существенно повысить производительность и снизить эксплуатационные затраты. Обосновы-

вадается необходимость комплексного подхода к реализации организационно-технических резервов, включающего оптимизацию структуры парка техники, совершенствование системы технического обслуживания и ремонта, применение методов резервирования, компьютерного моделирования и цифровизацию управления механизированными работами. Представлены результаты анализа научных исследований и практического опыта, подтверждающие возможность повышения производительности труда при системной работе по выявлению и использованию рассматриваемых резервов.

© I.M. Savin, I.L. Abramov, 2026

УДК 656.4.05

Design of an Adjustable Support Device for Maintenance of Metro Cars

Xiao Shuxin, N.R. Turkina

*Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov,
St. Petersburg (Russia)*

Key words and phrases: maintenance of metro cars; operation and maintenance system; ergonomics; simple support device; vibration and noise reduction; industrial maintenance.

Abstract. This article analyzes the problems in the maintenance process of the Chinese subway. The purpose of the work is to describe the structure designed by the authors of the article for carrying out maintenance work on subway cars. The authors solved the problem of optimizing the design of a simple support device. The proposed transport device is aimed at increasing the mechanization of the production process, namely, increasing the convenience of movement, simplifying work operations. The practical value of this research lies in the development of an optimized safety design at metro rolling stock manufacturing and repair facilities in the field of occupational safety in the Chinese subway and around the world.

Introduction

Due to the acceleration of urbanization in China, the metro, as a key element of urban transport, is actively expanding its network and scale of operation – today the metro operates in more than 50 cities of the People's Republic of China, the total length of operated lines exceeds 15 thousand kilometers, and the daily passenger traffic exceeds one billion people [1; 2]. However, the expansion of the metro network has led to an increase in the complexity and danger of production and repair work, as well as serious problems in the field of labor protection: the frequency of occupational diseases among personnel (related to noise, prolonged body tilt) remains high, and cases of injuries during work related to poor-quality fastening and non-compliance with working conditions continue to occur. Research shows that modern maintenance and safety management in the metro faces serious challenges, such as unwise design of the work environment, insufficient equipment protection, irregular production technologies, and an imperfect management system. These problems are related to outdated security design concepts, insufficient use of modern technologies, and imperfect management mechanisms. Production and maintenance of metro cars include welding, installation and other work that is accompanied by unfavorable conditions (high temperature, strong noise, dust), which threatens the health of employees and requires a serious approach to labor protection [3; 4]. In this work, protective equipment (including adjustable height,

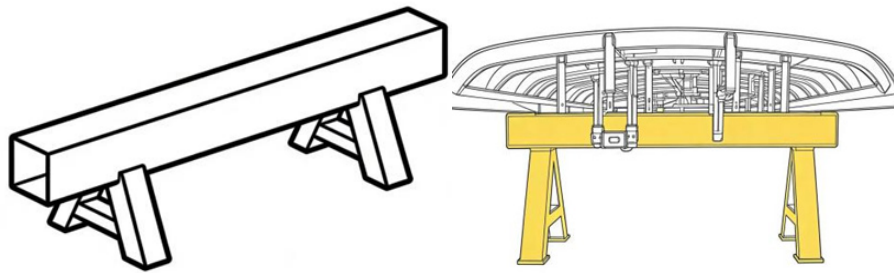


Fig. 1. Traditional simple type A support device

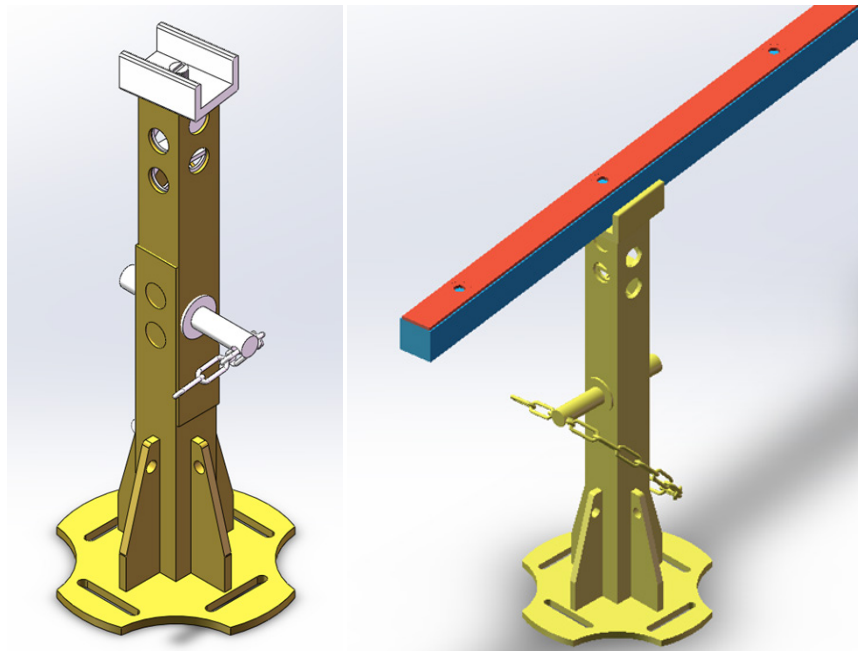


Fig. 2. Universal adjustable support device

reliable fastening, anti-slip elements) is optimized in order to reduce risks, prevent occupational diseases and injuries, and ensure the safety and reliability of the metro.

Problems of ensuring metro safety

In this study, based on the theory of ergonomics and the theory of system safety, a new design of a support device for servicing metro cars is proposed, which ensures labor safety in railway transport. As shown in Fig. 1, an ordinary simple type A support device has a number of significant disadvantages: its triangular legs have a small contact area with the working surface, which often leads to equipment tipping or shifting, while there are no elements in the structure to prevent sliding and tipping; in addition, its height is usually fixed, therefore, it is not suitable for maintenance of metro sections with different heights, and also does not meet ergonomic requirements – it does not provide a comfortable working space for the operator, forcing him to take the wrong working positions. For example, constant forward leaning, which over time causes fatigue and leads to occupational diseases of the musculoskeletal system [5].



Fig. 3. Application of a universal adjustable support device

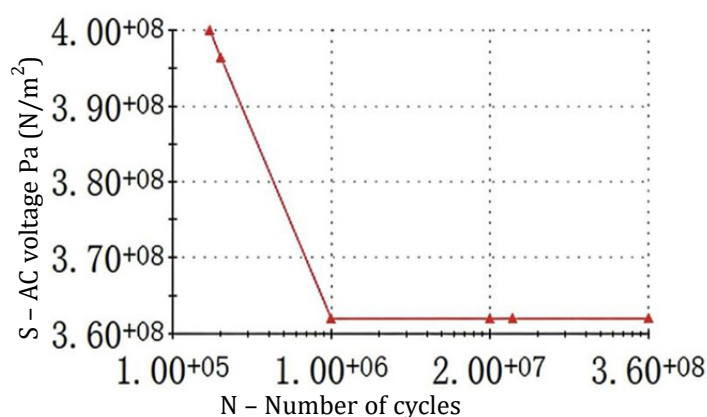


Fig. 4. Analysis of the S-N curve

Equipment optimization and design principles

Based on the traditional simple type A support device, we have optimized and upgraded it to a universal adjustable support device, taking into account modern production needs to meet the requirements of various operations, as shown in Fig. 2.

When designing new equipment, we provide height adjustment by making internal and external holes in the internal and external columns and using pins to fix their position [7].

In the frame of the support base, thin holes are created that interact with the built-in mounting slots of the I-beams of the production line. This ensures the stability of universal adjustable support and prevents it from tipping over.

Horizontal adjustment to any size allows you to process and store parts of various sizes by adjusting the width. The red area on the surface is a nylon pad that effectively prevents slipping and absorbs noise (Fig. 2).

As shown in Fig. 3, the design allows you to save materials, reduce economic costs, effectively use production space, optimize the technical layout, reduce labor costs and contribute to an efficient, stable and safe organization of production at enterprises.

Based on the analysis of the S-N curve shown in Fig. 4, it was found that the fatigue life of the

device reaches 1.4 million cycles, which significantly exceeds the requirements of normal operating conditions, and it works safely and stably, having a long service life [7; 8].

Conclusion

This study focuses on key issues of labor protection at all stages of production and maintenance of metro cars. This allows you to systematically prevent and manage safety risks at all stages of production (from the start of production to the production line) and throughout the entire life cycle (after production– transportation and storage) and also provides a practical reference model for research in the field of mechanical engineering and equipment design taking into account safety requirements.

The presented results show that the optimization of equipment allows overcoming the limitation of traditional safety management – previously, production and maintenance paid attention only to physical safety in the workplace, but this was not enough. If you combine vibration and noise reduction technologies with safety measures, it is possible to eliminate the risks of occupational diseases immediately upon occurrence, as well as create a modern working environment where there will be both safety and comfort [9, 10].

Metro systems in China and Russia, despite their differences and cultural peculiarities, have a number of similar problems, and these problems, according to the authors of the article, are primarily associated with outdated design concepts in the field of safety, insufficient use of modern technologies and imperfect control mechanisms. When optimizing technological processes and developing the design of the support device, the authors adhered to the principle of “safety first, production second”. In addition, the integration of ergonomics requirements into existing operational standards helps to further reduce the likelihood of occupational diseases in employees.

Currently, the authors of this paper are applying for patents for a utility model and industrial design of a universal adjustable support device for metro maintenance.

References

1. Ли, Х.Ю. Исследование технологии оценки надежности и принятия решений по техническому обслуживанию метрополитенов / Х.Ю. Ли // Инженерия оборудования Китая. – 2023. – № 15. – С. 50–52.
2. Жэнь, Ч.Г. Исследование и обсуждение системы и режима технического обслуживания метрополитенов / Жэнь Ч.Г. // Инженерия оборудования Китая. – 2023. – № 4. – С. 42–43.
3. Yu, H.Y. Statistical analysis of metro construction accidents during the construction period / H.Y. Yu, Y.L. Peng, L.Y. Zhang, et al. // Chinese Journal of Underground Space and Engineering. – 2019. – Vol. 15(Suppl. 2). – P. 852–860.
4. Министерство жилищно-коммунального хозяйства и городского развития Китайской Народной Республики. Технические правила по проектированию систем технической защиты общественной безопасности городского железнодорожного транспорта (Утверждено приказом Минстроя Китая № 115 от 2024 г.).
5. Zhang, L.J. Influence of polygonal wear of metro elastic wheels on wheel-rail forces and its suppression measures / L.J. Zhang, W.J. Wang, J.Q. Li // Journal of Mechanical Engineering. – 2024. – Vol. 60(11). – P. 156–165.
6. Чжан Цзыян. Исследование, разработка и применение стопора для колес метрополитена / Цзыян Чжан, Шусинь Сяо, Н.Р. Туркина, Цзигуан Вэй // Журнал инженерной механики и машиноведения. – 2024. – ISSN 2371-9125.

7. Шусинь, С. Оценка и снижение шума вагонов метрополитена в КНР / С. Шусинь // Молодежь. Техника. Космос : XVII Международная молодежная научно-техническая конференция, приуроченная к 150-летию со дня основания Ремесленного училища цесаревича Николая. – СПб., 2025. – С. 125–128.

8. Чжуан Хэ. Стратегии высококачественного развития железнодорожных грузовых перевозок / Чжуан Хэ // Железнодорожный транспорт и экономика. – 2022. – Т. 44. – № 1. – С. 1–6.

9. Сю Хун. Анализ факторов, влияющих на железнодорожные грузовые перевозки, на основе модели серого корреляционного анализа / Сю Хун, Цинь Эньлай, Чжан Ятин // Хэйлунцзянские научные исследования транспорта. – 2023. – Т. 46. – № 6. – С. 170–173.

10. Син, Ш. Моделирование интерферометрических шумозащитных экранов железнодорожного транспорта Китая / Ш. Син, Н.Р. Туркина, М. Го // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 12(132). – EDN MRURPS.

References

1. Li, H.YU. Issledovanie tekhnologii ocenki nadezhnosti i prinyatiya reshenij po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu metropolitenov / H.YU. Li // Inzheneriya oborudovaniya Kitaya. – 2023. – № 15. – S. 50–52.

2. ZHen', CH.G. Issledovanie i obsuzhdenie sistemy i rezhima tekhnicheskogo obsluzhivaniya metropolitenov / ZHen' CH.G. // Inzheneriya oborudovaniya Kitaya. – 2023. – № 4. – S. 42–43.

4. Ministerstvo zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva i gorodskogo razvitiya Kitajskoj Narodnoj Respubliki. Tekhnicheskie pravila po proektirovaniyu sistem tekhnicheskoy zashchity obshchestvennoj bezopasnosti gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta (Utverzhdeno prikazom Ministroya Kitaya № 115 ot 2024 g.).

6. CHzhan Czyyan. Issledovanie, razrabotka i primeneniye stopora dlya koles metropolitenov / Czyyan CHzhan, SHusin' Syao, N.R. Turkina, Cziguan Vej // ZHurnal inzhenernoj mekhaniki i mashinovedeniya. – 2024. – ISSN 2371-9125.

7. SHusin', S. Ocenka i snizheniye shuma vagonov metropolitenov v KNR / S. SHusin' // Molodezh'. Tekhnika. Kosmos : XVII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya, priurochennaya k 150-letiyu so dnya osnovaniya Remeslennogo uchilishcha cesarevicha Nikolaya. – SPb., 2025. – S. 125–128.

8. CHzhuan He. Strategii vysokokachestvennogo razvitiya zheleznodorozhnyh грузовых перевозок / CHzhuan He // Zheleznodorozhnyj transport i ekonomika. – 2022. – Т. 44. – № 1. – S. 1–6.

9. Syu Hun. Analiz faktorov, vliyayushchih na zheleznodorozhnye грузовые перевозки, na osnove modeli serogo korrelyacionnogo analiza / Syu Hun, Cin' En'laj, CHzhan YAtin // Hejlunczyanskie nauchnye issledovaniya transporta. – 2023. – Т. 46. – № 6. – S. 170–173.

10. Sin, SH. Modelirovaniye interferometricheskikh shumozashchitnyh ekranov zheleznodorozhnogo transporta Kitaya / SH. Sin, N.R. Turkina, M. Go // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2025. – № 12(132). – EDN MRURPS.

**Проектирование регулируемого опорного устройства
для технического обслуживания вагонов метрополитена**

Сяо Шусинь, Н.Р. Туркина

*ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
имени Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург (Россия)*

Ключевые слова и фразы: производственное техническое обслуживание; простое опорное устройство; система эксплуатации и технического обслуживания; снижение вибрации и шума; техническое обслуживание вагонов метрополитена; эргономика.

Аннотация. Анализируются проблемы в процессе технического обслуживания китайского метрополитена. Цель работы – дать описание спроектированной авторами статьи конструкции для проведения работ по техническому обслуживанию вагонов метрополитена. Авторами решена задача по оптимизации конструкции простого опорного устройства, предлагаемое транспортное устройство направлено на повышение механизации производственного процесса, а именно повышения удобства перемещения, упрощения рабочих операций. Практическая ценность этого исследования заключается в разработке оптимизированной конструкции по обеспечению безопасности на предприятиях по изготовлению и ремонту подвижного состава метрополитена в области безопасности труда в метрополитене Китая и во всем мире.

© Xiao Shuxin, N.R. Turkina, 2026

УДК 339.9:622.32(533.3)

External Economic Factors in Yemen's Energy Sector Crisis: A Regional and Global Trade Perspective

H.M.H. Al-Eryani, S.B. Zaynullin

*Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba,
Moscow (Russia)*

Key words and phrases: blockade; energy crisis; global trade relations; LNG; maritime trade; regional economy; Yemen.

Abstract. The article examines external, regional, and global trade factors shaping the depth and duration of Yemen's energy sector crisis. The purpose of the study is to assess the influence of external trade factors on Yemen's energy sector crisis and determine their role in constraining the country's post-conflict recovery prospects. The tasks are to analyze the consequences of Red Sea shipping disruption for Yemen's maritime trade; to assess competitive pressure on Yemen's LNG sector from regional Gulf producers; to examine the degree of Yemen's integration into regional energy infrastructure; to study the impact of international sanctions regimes. The hypothesis assumes that external trade factors, including maritime blockade, regional LNG market competition, and sanctions regimes, actively amplify the consequences of the domestic conflict, converting a temporary export crisis into a structurally entrenched collapse. Methods include analysis of UNCTAD trade statistics, GECF and World Bank reports; comparative analysis of Somalia and Libya cases. The findings demonstrate that Yemen's maritime routes through Bab-el-Mandeb are disrupted by more than 70 %; Yemen's share of the Gulf LNG market has fallen to zero amid new Qatari capacity additions of 48 million tonnes per year; regional energy network integration is absent. It is concluded that measures to restore maritime security, market integration, and financial compliance must be incorporated into Yemen's post-conflict energy sector recovery strategy.

Introduction

Existing research on Yemen's energy sector crisis has focused overwhelmingly on internal causes: civil conflict, governance failure, institutional collapse, leaving the role of external, regional, and global trade factors under examined. Yemen's position astride the Bab-el-Mandeb strait embeds

its energy trade in a wider global system, a relevance that has grown since late 2023, when Houthi attacks on shipping triggered a rerouting of trade around the Cape of Good Hope, continue expanding capacity and securing long-term Asian contracts (GECF, 2024). The central hypothesis is that external trade and security factors function as an active amplifying mechanism that converts domestic conflict into a structurally locked-in export collapse.

Literature Review

The economic geography of maritime chokepoints is well studied for Hormuz and Suez, but Bab-el-Mandeb, through which 8.8 million barrels of oil equivalent passed daily before 2023 (EIA, 2024), has received less attention. UNCTAD (2024) documents that Red Sea shipping volumes fell over 70% in early 2024, adding 10–14 days and significant cost to Asia-Europe voyages. GECF's 2024 Global Gas Outlook projects Gulf LNG capacity additions of over 48 million tonnes per annum by 2030, led by Qatar, directly competing for the Asian buyer base any restored Yemeni LNG sector would need.

The World Bank's MENA Economic Update (2024) shows energy market integration has historically supported faster post-conflict recovery, yet Yemen remains almost entirely outside GCC integration initiatives. Russian-language scholarship offers relevant grounding: Sadovskaya and Shmat (2017) show resource dependence interacts with institutional quality to produce divergent growth outcomes; Al-Selwi (2024) documents Yemen's recovery potential obstructed by economic and political barriers; Shmeleva (2019) traces Bab-el-Mandeb's and Balhaf's role in the conflict. Somalia's parallel exclusion from East African energy networks (African Development Bank, 2023) illustrates a comparable dynamic.

Research Methodology

This study applies a comparative trade-economics methodology, drawing on international trade and shipping statistics rather than the country-specific fiscal and production data dominating existing Yemen-focused research, since the questions concern Yemen's position within external trade systems. Primary data sources include UNCTAD's Review of Maritime Transport (2024), the EIA's World Oil Transit Chokepoints report (2024), the Gas Exporting Countries Forum's Global Gas Outlook (2024), the World Bank's MENA Economic Update (2024), and the African Development Bank's regional energy reports (2023) for the Somalia comparative case. A structured comparative case method (Yin, 2018) situates Yemen against Somalia and Libya as analytically comparable cases of conflict-driven exclusion from regional energy trade systems.

Results and Discussion

The Red Sea disruption and its compounding effect

The Houthi campaign against commercial shipping since late 2023 produced a maritime disruption whose scale rivals direct domestic war costs. UNCTAD (2024) documents container transits through Suez–Red Sea falling approximately 70 % in early 2024, adding 10–14 days of transit time and raising insurance premiums (EIA, 2024).

Regional LNG market competition and the closing window

GECF's 2024 Global Gas Outlook documents an unprecedented wave of Gulf LNG expansion, led by Qatar's North Field projects, adding approximately 48 million tonnes per annum by 2030 (GECF, 2024) – directly where a restored Yemeni LNG sector would seek to compete.

Table 1. Indicators of maritime trade disruption in the Red Sea / Bab-el-Mandeb (2023–2025)

Indicator	Pre-disruption (2023)	Post-disruption (2024–25)	Change
Suez/Red Sea transit volume, TEU index	100 (baseline)	~30	–70 %
Asia-Europe transit time, days	26–30	36–44	+10–14 days
War-risk insurance premium, % of vessel value	0.1–0.2 %	0.5–1.0 %	+3–5x
Oil/LNG transit through Bab-el-Mandeb, thousand bbl/day	~8,800	~4,000–5,000	–45...–55 %

Table 2. Gulf LNG capacity additions and Yemen's market position (2024–2030, forecast)

Country	2024 LNG Capacity (Mtpa)	Addition by 2030 (Mtpa)	Yemen's Market Share
Qatar	77	+48	0 %
UAE	6	+9.6	0 %
Oman	11	+4	0 %
Yemen (Balhaf, mothballed)	0 (since 2015)	–	0 %

Even in an optimistic scenario where Yemen restores Balhaf operations within five years, it would enter an Asian LNG market already substantially served by 48+ million tonnes of new Gulf supply under long-term contracts.

Institutional barriers and recovery strategy

Yemen has not been incorporated into regional energy integration initiatives that supported faster recovery elsewhere in MENA (World Bank MENA Economic Update, 2024) – a dynamic paralleled by Somalia's exclusion from East African energy networks (African Development Bank, 2023). International banks have also become risk-averse toward Houthi-controlled territory given targeted sanctions since 2024 (OFAC, 2024). A comprehensive recovery framework must address maritime security, market entry strategy, regional integration diplomacy, and banking compliance – alongside domestic political settlement.

Conclusion

This article has examined Yemen's energy sector crisis through an external, regional, and global trade lens largely absent from existing literature. The post-2023 Red Sea disruption has raised the cost of Yemen-origin maritime trade (transit volumes – 70 %); the Gulf LNG expansion (48+ million tonnes per annum by 2030) is narrowing Yemen's commercial window; its absence from regional integration removes a recovery pathway available elsewhere; and sanctions compliance adds a financing barrier additive to physical and political ones. The hypothesis is confirmed: external trade and security factors actively amplify domestic conflict into a deeper export collapse.

References

1. Аль-Сельви, М. Анализ состояния нефтегазового сектора Йеменской Республики

- и перспективы его восстановления / М. Аль-Сельви // Экономические системы. – 2024. – Т. 17. – № 2. – С. 172–181. – DOI: 10.29030/2309-2076-2024-17-2-172-181. – EDN: NYRAHQ.
2. Африканский банк развития. Обзор региональной энергетики Восточной Африки. – Абиджан : АБР, 2023.
3. Всемирный банк. Экономический обзор региона Ближнего Востока и Северной Африки: региональная интеграция и энергетические рынки. – Вашингтон : БВ, 2024.
4. Гермек, В.В. Критериальный анализ применения искусственного интеллекта в строительном производстве России / В.В. Гермек, Р.О. Самсонов // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 1(103). – С. 38–46. – EDN: NUJQUB.
5. Садовская, В.О. Парадокс “ресурсного проклятия”: межстрановой анализ / В.О. Садовская, В.В. Шмат // Мировая экономика и международные отношения. – 2017. – Т. 61. – № 3. – С. 25–35. – DOI: 10.20542/0131-2227-2017-61-3-25-35. – EDN: YLNPVP.
6. Управление по контролю за иностранными активами (УКИА). Обновления санкционного списка по Йемену. – Вашингтон : Министерство финансов США, 2024.
7. Форум стран-экспортеров газа. Глобальный газовый прогноз до 2050 г. – Доха : ФСЭГ, 2024.
8. Шмелева, Т. Фактор нефтегазовых ресурсов в йеменском конфликте / Т. Шмелева // Российский совет по международным делам (РСМД). – 21 мая 2019.
9. Энергетическое информационное агентство США. Мировые узкие места морских нефтеперевозок. – Вашингтон : ЭИА, 2024.
10. ЮНКТАД. Обзор морского транспорта 2024. – Женева : ООН, 2024.
11. Ин, Р.К. Исследование методом кейс-стади: дизайн и методы : 6-е изд. / Р.К. Ин. – SAGE Publications, 2018.

References

1. Al-Selvi, M. Analiz sostoyaniya neftegazovogo sektora Jemenskoj Respubliki i perspektivy ego vosstanovleniya / M. Al-Selvi // Ekonomicheskie sistemy. – 2024. – Т. 17. – № 2. – С. 172–181. – DOI: 10.29030/2309-2076-2024-17-2-172-181. – EDN: NYRAHQ.
2. Afrikanskij bank razvitiya. Obzor regionalnoj energetiki Vostochnoj Afriki. – Abidzhan : ABR, 2023.
3. Vsemirnij bank. Ekonomicheskij obzor regiona Blizhnego Vostoka i Severnoj Afriki: regionalnaya integratsiya i energeticheskie rynki. – Vashington : VB, 2024.
4. Germek, V.V. Kriterialnij analiz primeneniya iskusstvennogo intellekta v stroitelnom proizvodstve Rossii / V.V. Germek, R.O. Samsonov // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 1(103). – С. 38–46. – EDN: NUJQUB.
5. Sadovskaya, V.O. Paradoks “resursnogo proklyatiya”: mezhstranovoj analiz / V.O. Sadovskaya, V.V. SHmat // Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya. – 2017. – Т. 61. – № 3. – С. 25–35. – DOI: 10.20542/0131-2227-2017-61-3-25-35. – EDN: YLNPVP.
6. Upravlenie po kontrolyu za inostrannymi aktivami (UKIA). Obnovleniya sanktsionnogo spiska po Jemenu. – Vashington : Ministerstvo finansov SSHA, 2024.
7. Forum stran-eksporterov gaza. Globalnij gazovij prognoz do 2050 g. – Dokha : FSEG, 2024.
8. SHmeleva, T. Faktor neftegazovykh resursov v jemenskom konflikte / T. SHmeleva // Rossijskij soviet po mezhdunarodnym delam (RSMD). – 21 maya 2019.
9. Energeticheskoe informatsionnoe agentstvo SSHA. Mirovye uzkie mesta morskikh neftepervezok. – Vashington : EIA, 2024.
10. YUNKTAD. Obzor morskogo transporta 2024. – ZHeneva : OON, 2024.

11. In, R.K. Issledovanie metodom kejs-stadi: dizajn i metody : 6-e izd. / R.K. In. – SAGE Publications, 2018.

**Внешеэкономические факторы кризиса энергетического сектора Йемена:
региональный и мирохозяйственный аспект**

Х.М.Х. Аль-Иряни, С.Б. Зайнуллин

*ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»,
г. Москва (Россия)*

Ключевые слова и фразы: блокада; Йемен; мирохозяйственные связи; морская торговля; региональная экономика; СПГ; энергетический кризис.

Аннотация. В статье рассматриваются внешние, региональные и мирохозяйственные факторы, формирующие глубину и продолжительность кризиса энергетического сектора Йемена. Цель исследования – оценить влияние внешних мирохозяйственных факторов на кризис энергетического сектора Йемена и определить их роль в ограничении перспектив постконфликтного восстановления страны. Задачи: проанализировать последствия нарушения судоходства в Красном море; оценить конкурентное давление на йеменский СПГ-сектор; рассмотреть степень интеграции Йемена в региональную энергетическую инфраструктуру; изучить влияние санкционных режимов. Гипотеза: внешние мирохозяйственные факторы – морская блокада, региональная конкуренция за рынки СПГ и санкционные режимы – активно усиливают последствия внутреннего конфликта, превращая временный экспортный кризис в структурно закрепленный коллапс. Методы: анализ статистики ЮНКТАД, докладов ФСЭГ и Всемирного банка; сравнительный анализ случаев Сомали и Ливии. Результаты: морские маршруты Йемена через Баб-эль-Мандеб нарушены более чем на 70 %; доля Йемена на рынке СПГ Персидского залива сократилась до нуля на фоне ввода катарских мощностей в 48 млн тонн в год; региональная интеграция энергетических сетей отсутствует. Вывод: меры по восстановлению морской безопасности, рыночной интеграции и финансового комплаенса должны быть включены в стратегию постконфликтного восстановления энергетического сектора Йемена.

© Н.М.Н. Al-Eryani, S.B. Zaynullin, 2026

УДК 330.322.5:339.9

Инвестиционный климат и его влияние на международное сотрудничество

О.В. Воронкова, М. Саллум

*ФГБОУ ВО «Российский государственный
гидрометеорологический университет»,
г. Санкт-Петербург (Россия)*

Ключевые слова и фразы: инвестиционный климат; институциональная среда; международное сотрудничество; обобщенный метод моментов; панельные данные; пороговые эффекты; прямые иностранные инвестиции; регуляторные барьеры.

Аннотация. Цель исследования заключается в количественной оценке влияния компонентов инвестиционного климата на прямые иностранные инвестиции и различные формы международного сотрудничества.

В задачи исследования входили анализ институциональных и макроэкономических детерминант инвестиционной активности, оценка их воздействия на различные формы международного сотрудничества, выявление пороговых эффектов административной эффективности, а также сопоставление влияния факторов инвестиционного климата на прямые инвестиции и совместные предприятия.

Гипотеза исследования состоит в предположении, что институциональные факторы оказывают более существенное влияние на международную инвестиционную кооперацию, чем макроэкономические показатели.

Методологическую основу исследования составил обобщенный метод моментов (GMM), примененный к панельным данным 47 стран за 2013–2025 гг. Для выявления нелинейных эффектов использовался пороговый подход Хансена, а для анализа причинно-следственных связей – векторная модель коррекции ошибок и тесты Грейнджера.

В результате исследования установлено преобладание институциональных факторов над макроэкономическими при объяснении межстрановой вариации прямых иностранных инвестиций. Наибольшее влияние продемонстрировали показатели защиты прав собственности и верховенства закона. Выявлен пороговый эффект административной эффективности: достижение определенного уровня качества институтов сопровождается непропор-

циональным ростом инвестиционной активности, снижением транзакционных издержек и увеличением числа международных совместных предприятий. Научная новизна исследования заключается в декомпозиции инвестиционного климата на отдельные компоненты и выявлении их неодинакового влияния на различные формы международного сотрудничества.

Трансформация глобальных производственных цепочек и фрагментация мирового экономического пространства актуализируют пересмотр детерминант, опосредующих выбор локации для размещения капитала. Классические модели, восходящие к парадигме Данинга, связывали мотивацию иностранного инвестора преимущественно с ресурсной обеспеченностью, емкостью рынка сбыта и стоимостью факторов производства. Эмпирические данные последнего десятилетия указывают на смещение акцентов в сторону качественных характеристик среды – предсказуемости регуляторного поля, транспарентности судопроизводства, стабильности налогового законодательства [1; 2].

Тем не менее дискуссионным остается вопрос о сравнительной значимости формальных институтов и макрофинансовых показателей применительно к разным типам международной кооперации – от создания филиалов до заключения стратегических альянсов без образования юридического лица в юрисдикции реципиента.

Работы, опубликованные в последние годы, фиксируют неоднородность эффектов. Так, исследования на материалах развивающихся рынков демонстрируют повышенную чувствительность инвесторов к защите миноритарных акционеров и уровню коррупционного давления [3; 4]. Напротив, при анализе выборки стран ОЭСР первостепенное значение приобретают налоговые стимулы и издержки администрирования [5].

Обнаруживается методологический разрыв: многие эмпирические модели оперируют агрегированными индексами, теряя специфику отдельных компонент, либо ограничиваются статическими регрессиями, игнорируя эндогенность и обратную каузальность [6; 7].

Цель настоящей работы – дифференцированная оценка влияния компонентов инвестиционного климата на параметры международного сотрудничества с устранением смещений, порождаемых двусторонней причинностью и пропущенными переменными.

Для достижения цели последовательно решались задачи построения многофакторной динамической модели на панельных данных, тестирования гипотезы о наличии пороговых уровней институционального качества, после преодоления которых интенсивность кооперации возрастает непропорционально, а также сопоставления эластичностей для потоков капитала в реальный сектор и вложений в финансовые инструменты.

Эмпирическая база сформирована по 47 государствам, классифицируемым Всемирным банком как страны со средним и высоким уровнем дохода, за временной интервал 2013–2025 гг. Выборка исключает офшорные юрисдикции и государства с экстремальной политической нестабильностью, способной исказить эконометрические оценки. Зависимая переменная – чистый приток прямых иностранных инвестиций в процентах к ВВП, извлекаемый из базы *UNCTAD*. Для тестирования робастности дополнительно вводится переменная интенсивности международных совместных предприятий, оцененная по количеству вновь зарегистрированных юридических лиц с иностранным участием на 1000 резидентов на основе данных национальных регистраторов, агрегированных в базе *LexisNexis*.

Независимые переменные сгруппированы в три блока. Первый охватывает институциональные индикаторы: индекс верховенства закона и индекс контроля коррупции из проекта

Worldwide Governance Indicators, а также индекс защиты прав собственности из ежегодника *Heritage Foundation*. Второй блок включает макроэкономические параметры: темп инфляции, волатильность обменного курса (стандартное отклонение дневных колебаний за год) и отношение государственного долга к ВВП. Третий блок представлен контрольными переменными: логарифм ВВП на душу населения, доля городского населения, обеспеченность природными ресурсами (рента от добычи сырья в процентах к ВВП).

Методологический каркас выстроен на динамической панельной регрессии, оцениваемой обобщенным методом моментов в системной спецификации по Ареллано – Боверу и Бланделлу – Бонду. Инструментами для эндогенных регрессоров служат лаги второго и более высоких порядков. Состоятельность оценок верифицирована тестом Саргана на сверхидентифицирующие ограничения и тестом Ареллано – Бонда на автокорреляцию остатков второго порядка. Для обнаружения пороговых эффектов применялся подход Хансена, позволяющий эндогенно определить точку переключения режима без навязывания априорной функциональной формы. Дополнительно специфицирована векторная модель коррекции ошибок для оценки краткосрочной и долгосрочной причинности по Грейнджеру между институциональными индикаторами и потоками капитала.

Оценки базовой спецификации демонстрируют, что вариация входящих прямых иностранных инвестиций (ПИИ) на 62 % объясняется совместной динамикой институциональных и макроэкономических факторов при контроле масштаба экономики. Предельный эффект индекса защиты прав собственности оказался наиболее выраженным: рост индикатора на одно стандартное отклонение сопряжен с повышением доли инвестиций в ВВП на 0,94 процентного пункта при фиксации прочих условий. Коэффициент при переменной верховенства закона составил 0,78 и значим на однопроцентном уровне, тогда как эластичность по индексу контроля коррупции достигла 0,53. Среди макроэкономических переменных наибольшее депрессивное воздействие зафиксировано у волатильности обменного курса (коэффициент $-0,41$), опережая по модулю вклад инфляционного фактора ($-0,22$). Отношение государственного долга к ВВП демонстрирует значимость лишь при превышении порога в 75 %, ниже которого связь статистически неотличима от нуля.

Тест Хансена идентифицировал пороговое значение для индекса верховенства закона на уровне 0,25 (стандартизированная шкала от $-2,5$ до $+2,5$). В подвыборке государств, превосходящих данный порог, эластичность ПИИ по приросту институционального качества возрастает более чем вдвое по сравнению со средним по выборке значением и достигает 0,41. Иными словами, улучшение правовой среды после прохождения определенного рубежа дает непропорционально высокую отдачу в терминах привлечения иностранного капитала.

Оценки для альтернативной зависимой переменной – количества совместных предприятий на душу населения – выявили смещение значимости в пользу показателей административной эффективности. Сокращение среднего времени регистрации нового бизнеса на один день ассоциируется с ростом числа международных партнерств на 3,2 % при прочих равных. В то же время налоговые ставки на прибыль корпораций оказывают статистически значимое, но экономически умеренное влияние (коэффициент эластичности $-0,18$), что согласуется с гипотезой о снижающейся роли фискальной конкуренции по мере возрастания значимости неналоговых институциональных преимуществ.

Результаты теста Грейнджера подтверждают однонаправленную причинность: улучшение институтов предшествует росту инвестиций с лагом в один-два года. Обратная связь – от притока капитала к качеству институтов – не детектируется на приемлемом уровне значимости, что позволяет трактовать институциональные реформы как экзогенный драйвер международной кооперации в рамках исследованного периода.

Выявленное доминирование индекса защиты прав собственности над финансовыми переменными соответствует выводам, представленным в работе Аджемоглу и соавторов о первостепенной роли инклюзивных институтов, но одновременно вносит уточнение, касающееся дифференциации эффектов по формам кооперации [8]. Полученные данные свидетельствуют, что для прямых инвестиций в основные фонды ключевым фактором служит защита от экспроприации и непредсказуемого изменения регулирования, тогда как для партнерских форм, предполагающих разделение контроля и прибыли, на передний план выходят операционные аспекты административного бремени. Данный результат развивает положения, выдвинутые в более ранних эмпирических исследованиях на примере стран Центральной и Восточной Европы [9], где приоритетность тех или иных компонент делового климата не была раскрыта с необходимой детализацией.

Фиксация порогового эффекта частично объясняет противоречия между работами, не обнаружившими значимой связи между институтами и ПИИ в группе наименее развитых стран, и исследованиями, констатирующими сильную положительную корреляцию на материале государств со средним доходом [10; 11]. По всей видимости, до пересечения определенного минимального уровня институциональной зрелости инвесторы не рассматривают юрисдикцию в качестве потенциальной площадки для долгосрочных проектов, ориентируясь исключительно на ресурсную ренту или доступ к дешевой рабочей силе. Преодоление порога переводит режим конкуренции за капитал из плоскости ценовых преимуществ в плоскость гарантий стабильности «правил игры».

Ограничения настоящего исследования связаны с агрегированием потоков ПИИ без разложения по секторам экономики и странам происхождения капитала. Инвесторы из различных правовых традиций могут проявлять неодинаковую чувствительность к отдельным параметрам среды, что заслуживает отдельного анализа с применением гравитационных моделей. Кроме того, временной горизонт 2013–2025 гг. охватывает период экстраординарных монетарных стимулов в развитых экономиках, искажающих глобальные потоки капитала; экстраполяция полученных коэффициентов на периоды нормализации денежно-кредитной политики требует осторожности.

Проведенный анализ позволил эмпирически обосновать декомпозицию понятия инвестиционного климата на независимые составляющие с неравной степенью влияния на международное экономическое сотрудничество. Показано, что институциональные характеристики, прежде всего защита прав собственности и верховенство закона, превосходят по значимости макроэкономические факторы при объяснении межстрановой вариации входящих прямых инвестиций. Обнаруженный пороговый эффект свидетельствует о нелинейном характере связи: государства, форсировавшие институциональные реформы и преодолевшие критический рубеж качества регуляторной среды, получают непропорционально большой выигрыш в виде интенсификации притока капитала и увеличения числа технологических партнерств. Новизна исследования заключается в одновременной оценке влияния компонентов инвестиционного климата на различные формы международной кооперации с устранением эндогенности, а также в эмпирической идентификации структурного сдвига в эластичности инвестиций по институциональным индикаторам. Дальнейшие изыскания целесообразно направить на анализ секторальной гетерогенности эффектов и изучение роли неформальных институтов, включая деловую этику и имплицитные контрактные нормы, в привлечении иностранного капитала.

Литература

1. Кудрин, А.Л. Бюджетная политика как источник экономического роста / А.Л. Кудрин,

А.Ю. Кнобель // Вопросы экономики. – 2017. – № 10. – С. 5–26. – DOI: 10.32609/0042-8736-2017-10-5-26. – EDN: ZIDOAT.

2. Норт, Д. Насилие и социальные порядки. Концептуальные рамки для интерпретации письменной истории человечества / Д. Норт, Дж. Уоллис, Б. Вайнгаст; пер. с англ. – М. : Изд-во Института Гайдара, 2011. – 478 с. – ISBN: 978-5-93255-303-9. – EDN: QOMGLZ.

3. Капелюшников, Р.И. Contra панинституционализм. Часть I / Р.И. Капелюшников // Вопросы экономики. – 2019. – № 7. – С. 119–146. – DOI: 10.32609/0042-8736-2019-7-119-146. – EDN: GOQTUS.

4. Globerman, S. Global foreign direct investment flows: The role of governance infrastructure / S. Globerman, D. Shapiro // World Development. – 2002. – Vol. 30. – No. 11. – P. 1899–1919.

5. Энтов, Р.М. Развитие российского финансового рынка и новые инструменты привлечения инвестиций : монография / Р.М. Энтов, А.Д. Радыгин, В.А. Мау, С.Г. Синельников-Мурылев, Г. Трофимов, Л. Анисимова, С. Архипов, С.М. Дробышевский, А.Б. Золотарева, О.В. Луговой, А.Е. Шадрин, Е. Шкребела. – М. : Институт экономики переходного периода, 1998. – 250 с. – EDN: TLDNNP.

6. Aizenman, J. Institutional efficiency, monitoring costs and the investment share of FDI / J. Aizenman, M.M. Spiegel // Review of International Economics. – 2006. – Vol. 14. – No. 4. – P. 683–697. – DOI: 10.1111/j.1467-9396.2006.00595.x.

7. Прилепский, И.В. Построение индикаторов макроэкономической неопределенности для России / И.В. Прилепский // Вопросы экономики. – 2022. – № 9. – С. 21–43. – DOI: 10.32609/0042-8736-2022-9-34-52. – EDN: GRWXTС.

8. Acemoglu, D. Institutions as a fundamental cause of long-run growth / D. Acemoglu, S. Johnson, J.A. Robinson // Handbook of Economic Growth. Vol. 1A / ed. by P. Aghion, S.N. Durlauf. – Amsterdam : Elsevier, 2005. – P. 385–472. – DOI: 10.1016/S1574-0684(05)01006-3.

9. Дробышевский, С.М. Взаимодействие потоков капитала и основных макроэкономических показателей в Российской Федерации : монография / С.М. Дробышевский, П.В. Трунин. – М. : ИЭПП, 2006. – 108 с. – (Научные труды № 94Р).

10. Busse, M. Political risk, institutions and foreign direct investment / M. Busse, C. Hefeker // European Journal of Political Economy. – 2007. – Vol. 23. – No. 2. – P. 397–415. – DOI: 10.1016/j.ejpolco.2006.02.003.

11. Аузан, А.А. Институциональная экономика : учебник; 2-е изд. / под ред. А.А. Аузана. – М. : ИНФРА-М, 2011. – 447 с.

References

1. Kudrin, A.L. Byudzhelnaya politika kak istochnik ekonomicheskogo rosta / A.L. Kudrin, A.YU. Knobel' // Voprosy ekonomiki. – 2017. – № 10. – С. 5–26. – DOI: 10.32609/0042-8736-2017-10-5-26. – EDN: ZIDOAT.

2. Nort, D. Nasilie i social'nye poryadki. Konceptual'nye ramki dlya interpretacii pis'mennoj istorii chelovechestva / D. Nort, Dzh. Uollis, B. Vajngast; per. s angl. – М. : Izd-vo Instituta Gajdara, 2011. – 478 s. – ISBN: 978-5-93255-303-9. – EDN: QOMGLZ.

3. Kapelyushnikov, R.I. Contra paninstitucionalizm. CHast' I / R.I. Kapelyushnikov // Voprosy ekonomiki. – 2019. – № 7. – С. 119–146. – DOI: 10.32609/0042-8736-2019-7-119-146. – EDN: GOQTUS.

5. Entov, R.M. Razvitie rossijskogo finansovogo rynka i novye instrumenty privlecheniya investicij : monografiya / R.M. Entov, A.D. Radygin, V.A. Mau, S.G. Sinel'nikov-Murylev, G. Trofimov, L. Anisimova, S. Arhipov, S.M. Drobyshevskij, A.B. Zolotareva, O.V. Lugovoj, A.E. SHadrin, E. SHkrebela. –

M. : Institut ekonomiki perekhodnogo perioda, 1998. – 250 s. – EDN: TLDNNP.

7. Prilepskij, I.V. Postroenie indikatorov makroekonomicheskoy neopredelennosti dlya Rossii / I.V. Prilepskij // Voprosy ekonomiki. – 2022. – № 9. – S. 21–43. – DOI: 10.32609/0042-8736-2022-9-34-52. – EDN: GRWXTTC.

9. Drobyshevskij, S.M. Vzaimodejstvie potokov kapitala i osnovnyh makroekonomicheskikh pokazatelej v Rossijskoj Federacii : monografiya / S.M. Drobyshevskij, P.V. Trunin. – M. : IEPP, 2006. – 108 s. – (Nauchnye trudy № 94R).

11. Auzan, A.A. Institucional'naya ekonomika : uchebnik; 2-e izd. / pod red. A.A. Auzana. – M. : INFRA-M, 2011. – 447 s.

Investment Climate and Its Impact on International Cooperation

O.V. Voronkova, M. Salloum

*Russian State Hydrometeorological University,
S. Petersburg (Russia)*

Key words and phrases: investment climate; foreign direct investment; institutional environment; international cooperation; panel data; generalized method of moments; threshold effects; regulatory barriers.

Abstract. The purpose of the study is to provide a quantitative assessment of the impact of investment climate components on foreign direct investment and various forms of international cooperation.

The objectives of the study included the analysis of institutional and macroeconomic determinants of investment activity, the assessment of their impact on different forms of international cooperation, the identification of threshold effects of administrative efficiency, as well as the comparison of the influence of investment climate factors on foreign direct investment and joint ventures.

The research hypothesis is that institutional factors exert a stronger influence on international investment cooperation than macroeconomic indicators.

The methodological framework of the study is based on the generalized method of moments (GMM) applied to panel data from 47 countries for the period 2013–2025. Hansen's threshold approach was used to identify nonlinear effects, while vector error correction models and Granger causality tests were employed to analyze causal relationships.

The results of the study demonstrate the predominance of institutional factors over macroeconomic variables in explaining cross-country variation in foreign direct investment inflows. The strongest effects were observed for property rights protection and rule of law indicators. A threshold effect of administrative efficiency was identified: once a certain level of institutional quality is achieved, transaction costs decrease nonlinearly, stimulating investment activity and increasing the number of international joint ventures. The scientific novelty of the study lies in the decomposition of the investment climate into separate components and the identification of their unequal impact on different forms of international cooperation.

© O.B. Воронкова, М. Саллум, 2026

List of Authors

Михеев В.С. – магистрант Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва (Россия), e-mail: vasya06052002@gmail.com

Mikheev V.S. – Master's Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow (Russia), e-mail: vasya06052002@gmail.com

Круглякова В.М. – доктор экономических наук, кандидат технических наук, почетный работник сферы образования Российской Федерации, профессор кафедры организации строительства и управления недвижимостью Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва (Россия), e-mail: vm_student@mail.com

Kruglyakova V.M. – Doctor of Economics, Candidate of Science (Engineering), Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Professor, Department of Construction Organization and Real Estate Management, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow (Russia), e-mail: vm_student@mail.com

Карпузова Н.Ю. – кандидат технических наук, доцент кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: karapuzova_ny@mail.ru

Karapuzova N.Yu. – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: karapuzova_ny@mail.ru

Хлыбов А.Д. – магистрант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: hlybovantongmail.com

Khlybov A.D. – Master's Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: leha.hlybovantongmail.com

Мимишев А.А. – аспирант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: sultanybray@gmail.com

Mimishev A.A. – Postgraduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: sultanybray@gmail.com

Усадский Д.Г. – кандидат технических наук, доцент кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: usadsky@list.ru

Usadsky D.G. – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: usadsky@list.ru

Зинкин И.В. – магистрант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: il.zinkin@mail.ru

Zinkin I.V. – Master's Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail:

il.zinkin@mail.ru

Фокин В.М. – доктор технических наук, профессор кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: vmfokin@bk.ru

Fokin V.M. – Doctor of Engineering, Professor, Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: vmfokin@bk.ru

Нестеренко С.В. – генеральный директор ООО «Волгограднефтепроект», г. Волгоград (Россия), e-mail: pto@vnp.ltd

Nesterenko S.V. – General Director, Volgogradnefteproekt LLC, Volgograd (Russia), e-mail: pto@vnp.ltd

Колесников Ф.А. – аспирант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: fedorkoles@icloud.com

Kolesnikov F.A. – Postgraduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: fedorkoles@icloud.com

Евстафьева Н.Ю. – кандидат технических наук, доцент кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: n16121976@yandex.ru

Evstafieva N.Yu. – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: n16121976@yandex.ru

Сриви Дамийа Али Кадим – ассистент преподавателя кафедры гражданского строительства Университета Диялы, г. Дияла (Ирак), e-mail: Dmia_Ali_eng@uodiyala.edu.iq

Srewi Dhamyaa Ali Kadhim – Teaching Assistant, Department of Civil Engineering, University of Diyala, Diyala (Iraq), e-mail: Dmia_Ali_eng@uodiyala.edu.iq

Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид – кандидат технических наук, доцент Департамента строительства и проектов Университета Диялы, г. Дияла (Ирак), e-mail: obaidiadam79@uodiyala.edu.iq

Obaidi Adham Abdulsattar Hameed – PhD, Associate Professor, Department of Construction and Projects, University of Diyala, Diyala (Iraq), e-mail: obaidiadam79@uodiyala.edu.iq

Фарах Фаак Таха – ассистент преподавателя кафедры гражданского строительства Университета Диялы, г. Дияла (Ирак), e-mail: Con.Mango.MSc.farah@uodiyala.edu.iq

Farah Faaq Taha – Teaching Assistant, Department of Civil Engineering, University of Diyala, Diyala (Iraq), e-mail: Con.Mango.MSc.farah@uodiyala.edu.iq

Исам Салим Мхаймид – ассистент преподавателя кафедры гражданского строительства Университета Диялы, г. Дияла (Ирак), e-mail: Isam_saleem_eng_civil@uodiyala.edu.iq

Isam Saleem Mhameed – Teaching Assistant, Department of Civil Engineering, University of Diyala, Diyala (Iraq), e-mail: Isam_saleem_eng_civil@uodiyala.edu.iq

Хубаев А.О. – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и организации строительного производства, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Конструкции, технологии и организация строительства» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва (Россия), e-mail: alan_khubaev@mail.ru

Khubaev A.O. – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Technologies and Organization of Construction Production, Leading Researcher of the Scientific and Educational Center “Structures, Technologies and Organization of Construction”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow (Russia), e-mail: alan_khubaev@mail.ru

Кирсанова А.М. – магистрант Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва (Россия), e-mail: A.kirsanova2002@gmail.com

Kirsanova A.M. – Master’s Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow (Russia), e-mail: A.kirsanova2002@gmail.com

Руденко А.А. – доктор экономических наук, профессор кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, г. Санкт-Петербург (Россия), e-mail: Laskutina2017@gmail.com

Rudenko A.A. – Doctor of Economics, Professor, Department of Construction Organization, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg (Russia), e-mail: Laskutina2017@gmail.com

Ласкутина О.С. – магистрант Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, г. Санкт-Петербург (Россия), e-mail: Laskutina2017@gmail.com

Laskutina O.S. – Master’s Student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg (Russia), e-mail: Laskutina2017@gmail.com

Михайлов А.Е. – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, г. Санкт-Петербург (Россия), e-mail: Laskutina2017@gmail.com

Mikhailov A.E. – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Mathematics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg (Russia), e-mail: Laskutina2017@gmail.com

Бирюков А.Н. – доктор технических наук, профессор кафедры технологии, организации и экономики строительства Военной академии материально-технического обеспечения, г. Санкт-Петербург (Россия), e-mail: Laskutina2017@gmail.com

Biryukov A.N. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technology, Organization and Economics of Construction, Military Academy of Logistics, St. Petersburg (Russia), e-mail: Laskutina2017@gmail.com

Сяо Шусинь – аспирант Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург (Россия, КНР), e-mail: _turkina_nr@voenmeh.ru

Xiao Shuxin – Postgraduate Student, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, St. Petersburg (Russia, China), e-mail: _turkina_nr@voenmeh.ru

Туркина Н.Р. – кандидат технических наук, доцент кафедры механики деформируемого твердого тела Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург (Россия), e-mail: _turkina_nr@voenmeh.ru

Turkina N.R. – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Deformable Solid Mechanics, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, St. Petersburg (Russia), e-mail: _turkina_nr@voenmeh.ru

Аль-Иряни Х.М.Х. – аспирант Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва (Россия), e-mail: hussein.aleryani@gmail.com

Al-Eryani H.M.H. – Postgraduate Student, Patrice Lumumba Peoples’ Friendship University of Russia, Moscow (Russia), e-mail: hussein.aleryani@gmail.com

Зайнуллин С.Б. – кандидат экономических наук, доцент кафедры национальной экономики Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва (Россия), e-mail: zaynullin-sb@rudn.ru

Zainullin S.B. – Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of National Economics, Patrice Lumumba Peoples’ Friendship University of Russia, Moscow (Russia), e-mail: zaynullin-sb@rudn.ru

Воронкова О.В. – доктор экономических наук, профессор кафедры экономики и управления Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург (Россия), e-mail: nauka-bisnes@mail.ru

Voronkova O.V. – Doctor of Economics, Professor, Department of Economics and Management, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg (Russia), e-mail: nauka-bisnes@mail.ru

Саллум М. – аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург (Россия), e-mail: salloummoris@gmail.com

Salloum M. – Postgraduate Student, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg (Russia), e-mail: salloummoris@gmail.com

COMPONENTS OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PROGRESS

№ 6(120) 2026

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

Manuscript approved for print 22.06.26

Format 60.84/8

Conventional printed sheets 9.77

Published pages 5.55

200 printed copies

The price is 300 rubles.

16+

NTF RIM LLC