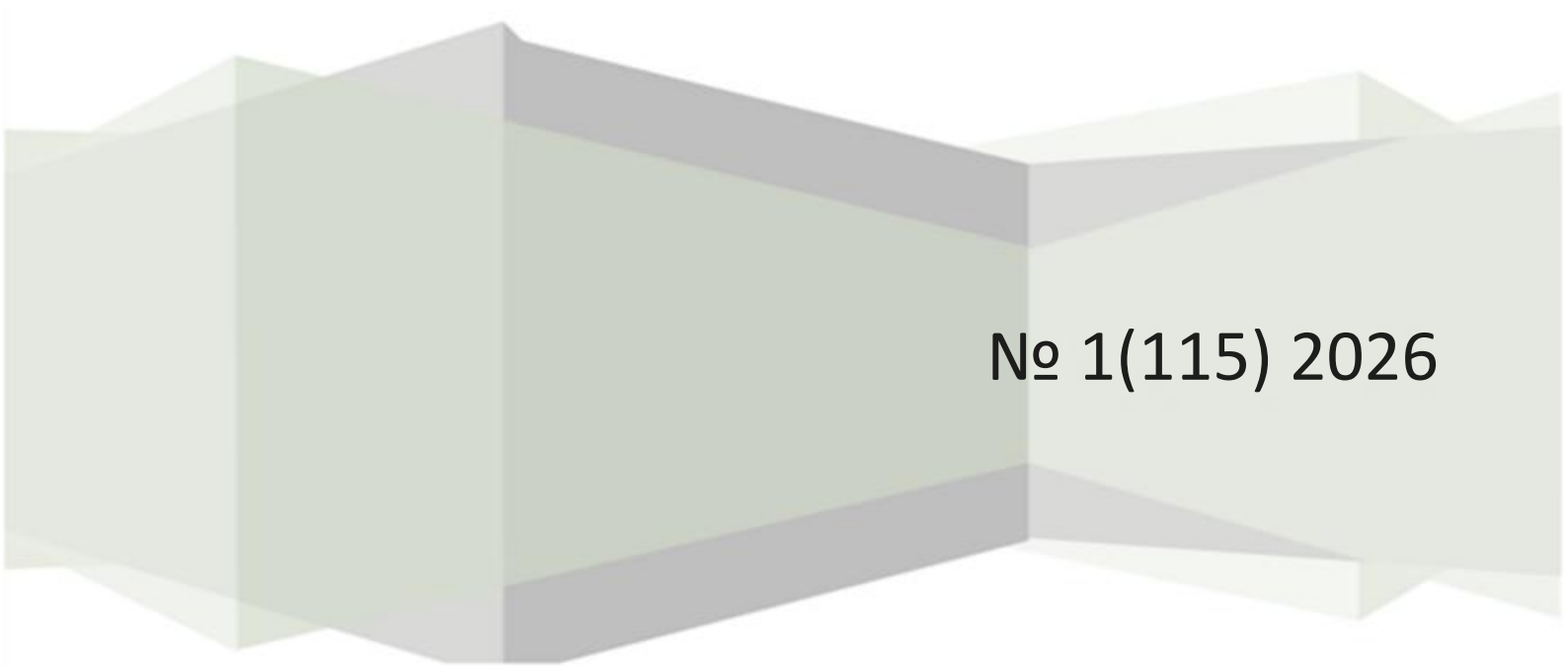


ISSN 1997-9347

Components of Scientific and Technological Progress

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL



№ 1(115) 2026

Санкт-Петербург, 2026

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

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.: +7(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.: +7(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.: +7(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.: +7(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.akeg@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.: +7(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.: +7(495)6074186, +7(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.: +7(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.: +7(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.: 36303206350, 361482742; 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.: +7(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)

Pukharenko Yury 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

Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

- Карапузова Н.Ю., Ермилова Н.Ю., Галанов В.В., Карапузов В.И.** Методы оптимизации работы парового котла 6
- Карапузова Н.Ю., Фокин В.М., Чеботарев А.А., Карапузов В.И.** Исследование теплопроводности теплоизоляционных органических пористых материалов методом математического эксперимента 12
- Кирпичева Е.М., Медведева Г.А.** Инновационные подходы к созданию систем отопления в спортивных комплексах 21
- Субботин Я.А., Обиднов И.А., Жупанов А.И., Ковылин А.В.** Исследование влияния водородного топлива на характеристики горения в газотурбинных установках 28
- Тертишников И.В., Беляков И.А., Симаков В.С.** Сравнительный анализ моделей Стокса и Осеена для расчета седиментационного диаметра частиц СВМПЭ 34

Строительные материалы и изделия

- Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Богачева М.А.** Исследование пористой структуры теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов методом анализа изображений 43

Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

- Бурый А.С., Козлова О.Л.** Метод автономной оценки радиационной обстановки в помещениях радиационно-опасных объектов с целью повышения экологической и производственной безопасности 51
- Космынина Т.А., Остах С.В.** Экологическая оценка воздействия на почвы фильтрата станции обезжелезивания питьевой воды 57

Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия

- Берталь Хаула, Капустин П.В.** Археологическое наследие как фактор идентичности и развития: проблемы проживания с археологическим наследием в Алжире (Джемила и Тимгад) 64

Управление жизненным циклом объектов строительства

- Иошкин В.А., Шестерикова Я.В.** Совершенствование системы управления строительным проектом с целью снижения рисков, возникающих из-за конфликтов интересов на этапе проектирования 70

Менеджмент

- Мухаметханова Н.И.** Принципы управления изменениями в организации при переходе к экономике замкнутого цикла 76
- Хубаев А.О., Алейник Р.В.** Совершенствование процесса реализации строительных проектов при ограниченных ресурсах методом критической цепи 82

Contents

Heating, Ventilation, Air Conditioning, Gas Supply and Lighting

- Karapuzova N.Yu., Ermilova N.Yu., Galanov V.V., Karapuzov V.I.** Methods for Optimizing the Operation of Steam Boiler 6
- Karapuzova N.Yu., Fokin V.M., Chebotarev A.A., Karapuzov V.I.** Studying Thermal Conductivity of Porous Organic Thermal Insulation Materials Using a Mathematical Experiment 12
- Kirpicheva E.M., Medvedeva G.A.** Innovative Approaches to the Development of Heating Systems in Sports Complexes 21
- Subbotin Ya.A., Obidnov I.A., Zhupanov A.I., Kovylin A.V.** Investigation of the Effect of Hydrogen Fuel on Combustion Characteristics in Gas Turbine Installations 28
- Tertishnikov I.V., Belyakov I.A., Simakov V.S.** Comparative Analysis of the Stokes and Oseen Models for Calculating the Sedimentation Diameter of UHMWPE Particles 34

Building materials and products

- Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Bogacheva M.A.** A Study of the Porous Structure of Thermal-Insulating Dispersed-Reinforced Foam Concrete by Image Analysis 43

Environmental safety of construction and urban economy

- Buryi A.S., Kozlova O.L.** A Method of Autonomous Assessment of the Radiation Situation in the Premises of Radiation-Hazardous Facilities to Improve Environmental and Industrial Safety 51
- Kosmynina T.A., Ostakh S.V.** Ecological Assessment of the Impact of Drinking Water Deferrization Filtrate on Soils 57

Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage

- Bertal Khaoula, Kapustin P.V.** Archaeological Heritage as a Factor of Identity and Development: Problems of Living in the Archaeological Heritage in Algeria (Jemila and Timgad) 64

Life Cycle Management of Construction Objects

- Ioshkin V.A., Shesterikova Ya.V.** Improvement of the Construction Project Management System to Reduce Risks Arising from Conflicts of Interest at the Design Stage 70

Management

- Mukhametkhanova N.I.** Principles of Management of Organization in Circular Economy 76
- Khubaev A.O., Aleynik R.V.** Improving the Process of Implementing Construction Projects with Limited Resources by the Critical Chain Method 82

УДК 697.326:621.181

Методы оптимизации работы парового котла

Н.Ю. Карапузова, Н.Ю. Ермилова, В.В. Галанов,
В.И. Карапузов

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

Ключевые слова и фразы: автоматизация; воздушная заслонка; газовая горелка; оптимизация; паровой котел «Тампелла-Карлсон».

Аннотация. В статье представлено исследование, направленное на повышение энергоэффективности и надежности эксплуатации парового котла «Тампелла-Карлсон» за счет модернизации системы автоматического регулирования процесса горения. Разработка и обоснование технических решений по автоматизации подачи топлива и воздуха в топку котла с целью оптимизации коэффициента избытка воздуха, минимизации тепловых потерь и повышения КПД котельной установки. Результаты работы демонстрируют высокую эффективность модернизации устаревшего, но технически исправного энергооборудования за счет современных решений в области автоматизации процессов горения.

Основу современной энергетики составляют крупные тепловые электростанции (ТЭС), производственные и отопительные котельные, системы теплоснабжения производственных, административных, жилых зданий и т.п. На современных теплоэлектростанциях и в других отраслях промышленной теплоэнергетики большинство трудоемких процессов, связанных с производством и распределением тепловой и электрической энергии, в значительной степени автоматизированы [1].

В условиях эксплуатации энергетического оборудования роль оператора сводится к управлению машинами, механизмами и технологическими установками: он осуществляет перемещение регулирующих органов, включение и отключение оборудования, а также контроль его работы с помощью измерительных приборов или визуального наблюдения. Однако даже при полной механизации круглосуточного функционирования систем оператор остается вовлеченным в монотонный и утомительный труд по управлению основными и вспомогательными процессами, что не обеспечивает гарантированной надежности и экономичности их работы даже при высокой квалификации персонала.

Это обстоятельство обуславливает активное внедрение автоматизированных систем в энергетике. На тепловых станциях, где несколько паровых котлов подключены к общей паровой магистрали, последняя выступает в качестве объекта регулирования давления

пара. Стратегии и схемы автоматического управления тепловой нагрузкой котла и давлением в магистрали определяются режимом его эксплуатации: базовым или регулирующим, а также типом используемого топлива. В базовом режиме тепловая нагрузка котла поддерживается на постоянном уровне независимо от суммарной нагрузки станции. В регулирующем режиме котел принимает на себя колебания тепловой и электрической нагрузки, связанные с работой турбин, тем самым участвуя в общем регулировании энергетического баланса станции. Роль оператора в таких процессах заключается в управлении машинами, механизмами и установками. Он перемещает регулирующие органы, включает или отключает оборудование и следит за его работой, используя контрольно-измерительные приборы или непосредственно наблюдая за процессом.

При разработке схемы автоматического регулирования тепловой нагрузки парового котла, в частности управляющей подачей топлива, возникает необходимость в точном измерении текущей тепловой нагрузки. Данная величина напрямую зависит от характеристик сжигаемого топлива: его вида, теплоты сгорания и физико-химических свойств. В связи с этим актуальной задачей становится автоматизация процесса сжигания топлива, направленная на оптимизацию режимов работы котельной установки, повышение ее энергоэффективности и обеспечение стабильности параметров вырабатываемого пара.

Вопросам моделирования, анализа и автоматизации процессов горения в паровых котлах посвящены исследования ряда авторов, среди которых следует отметить [2–4].

Паровой котел «Тампелла-Карлсон» сыграл важную роль в развитии отечественной теплоэнергетики, демонстрируя высокую надежность и адаптивность к условиям промышленной эксплуатации на ТЭЦ. Его опыт применения остается актуальным при рассмотрении вопросов продления ресурса устаревшего, но технически исправного энергооборудования через внедрение современных решений в области автоматизации и энергосбережения. Ниже приведены основные характеристики парового котла «Тампелла-Карлсон», который был произведен АО «Тампелла» в г. Тампере, Финляндия. Рабочее давление у котла составляет 39 кгс/см^2 , его паропроизводительность – 35 т/ч , а температура перегретого пара равна $450 \text{ }^\circ\text{C}$, площадь поверхности нагрева составляет 944 м^2 .

К числу эксплуатационных преимуществ котла относятся низкие требования к качеству питательной воды и наличие функций автоматического запуска, поддержания параметров, плановой остановки и контроля загазованности топки.

Несмотря на возраст оборудования, его дальнейшая эффективная эксплуатация возможна за счет модернизации систем управления, в первую очередь – автоматизации процесса сжигания топлива.

Состав и номенклатура технических средств автоматизированной системы управления и контроля (**АСУК**) парового котла определяются условиями его эксплуатации, конструктивными и режимными параметрами котельной установки, а также предъявляемыми нормативными и технологическими требованиями. В состав типовой АСУК входят следующие функциональные подсистемы измерения и контроля:

- средства измерения температуры, выбор которых обусловлен необходимостью обеспечения работоспособности датчиков в диапазоне максимальных рабочих температур котла, при этом учитываются тип чувствительного элемента (термопара, термометр сопротивления и др.) и формат выходного сигнала (аналоговый, цифровой);
- средства измерения давления, реализуемые преимущественно на базе унифицированных преобразователей давления с нормированным выходным сигналом (например, $4\text{--}20 \text{ мА}$ или цифровым протоколом передачи данных), обеспечивающих совместимость с системами верхнего уровня управления;

– средства измерения расхода рабочих сред, в частности, топлива, воздуха и пара, которые в большинстве случаев реализуются с использованием стандартных сужающих устройств, в первую очередь диафрагм, соответствующих требованиям ГОСТ 8.586 и международным стандартам *ISO 5167*;

– средства измерения уровня воды в барабане котла, основанные на применении дифференциально-манометрических, емкостных или радиочастотных преобразователей, формирующих унифицированный сигнал для последующей передачи в системы регулирования и аварийной сигнализации;

– средства контроля процесса горения, включая фотоэлектрические датчики (фотоэлементы) для измерения яркости факела в топке, интегрированные с вторичными приборами сигнализации и защиты, предназначенными для диагностики устойчивости горения и предотвращения аварийных ситуаций.

Особое значение в структуре АСУК имеет автоматическая система регулирования подачи воздуха, которая обеспечивает поддержание оптимального соотношения между количеством подаваемого топлива и окислителя, необходимого для его полного сгорания. Стехиометрический расход воздуха определяется видом, маркой и физико-химическими характеристиками используемого топлива. На практике в топку подается избыточное количество воздуха, характеризуемое коэффициентом избытка воздуха $\alpha > 1$, что необходимо для компенсации неравномерности смесеобразования и обеспечения минимальных потерь от химического недожога. Оптимизация величины α в реальном времени позволяет минимизировать суммарные тепловые потери и, как следствие, повысить КПД котельной установки.

Расход воздуха в топку определяется коэффициентом избытка воздуха α , оптимальное значение которого зависит от вида сжигаемого топлива:

- $\alpha = 1,03 \dots 1,05$ при сжигании газа;
- $\alpha = 1,05 \dots 1,1$ при сжигании мазута;
- $\alpha = 1,15 \dots 1,25$ при сжигании углей.

Оптимальные значения α либо устанавливаются заводом-изготовителем котельного оборудования, либо определяются при режимных испытаниях котла. От значений коэффициента избытка воздуха зависят потери теплоты в котле, которые влияют на КПД (η) котла:

- q_2 – с уходящими газами;
- q_3 – от химического недожога топлива;
- q_4 – от механического недожога топлива.

Система регулирования подачи воздуха должна на каждой нагрузке котла поддерживать оптимальное значение КПД. Качественное влияние коэффициента избытка воздуха на составляющие потерь и КПД приведено на рис. 1.

Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха α может быть определено на основе концентрации свободного кислорода O_2 в дымовых газах, покидающих топочное пространство. Данная оценка осуществляется с использованием кислородной формулы полного сгорания топлива и учитывает зону регулирования, соответствующую максимуму экономичности процесса горения.

Снижение удельного расхода природного газа в газовой горелке достигается за счет точного регулирования подачи воздуха. В современных системах управления реализуется принцип воздух-ведущий (*air-leading*), при котором расход газа автоматически корректируется в соответствии с заданным расходом воздуха. Изменение положения воздушной заслонки, управляемой исполнительным механизмом, напрямую влияет на объем подава-

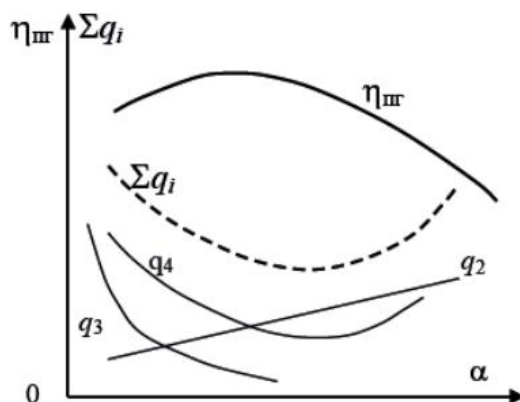


Рис. 1. Зависимость КПД и суммарных потерь от коэффициента избытка воздуха: η – КПД котла; α – коэффициентом избытка воздуха; q_2 – потери теплоты с уходящими газами; q_3 – потери теплоты от химического недожога топлива; q_4 – потери теплоты от механического недожога топлива

емого топлива. Такой подход критически важен: избыток воздуха приводит к увеличению энтальпии уходящих газов и, как следствие, к снижению КПД котельной установки; недостаток же воздуха создает условия для неполного сгорания топлива, сопровождающегося образованием сажи, оксидов углерода и ростом потерь от химического недожога.

Регулирование подачи воздуха на горелку представляет собой ключевой элемент обеспечения стабильного и эффективного горения в широком диапазоне нагрузок. Особенно актуально это для модулируемых газовых горелок, применяемых в промышленных паровых котлах, где соотношение «воздух/газ» изменяется плавно и пропорционально текущей тепловой нагрузке котла.

Для реализации данного процесса в состав автоматизированной системы управления включаются следующие технические средства:

- сервоприводы: для точного позиционирования дроссельной заслонки подачи воздуха;
- модуляционные регуляторы (аналоговые или цифровые): обеспечивают плавное изменение мощности горелки в ответ на управляющие сигналы от системы автоматики котла;
- датчики обратной связи: по температуре, давлению и разрежению в топке или газоходах, используемые для коррекции режима горения и поддержания заданных технологических параметров.

Такая архитектура системы позволяет не только минимизировать топливные затраты, но и обеспечить устойчивость процесса горения, безопасность эксплуатации и соответствие экологическим нормативам.

Современная автоматизированная система регулирования подачи воздуха в топку парового котла реализует адаптивное управление процессом горения на основе комплексного анализа текущего соотношения «газ/воздух» и концентрации свободного кислорода O_2 в уходящих дымовых газах. На основании этих данных система осуществляет динамическую коррекцию соотношения давлений газа и воздуха, обеспечивая стехиометрически оптимальные условия сгорания. В случае отклонения измеренной концентрации O_2 от заданного диапазона производится автоматическая регулировка расхода воздуха: при избытке кислорода снижается подача воздуха (соответственно, уменьшается его давление),

при недостатке – подача увеличивается. Такой подход позволяет поддерживать максимальный коэффициент полезного действия котельной установки даже в условиях частичной нагрузки, а также минимизировать количество циклов пуска-остановки горелки, что положительно влияет на ресурс оборудования и стабильность технологического процесса.

Результаты исследований показали, что внедрение автоматизации подачи топлива и воздуха в горелку котла приводит к снижению расхода газа на 12–15 %.

Литература

1. Голдобин, Ю.М. Автоматизация теплоэнергетических установок : учеб. пособие для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника / Ю.М. Голдобин, Е.Ю. Павлюк ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина ; науч. ред. В.А. Мунц. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – 186 с.
2. Маслов, А.Д. Исследование эффективности работы котла-утилизатора / А.Д. Маслов, А.А. Коноваленко, А.И. Жупанова, А.В. Ковылин // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 1(103). – С. 8–13.
3. Мельников, Е.В. Эффективность тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения / Е.В. Мельников, А.В. Ковылин // Перспективы науки. – Тамбов : НТФ РИМ. – 2023. – № 6(165). – С. 84–87.
4. Мельников, Е.В. Исследование материалов и процессов обогрева и теплоизоляции трубопроводов горячего и холодного водоснабжения, тепловых сетей, газопроводов / Е.В. Мельников, А.В. Ковылин // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 4(82). – С. 31–35.

References

1. Goldobin, YU.M. Avtomatizatsiya teploenergeticheskikh ustanovok : ucheb. posobie dlya studentov vuza, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki 13.03.01 – Teploenergetika i teplotekhnika / YU.M. Goldobin, E.YU. Pavlyuk ; Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federatsii, Uralskij federalnyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Eltsina ; nach. red. V.A. Munts. – Ekaterinburg : Uralskij federalnyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Eltsina, 2017. – 186 s.
2. Maslov, A.D. Issledovanie effektivnosti raboty kotla-utilizatora / A.D. Maslov, A.A. Konovalenko, A.I. Zhupanova, A.V. Kovylin // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 1(103). – S. 8–13.
3. Melnikov, E.V. Effektivnost teplovoj izolyatsii truboprovodov sistem teplosnabzheniya / E.V. Melnikov, A.V. Kovylin // Perspektivy nauki. – Tambov : NTF RIM. – 2023. – № 6(165). – S. 84–87.
4. Melnikov, E.V. Issledovanie materialov i protsessov obogreva i teploizolyatsii truboprovodov goryachego i kholodnogo vodosnabzheniya, teplovykh setej, gazoprovodov / E.V. Melnikov, A.V. Kovylin // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 4(82). – S. 31–35.

Methods for Optimizing the Operation of Steam Boiler

N.Yu. Karapuzova, N.Yu. Ermilova, V.V. Galanov, V.I. Karapuzov

Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia)

Key words and phrases: automation; air damper; gas burner; optimization; steam boiler; Tampella-Carlson.

Abstract. This article presents a study aimed at improving the energy efficiency and operational reliability of the Tampella-Carlson steam boiler by upgrading the automatic combustion control system. The study also explores the development and validation of technical solutions for automating the fuel and air supply to the boiler furnace to optimize the excess air ratio, minimize heat loss, and improve the boiler system's efficiency. The results demonstrate the high efficiency of upgrading obsolete, yet technically sound, power equipment using modern combustion automation solutions.

© Н.Ю. Карапузова, Н.Ю. Ермилова, В.В. Галанов, В.И. Карапузов, 2026

УДК 691:699.86:536.24

**Исследование теплопроводности
теплоизоляционных органических
пористых материалов
методом математического эксперимента**

Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин, А.А. Чеботарев,
В.И. Карапузов

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

Ключевые слова и фразы: математический эксперимент; теплопроводность; теплофизические свойства материалов.

Аннотация. Статья посвящена разработке, проведению исследований и диагностике теплофизических свойств органических теплоизоляционных пористых материалов методом математического эксперимента. Методика по использованию математического эксперимента актуальна для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля материалов, в технической теплофизике и строительной теплотехнике. Математическим исследованием выявлены параметры, зависимости, критерии, комплексы и симплексы, характерные для процесса распространения температурных волн в теплоизоляционных органических материалах. Получена функциональная зависимость теплопроводности теплоизоляционных органических пористых материалов при соответствующей плотности.

В современных реальных условиях защиты человека, зданий и сооружений чаще всего встречаются ограждения, состоящие из слоев соприкасающихся отдельных материалов, в том числе и новых, технических данных по которым нет в справочной и технической литературе. Кроме того, исследованиями установлено, что свойства различных материалов и изделий могут изменяться в процессе эксплуатации, изменения температуры и влажности и тем самым не соответствовать их сертификату. Поэтому при возведении объектов в ходе строительства, при их производстве и эксплуатации необходимо предусмотреть возможное изменение свойств материалов и изделий. Это возможно решить только при совершенствовании известных и разработке новых энергоэффективных методов неразрушающего контроля с использованием математического эксперимента, позволяющего комплексно определять как теплофизические, так и акустические свойства материалов, ограждений зданий и сооружений.

При постановке любого физического или математического эксперимента всегда не-

обходимо провести анализ экспериментальных, опытных или ранее установленных и известных данных с целью определения ориентиров, параметров, подобных явлений, для которых необходима обработка и получение требуемой зависимости, функции, комплекса или симплекса. Это позволяет найти общую закономерность, справедливую для ряда процессов.

Известно, что показатели используемых теплоизоляционных защитных материалов оказывают влияние на тепловой, воздушный и экологический режимы ограждений зданий и сооружений различного назначения для обеспечения комфортного пребывания человека или на эргономические характеристики человека.

Наиболее эффективными изоляторами для звукоизоляции и термоизоляции могут служить органические и неорганические пористые теплоизоляционные и звукоизоляционные материалы, имеющие определенные акустические и теплофизические свойства. Основной характеристикой органических и неорганических пористых теплоизоляционных материалов служит теплопроводность. Непосредственное табулирование значения теплопроводности для реальных конкретных материалов неоправданно, так как небольшие изменения химического состава или физического состояния, изменения температуры и влажности наружного воздуха приводят к существенным различиям значений теплопроводности. Располагая известными табулированными (табличными) значениями теплопроводности или температуропроводности теплоизоляционных органических материалов, можно получить графическую или степенную зависимость изменения теплофизического параметра от плотности материала, его влажности, а также области применения по температурному фактору (положительные или отрицательные температуры использования).

Например, зависимость теплопроводности материала λ от его плотности ρ может быть описана эмпирической формулой, представленной в виде степенной функции:

$$\lambda = \varphi(\rho)^Y, \quad (1)$$

где φ и Y – некоторые размерные симплексы логарифмической функции.

Обобщенная формула или зависимость (1) имеет общий характер, но позволяет установить, какое влияние на теплопроводность (или на другой параметр) оказывают плотность, влажность или температура.

Алгоритм получения степенной зависимости вида (1) заключается в следующем. Допустим, что имеется ряд значений теплопроводности материала в зависимости от его плотности. Логарифмируя соотношение (1) и обозначая $\lg(\rho)$ через x , $\lg(\lambda)$ через y , $\lg(\varphi)$ через A , получим уравнение прямой линии:

$$y = A + xY. \quad (2)$$

Далее в логарифмических координатах строится график: $\lambda = f(\rho)$.

Все точки на графике хорошо укладываются на прямую линию. Проверкой применимости степенной зависимости является тот факт, что в логарифмических координатах все опытные (экспериментальные или табулированные) точки укладываются на прямую линию. Если же точки располагаются по кривой, то эту кривую заменяют ломаной. Соответственно, для отдельных участков такой ломаной (кривой) значения симплексов логарифмической функции φ и Y различны. Если искомый параметр является функцией двух аргументов, то на логарифмическом графике получается семейство прямых линий, а второй элемент берется в качестве параметра.

Показатель степени, или симплекс Y , численно равен углу наклона прямой β к оси абсцисс (x), а именно:

$$Y = \operatorname{tg} \beta = a/b, \quad (3)$$

где a и b измеряются простым масштабом логарифмического графика.

Значение симплекса φ в функции (1) определяется из соотношения:

$$\varphi = \lambda \rho^Y \quad (4)$$

и справедливо для любой точки прямой линии.

Таких определений φ надо сделать не менее трех и взять их среднеарифметическое значение (например, при трех значениях плотности ρ).

Впервые получена функциональная зависимость теплопроводности теплоизоляционных органических пористых материалов при соответствующей плотности, положительных и отрицательных температурах и влажности, а за определяющий параметр принимается поверхностная плотность материала (ρ_{Π}).

Вначале следует выделить, что для любого теплоизоляционного органического и неорганического материала с определенной пористостью Π (%) объемная плотность ρ_0 или объемная масса пористого материала характеризует отношение общей массы всего пористого материала m_0 (кг) к его полному объему (м^3), включая объем пор. Тогда объем структурообразующего материала (мембраны) от общего объема в процентах (%) соответственно составит:

$$\Delta_M = (100 - \Pi), \% \quad (5)$$

Если из теплоизоляционного пористого материала удалить все поры, то оставшаяся масса m (кг) структурообразующего материала (мембраны) остается постоянной, а объем мембраны в долях Δ_M , толщина мембраны в уплотненном (сжатом) состоянии δ_M и объем мембраны V_M , находящейся в уплотненном (условно сжатом) состоянии в 1 м^3 структурообразующего материала, без учета пор Π (%), соответственно составят:

– объем мембраны в долях:

$$\Delta_M = 0,01 \times \Delta_M = 0,01(100 - \Pi); \quad (6)$$

– толщина мембраны (м):

$$\delta_M = \Delta_M \times 1 \text{ м} = 0,01(100 - \Pi) \times 1 \text{ м}; \quad (7)$$

– объем мембраны (м^3):

$$V_M = \delta_M \times (F = 1 \text{ м}^2). \quad (8)$$

Массовая плотность ρ_M твердого тела структурообразующего материала в уплотненном (условно сжатом) состоянии, без учета пор Π , характеризует отношение постоянной массы m (кг) структурообразующего материала (мембраны) к объему мембраны V_M (м^3), то есть:

$$\rho_M = m/V_M, \text{ кг/м}^3.$$

Равнозначно, массовая плотность ρ_M твердого тела структурообразующего материала в уплотненном (условно сжатом) состоянии, с учетом объемной плотности ρ_0 , объема мембраны в долях Δ_M и пористости Π (%), составляет:

$$\rho_M = \rho_0/(\Delta_M) = \rho_0/[0,01(100 - \Pi)], \text{ кг/м}^3. \quad (9)$$

Поверхностная плотность ρ_{Π} – это масса структурообразующего материала m (кг) в уплотненном (условно сжатом) состоянии, находящегося в 1 м^3 , но приходящаяся на единицу поверхности изделия (мембраны) F , то есть на 1 м^2 :

$$\rho_{\Pi} = m/F, \text{ кг/м}^2.$$

Поверхностная плотность ρ_{Π} – параметр (условно сжатый), объединяющий объемную плотность ρ_0 , пористость Π , толщину мембраны δ_M .

Поверхностная плотность ρ_{Π} твердого тела структурообразующего материала в уплотненном (условно сжатом) состоянии, с учетом объемной плотности ρ_0 , толщины мембраны δ_M и пористости Π , определится как:

$$\rho_{\Pi} = \rho_0 \times \delta_M = \rho_0 \times [0,01(100 - \Pi) \times 1 \text{ м}], \text{ кг/м}^2. \quad (10)$$

Проведенный математический эксперимент позволяет установить, что поверхностная плотность ρ_{Π} (кг/м^2), объемная ρ_0 и массовая плотность ρ_M (кг/м^3), толщина мембраны δ_M (м) для любого теплоизоляционного материала с определенной пористостью Π связаны определенными соотношениями.

С повышением пористости Π материала пропорционально снижается объемная плотность ρ_0 , объем мембраны Δ_M и толщина мембраны δ_M .

С повышением объемной плотности ρ_0 пористого материала массовая плотность ρ_M твердого тела структурообразующего материала (мембраны) в уплотненном (условно сжатом) состоянии, без учета пор Π , изменяется незначительно, в пределах нескольких процентов, ввиду пропорционального изменения массы m (кг) и объема мембраны V_M (м^3), т.к. $\rho_M = m/V_M$, кг/м^3 .

Оптимальное содержание пористости и твердой фазы структурообразующего материала (мембраны) определяет прочность теплоизоляционных пористых изделий. С повышением объемной плотности ρ_0 пористого материала поверхностная плотность ρ_{Π} значительно увеличивается. Это свойство поверхностной плотности ρ_{Π} предопределяет дальнейший ход приведенного математического эксперимента.

Теплоизоляционные органические материалы по объемной массе подразделяются на особо легкие ($\rho_0 = 15\text{--}75 \text{ кг/м}^3$), легкие ($\rho_0 = 100\text{--}350 \text{ кг/м}^3$), тяжелые ($\rho_0 = 400\text{--}600 \text{ кг/м}^3$) и особо тяжелые ($\rho_0 = 600\text{--}900 \text{ кг/м}^3$) [1; 8].

Согласно основным допустимым свойствам для теплоизоляционных пористых органических материалов, а также приведенным расчетным формулам для математического эксперимента, выполнены следующие преобразования:

- объемная плотность (объемная масса) ρ_0 , кг/м^3 ;
- пористость Π (средние значения), %;
- объем мембраны в процентах, %: $\Delta_M = (100 - \Pi)$;

Таблица 1. Общие параметры теплоизоляционных органических пористых материалов: объемная плотность ρ_0 (кг/м³); средняя пористость Π_{CP} (%); объем мембраны Δ_M (%); толщина мембраны δ_M (м); массовая плотность мембраны ρ_M (кг/м³); поверхностная плотность мембраны ρ_{Π} (кг/м²)

ρ_0 , (кг/м ³)	Π_{CP} (%)	Δ_M , (%)	δ_M , (м)	ρ_M , (кг/м ³)	ρ_{Π} , (кг/м ²)
100	93	7	0,07	1429	7
200	86	14	0,14	1430	28
300	79	21	0,21	1430	63
400	73	27	0,27	1480	108
500	66	34	0,34	1470	170
600	60	40	0,4	1500	240
700	53	47	0,47	1490	329
800	47	53	0,53	1510	424
900	40	60	0,6	1500	540

Таблица 2. Теплопроводность теплоизоляционных органических пористых материалов λ_{\star} (Вт/мК)

ρ_0 , (кг/м ³)	Π_{CP} (%)	δ_M , (м)	λ_{\star} , (Вт/м·К)	ρ_M , (кг/м ³)	ρ_{Π} , (кг/м ²)
100	93	0,07	0,0477	1430	7
200	86	0,14	0,0652	1430	28
300	79	0,21	0,0815	1430	63
400	73	0,27	0,0954	1480	108
500	66	0,34	0,111	1470	170
600	60	0,4	0,128	1500	240
700	53	0,47	0,146	1490	329
800	47	0,53	0,163	1510	424
900	40	0,6	0,180	1500	540

- объем мембраны в долях: $\Delta_M = 0,01 \times \Delta_M$;
- толщина мембраны (м): $\delta_M = 0,01 \times \Delta_M \times 1 \text{ м} = 0,01(100 - \Pi) \times 1 \text{ м}$;
- массовая плотность (ρ_M) структурообразующего материала (мембраны) в уплотненном состоянии: $\rho_M = \rho_0 / (0,01 \times \Delta_M)$, кг/м³;
- поверхностная плотность ρ_{Π} структурообразующего материала (мембраны) в уплотненном состоянии: $\rho_{\Pi} = \rho_0 \times \delta_M$, кг/м².

В табл. 1 для теплоизоляционных органических пористых материалов приведены общие параметры.

В табл. 2 приведены значения табулированных минимальных значений теплопроводности λ_{\star} для теплоизоляционных пористых органических материалов при соответствующей плотности, положительных и отрицательных температурах и нулевой влажности ($W = 0 \%$).

В данном рассматриваемом случае (табл. 2) имеется ряд табулированных значений

теплопроводности λ_{\star} материала [16] в зависимости от его поверхностной плотности, температур и влажности материала.

Логарифмируя соотношения и обозначая: $lg(\rho_{\Pi})$ через x , $lg(\lambda_{\star})$ через y , $lg(\varphi)$ через A , получим уравнение прямой линии:

$$y = A + xY.$$

Далее в логарифмических координатах строится график: $\lambda_{\star} = f(\rho_{\Pi})$.

Все точки на логарифмическом графике располагаются по кривой, поэтому эта ломаная кривая заменяется двумя прямыми, соответственно:

- для $\rho_0 = 100\text{--}350 \text{ кг/м}^3$; ($\rho_{\Pi} = 7\text{--}84 \text{ кг/м}^2$);
- для $\rho_0 = 400\text{--}900 \text{ кг/м}^3$; ($\rho_{\Pi} = 108\text{--}540 \text{ кг/м}^2$).

Показатель степени, или симплекс Y , численно равен углу наклона каждой из этих двух прямых к оси абсцисс (x):

$$Y = \operatorname{tg} \beta = a/b,$$

где a и b измеряются простым масштабом логарифмического графика.

Согласно логарифмическому графику, имеем два значения симплекса Y :

- $Y = 0,244$ для $\rho_0 = 100\text{--}350 \text{ кг/м}^3$ (при $\rho_{\Pi} = 7\text{--}84 \text{ кг/м}^2$);
- $Y = 0,39$ для $\rho_0 = 400\text{--}900 \text{ кг/м}^3$ (при $\rho_{\Pi} = 108\text{--}540 \text{ кг/м}^2$).

Значение симплекса φ определяется из соотношения:

$$\varphi = \lambda_{\star}/(\rho_{\Pi})^Y$$

и справедливо для любой точки каждой прямой линии из двух.

Таких определений φ надо сделать не менее трех для каждой прямой линии и следует взять их среднеарифметическое значение (например, при трех значениях плотности ρ_{Π}).

По результатам математического эксперимента определяются два среднеарифметических значения симплекса φ для каждой прямой линии:

- $\varphi = 0,0295$ для $\rho_0 = 100\text{--}350 \text{ кг/м}^3$ (при $\rho_{\Pi} = 7\text{--}84 \text{ кг/м}^2$);
- $\varphi = 0,0152$ для $\rho_0 = 400\text{--}900 \text{ кг/м}^3$ (при $\rho_{\Pi} = 108\text{--}540 \text{ кг/м}^2$).

В результате применения математического эксперимента и согласно степенной функции (1) функциональная зависимость теплопроводности теплоизоляционных пористых органических материалов при соответствующей плотности, положительных и отрицательных температурах, нулевой влажности материала ($W = 0 \%$) будет, соответственно, иметь вид (11) и (12).

При $\rho_{\Pi} = 7\text{--}84 \text{ кг/м}^2$; $\rho_0 = 100\text{--}350 \text{ кг/м}^3$:

$$\lambda_0 = 0,0295(\rho_{\Pi})^{0,244} \text{ (Вт/(м·К));} \quad (11)$$

При $\rho_{\Pi} = 108\text{--}540 \text{ кг/м}^2$; $\rho_0 = 400\text{--}900 \text{ кг/м}^3$:

$$\lambda_0 = 0,0152(\rho_{\Pi})^{0,39} \text{ (Вт/(м·К)).} \quad (12)$$

В табл. 3 приведены табулированные значения теплопроводности λ_{\star} для теплоизоляционных пористых органических материалов, а также вычисленные λ_0 по полученным

Таблица 3. Теплопроводность теплоизоляционных пористых органических материалов λ_0 , вычисленная соответственно по зависимостям (11) и (12), при соответствующей плотности, положительных и отрицательных температурах, при нулевой влажности ($W = 0\%$), а также приведена относительная погрешность ∇ (%)

ρ_0 , (кг/м ³)	$\Pi_{СР}$ (%)	$\rho_{П}$, (кг/м ²)	λ_{\star} , (Вт/м·К)	λ_0 , (Вт/м·К)	∇ (%)
100	93	7	0,0477	0,0474	0,6
200	86	28	0,0652	0,0665	1,9
300	79	63	0,0815	0,0811	0,5
400	73	108	0,0954	0,0944	1,0
500	66	170	0,111	0,1126	1,4
600	60	240	0,128	0,128	0
700	53	329	0,146	0,146	0
800	47	424	0,163	0,161	1,2
900	40	540	0,180	0,177	1,7

впервые зависимостям (11) и (12).

В табл. 3 табулированные значения для теплоизоляционных пористых органических материалов – λ_{\star} , а также вычисленные по полученным впервые зависимостям (11) и (12) – λ_0 , приведены при соответствующей средней пористости $\Pi_{СР}$, общей плотности ρ_0 и поверхностной плотности $\rho_{П}$, положительных и отрицательных температурах и нулевых значениях влажности ($W = 0\%$). В таблице также приведены значения относительной погрешности ∇ (%) для вычисленных значений теплопроводности теплоизоляционных пористых органических материалов λ_0 относительно табулированных значений λ_{\star} .

В результате применения математического эксперимента погрешность ∇ (%) полученных впервые значений теплопроводности для теплоизоляционных пористых органических материалов λ_0 относительно табулированных значений λ_{\star} показывает высокую сходимость теплопроводности при положительных и отрицательных температурах, нулевых значениях влажности материала ($W = 0\%$) и, соответственно, составляет:

- $\nabla = 0,5\text{--}1,9\%$ при $\rho_{П} = 7\text{--}84$ кг/м², $\rho_0 = 100\text{--}350$ кг/м³;
- $\nabla = 0\text{--}1,7\%$ при $\rho_{П} = 108\text{--}540$ кг/м², $\rho_0 = 400\text{--}900$ кг/м³.

Разработанный метод диагностики для теплоизоляционных пористых органических материалов выгодно отличается быстродействием, небольшой погрешностью, обладает новизной и оригинальностью. Кроме того, методики по использованию математического эксперимента являются перспективными для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля материалов, в технической теплофизике и строительной теплотехнике.

Литература

1. Горлов, Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко. – М. : Стройиздат, 1980. – 399 с.
2. Дмитриевич, А.Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов / А.Д. Дмитриевич. – М.; Л. : Госстройиздат, 1963. – 204 с.
3. Литовский, Е.Я. Теплофизические свойства огнеупоров : справочник / Е.Я. Литов-

- ский, Н.А. Пучкелевич. – М. : Metallurgiya, 1982. – 152 с.
4. Лыков, А.В. Тепломассообмен : справочник / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
 5. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков. – Минск : Наука и техника, 1961. – 519 с.
 6. Новицкий, Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах : справочник / Л.А. Новицкий, И.Г. Кожевников. – М. : Машиностроение, 1975. – 216 с.
 7. Перегудов, В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий / В.В. Перегудов, М.И. Роговой. – М. : Стройиздат, 1983. – 416 с.
 8. Патент на изобретение РФ № 2801079. Способ определения комплекса тепловыделительных и механических характеристик твердых материалов / В.М. Фокин, А.В. Ковылин. – Приоритет изобретения 01.03.2023. Гос. реестр изобретений РФ 01.08.2023.
 9. Патент на изобретение РФ № 2851626. Способ определения теплопроводности пористого органического материала при положительных температурах / Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин, А.В. Ковылин. – Приоритет изобретения 11.08.2025. Гос. реестр изобретений РФ 26.11.2025.
 10. Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент : справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с.
 11. Теплотехнический справочник. Т. 2 / под общ. ред. В.И. Юренева, П.Д. Лебедева. – М. : Энергия, 1975. – 896 с.
 12. Теплофизические свойства веществ / под ред. Н.Б. Варгафтика. – М.; Л. : Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.
 13. Фокин, В.М. Основы технической теплофизики : монография / В.М. Фокин, Г.П. Бойков, Ю.В. Видин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 172 с.
 14. Фокин, В.М. Тепловыделительная аналогия / В.М. Фокин, А.В. Ковылин, Д.Г. Усадский; под ред. д.т.н. В.М. Фокина. – СПб. : Научное издание технологий, 2023. – 263 с.
 15. Франчук, А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А.У. Франчук. – М. : Госстрой СССР; НИИ Стройфизики, 1969. – 128 с.
 16. Шевельков, В.А. Теплофизические характеристики изоляционных материалов / В.А. Шевельков. – М., 1958. – 96 с.

References

1. Gorlov, YU.P. Tekhnologiya teploizolyatsionnykh materialov / YU.P. Gorlov, A.P. Merkin, A.A. Ustenko. – М. : Strojizdat, 1980. – 399 s.
2. Dmitrovich, A.D. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv stroitelnykh materialov / A.D. Dmitrovich. – М.; Л. : Gosstrojizdat, 1963. – 204 s.
3. Litovskij, E.YA. Teplofizicheskie svoystva ogneuporov : spravochnik / E.YA. Litovskij, N.A. Puchkelevich. – М. : Metallurgiya, 1982. – 152 s.
4. Lykov, A.V. Teplomassoobmen : spravochnik / A.V. Lykov. – М. : Energiya, 1978. – 480 s.
5. Lykov, A.V. Teoreticheskie osnovy stroitelnoj teplofiziki / A.V. Lykov. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1961. – 519 s.
6. Novitskij, L.A. Teplofizicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh : spravochnik / L.A. Novitskij, I.G. Kozhevnikov. – М. : Mashinostroenie, 1975. – 216 s.
7. Peregudov, V.V. Teplovyie protsessy i ustanovki v tekhnologii stroitelnykh izdelij / V.V. Peregudov, M.I. Rogovoj. – М. : Strojizdat, 1983. – 416 s.
8. Patent na izobretenie RF № 2801079. Sposob opredeleniya kompleksa

teplozvukofizicheskikh i mekhanicheskikh kharakteristik tverdykh materialov / V.M. Fokin, A.V. Kovylin. – Prioritet izobreteniya 01.03.2023. Gos. reestr izobretenij RF 01.08.2023.

9. Patent na izobretenie RF № 2851626. Sposob opredeleniya teploprovodnosti poristogo organicheskogo materiala pri polozhitelnykh temperaturakh / N.YU. Karapuzova, V.M. Fokin, A.V. Kovylin. – Prioritet izobreteniya 11.08.2025. Gos. reestr izobretenij RF 26.11.2025.

10. Teplo i massoobmen. Teplotekhnicheskij eksperiment : spravochnik / pod obshch. red. V.A. Grigoreva, V.M. Zorina. – M. : Energoizdat, 1982. – 512 s.

11. Teplotekhnicheskij spravochnik. T. 2 / pod obshch. red. V.I. YUreneva, P.D. Lebedeva. – M. : Energiya, 1975. – 896 s.

12. Teplofizicheskie svoystva veshchestv / pod red. N.B. Vargaftika. – M.; L. : Gosenergoizdat, 1956. – 367 s.

13. Fokin, V.M. Osnovy tekhnicheskoy teplofiziki : monografiya / V.M. Fokin, G.P. Bojkov, YU.V. Vidin. – M. : Mashinostroenie-1, 2004. – 172 s.

14. Fokin, V.M. Teplozvukovaya analogiya / V.M. Fokin, A.V. Kovylin, D.G. Usadskij; pod red. d.t.n. V.M. Fokina. – SPb. : Naukoemkie tekhnologii, 2023. – 263 s.

15. Franchuk, A.U. Tablitsy teplotekhnicheskikh pokazatelej stroitelnykh materialov / A.U. Franchuk. – M. : Gosstroj SSSR; NII Strojfiziki, 1969. – 128 s.

16. SHevelkov, V.A. Teplofizicheskie kharakteristiki izolyatsionnykh materialov / V.A. SHevelkov. – M., 1958. – 96 s.

Studying Thermal Conductivity of Porous Organic Thermal Insulation Materials Using a Mathematical Experiment

N.Yu. Karapuzova, V.M. Fokin, A.A. Chebotarev, V.I. Karapuzov

Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia)

Key words and phrases: mathematical experiment; thermal conductivity; thermophysical properties of materials.

Abstract. This article is devoted to the development, research, and diagnostics of the thermophysical properties of organic porous thermal insulation materials using a mathematical experiment. The methodology for using mathematical experiments is relevant for information-measuring systems for non-destructive testing of materials, in technical thermal physics, and in building thermal engineering. The mathematical study identified parameters, dependencies, criteria, complexes, and simplexes characteristic of the process of temperature wave propagation in organic thermal insulation materials. A functional dependence for the thermal conductivity of organic porous thermal insulation materials at a given density was obtained.

© Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин, А.А. Чеботарев, В.И. Карапузов, 2026

УДК 697

Инновационные подходы к созданию систем отопления в спортивных комплексах

Е.М. Кирпичева, Г.А. Медведева

*ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ»,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
г. Казань (Россия)*

Ключевые слова и фразы: инновационные технологии; системы отопления; спортивные комплексы; энергосбережение; энергоэффективность,.

Аннотация. В данной статье рассматриваются особенности проектирования системы отопления спортивных сооружений. Спортивные объекты предъявляют высокие требования к климатическому комфорту, что обусловлено необходимостью создания оптимальных условий для спортсменов и зрителей. В работе анализируются ключевые аспекты проектирования систем отопления, включая выбор оборудования, расчет тепловых нагрузок, а также применение современных технологий и материалов. Особое внимание уделяется вопросам энергоэффективности и экологии, а также интеграции систем отопления с другими инженерными системами комплекса.

Цель работы: исследование особенностей проектирования системы отопления спортивных сооружений.

Задачи: изучить основные требования к климатическому комфорту систем отопления в спортивном комплексе; рассмотреть современные методы и технологии проектирования систем отопления, применяемые в спортивном комплексе; найти инженерные решения для управления системами отопления, которые могут повысить безопасность и комфорт посетителей.

Гипотеза исследования: внедрение современных инновационных технологий и методов в проектирование систем отопления спортивных комплексов позволит повысить их энергоэффективность, обеспечить оптимальный микроклимат и снизить эксплуатационные расходы по сравнению с традиционными системами отопления.

Результаты исследования могут быть полезны для проектировщиков, архитекторов и специалистов в обла-

сти эксплуатации спортивных сооружений, а также для студентов и аспирантов, изучающих темы, связанные с проектированием и эксплуатацией инженерных систем.

Введение

В наши дни спортивные объекты являются неотъемлемой частью инфраструктуры, необходимой для проведения соревнований и тренировок. Они создают все условия для того, чтобы спортсмены могли демонстрировать свои достижения, а зрители – получать удовольствие от просмотра. Особое внимание при создании таких комплексов уделяется системе отопления, которая должна поддерживать благоприятный температурный режим вне зависимости от времени года.

Разработка системы отопления для спортивного сооружения – задача непростая. Нужно учесть множество факторов: архитектурные и конструктивные особенности здания, предполагаемое количество посетителей, специфику мероприятий, которые будут проводиться, а также климатические особенности региона. Не менее важно обеспечить энергоэффективность системы, что отвечает современным трендам в области устойчивого развития и минимизации воздействия на окружающую среду.

Проектирование систем отопления в спортивных сооружениях учитывает требования и особенности, возникающие при использовании данных объектов. Комфортный микроклимат в спортивных залах и стадионах является обязательным условием для успешного проведения мероприятий и тренировок. Неправильная настройка системы отопления может критически повлиять на качество игр и спортивных мероприятий, создавать дискомфорт для зрителей и спортсменов. В связи с высокой посещаемостью спортивных объектов важно обеспечить не только заданные температуры, но и оптимальный уровень влажности и чистоты воздуха.

Важным аспектом проектирования является выбор надежного и экономически целесообразного оборудования. Системы отопления должны быть энергоэффективными и адаптированными для автоматического управления, что существенно облегчает эксплуатацию объектов. Использование технологий, таких как автоматизация процессов и современные теплообменные устройства, позволяет оптимизировать расходы и улучшить общую эффективность системы [1]. Планирование системы отопления должно начинаться с комплексного анализа потребностей на всех этапах – от проектирования до ухода за объектом.

При проектировании необходимо учитывать не только текущую нагрузку на систему отопления, но и возможные изменения в количестве зрительских мест или размере спортивной площади, что позволяет избежать излишних вложений в будущем [2].

Специфика воздушных потоков и распределения тепла в больших помещениях, таких как спортивные комплексы, также требует дополнительных расчетов и проработки. Потоки воздуха, генерируемые вентиляционными системами, должны интегрироваться с отопительными решениями, чтобы избежать сквозняков и поддерживать равномерное распределение тепла по всему периметру [3].

Анализ требований к системам отопления для теннисных комплексов

Проектирование систем отопления для теннисных комплексов требует учета факторов, связанных с особенностями эксплуатации данных спортивных сооружений. Ключевые



Рис. 1. Внутрипольный конвектор



Рис. 2. Центральный блок управления Ectocontrol v. 3.3

требования включают необходимость поддержания стабильной температуры и влажности, что позволяет обеспечить комфортные условия для игроков и зрителей. Невозможность игнорировать высокие потолки и объемные пространства также усложняет данный процесс. Неправильно выбранная система может привести к значительным теплопотерям, что увеличивает затраты на отопление и создает дискомфорт для пользователей [4].

Для каркасно-тентовых кортов наиболее эффективной является система воздушного отопления с приточной вентиляцией. Это решение позволяет снизить теплопотери за счет отсутствия промежуточного теплоносителя, а также обеспечивает высокую энергоэффективность и комфортный микроклимат [5].

Контроль параметров воздуха, таких как температура и уровень влажности, играет критическую роль в эксплуатации теннисных кортов. Поддержание этих параметров важно не только для комфорта участников, но и для защиты покрытия от излишней влаги и фактора износа [6]. Следует отметить, что работающая система должна быстро реагировать на изменения внешних условий, чтобы обеспечить стабильные показатели в помещении.

В современных проектах необходимо интегрировать современные технологии, которые обеспечивают не только высокую эффективность, но и простоту в обслуживании. Системы автоматического управления климатом позволяют адаптироваться к меняющимся условиям и значительно снизить расход энергетических ресурсов.

Современные технологии отопления – внутрипольные конвекторы

Внутрипольные конвекторы представляют собой современное решение для отопления, которое уже давно зарекомендовало себя в различных типах зданий, включая спортивные сооружения. Эта технология обеспечивает комфортный климат, оптимизируя распределение тепла без использования громоздких элементов, таких как стандартные радиаторы. Внутрипольные конвекторы встраиваются непосредственно в пол и, как правило, оснащаются решетками, которые позволяют воздуху свободно циркулировать, пре-

дотвращая образование сквозняков и обеспечивая равномерную теплоотдачу [7].

Одним из основных преимуществ внутрипольных конвекторов является их эстетическая неприметность, что особенно важно для спортивных комплексов, где внимание направлено на зрелищность и функциональность пространства. Системы, работающие на базе таких конвекторов, применяют как водяное, так и электрическое отопление, обязывая проектировщиков учитывать специфические условия эксплуатации этих систем [7].

Установка таких конвекторов в спортивных сооружениях требует особого подхода. В условиях высокой посещаемости крайне важно обеспечить надежную работу этой системы. Необходимо учитывать не только теплоотдачу конвекторов, но и их способность выдерживать большие нагрузки, внешние воздействия и эффект быстро изменяющихся температур в зависимости от времени суток и количества людей в помещении. В этом контексте мощность внутрипольных конвекторов должна варьироваться в зависимости от площади и высоты помещения; общепринятой нормой считается 100 Вт на квадратный метр в условиях стандартной высоты.

Внутрипольные конвекторы также обеспечивают более быстрое реагирование на изменения температуры в помещении. Это свойство критически важно в спортивных залах, где внезапные колебания температуры могут негативно сказаться на комфорте спортсменов и зрителей. В отличие от традиционных радиаторов, которые могут требовать значительного времени для достижения нужной температуры, конвекторы позволяют добиться желаемого результата почти мгновенно [7].

Специфика установки внутрипольных конвекторов также включает в себя возможность интеграции с другими системами инженерии. В спортивных сооружениях установка конвекторов часто сопряжена с необходимостью применения обогрева полов в помещениях с повышенной влажностью, например, в душевых и раздевалках. Стремительное технологическое развитие позволяет использовать такие конвекторы вместе с системами вентиляции для обеспечения идеального микроклимата.

Не следует забывать и о том, что внутрипольные конвекторы требуют качественного обслуживания и регулярной проверки состояния. Это не только продлевает срок службы системы, но и обеспечивает ее эффективность. Регулярный профилактический осмотр и чистка решеток от пыли и загрязнений повышают уровень тепловой отдачи и уменьшают вероятность поломок [7].

Инженерные решения управления системами

Современные системы управления отоплением становятся многофункциональными и гибкими инструментами, которые способны адаптироваться под разнообразные условия эксплуатации объектов. Можно выделить внедрение автоматизированных систем, которые оптимизируют не только температурные режимы, но и общую безопасность помещений. Использование платформ, подобных *ectoControl*, позволяет контролировать отопление, управление электросетью и защиту от форс-мажорных ситуаций, таких как протечки и задымление, что крайне актуально в условиях массовых мероприятий и спортивных событий.

Способы удаленного управления, внедряемые в системы, активно способствуют повышению удобства. Интерактивные интерфейсы и приложения дают возможность настраивать параметры в режиме реального времени, что важно для обеспечения соответствующих температурных условий в спортивных залах и зрительских секторах. Некоторые системы предлагают возможность интеграции с интеллектуальными устройствами, такими

как сенсоры для контроля температуры и качества воздуха, что дополнительно повышает энергоэффективность объектов [8].

Заключение

В заключение можно подвести итоги, касающиеся проектирования систем отопления спортивных сооружений. Проектирование систем отопления для таких объектов требует особого внимания к множеству факторов, включая специфику использования, высокую посещаемость и необходимость обеспечения комфортных условий для зрителей и спортсменов.

Во-первых, анализ требований к системам отопления для теннисных комплексов показал, что необходимо учитывать не только температурные режимы, но и особенности конструкции зданий, а также их функциональное назначение. Спортивные сооружения, как правило, имеют большие объемы и высокие потолки, что требует применения современных технологий, способных обеспечить равномерное распределение тепла. В этом контексте внутрипольные конвекторы представляют собой оптимальное решение, так как они не только эффективно обогревают пространство, но и не занимают полезную площадь, что особенно важно для спортивных объектов.

Подбор оборудования для спортивных объектов требует особого подхода. Необходимо учитывать не только технические характеристики, но и специфические требования, связанные с эксплуатацией. Надежность и эргономичность работы систем отопления напрямую влияют на общую эффективность функционирования спортивного комплекса. Важно, чтобы оборудование соответствовало современным стандартам и обеспечивало высокую степень автоматизации процессов.

Современные инженерные решения для управления системами отопления также заслуживают внимания. Использование автоматизированных систем управления позволяет значительно повысить уровень безопасности и комфорта. Такие решения обеспечивают возможность оперативного реагирования на изменения в условиях эксплуатации, что особенно важно в условиях высокой динамики спортивных мероприятий.

Литература

1. Сканава, А.Н. Отопление : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению «Строительство» / А.Н. Сканава. – М. : АСВ, 2002. – 576 с.
2. Балашов, А.А. Проектирование систем отопления и вентиляции зданий : учеб. пособие / А.А. Балашов, Н.Ю. Полунина. – Тамбов : ТГТУ, 2014. – 132 с.
3. Каменев, П.Н. Вентиляция : учеб. пособие; изд. 2-е, испр. и доп. / П.Н. Каменев, Е.И. Тертичник. – М. : АСВ, 2011. – 632 с.
4. Чайковский, Г.П. Отопление и вентиляция здания : учеб. пособие / Г.П. Чайковский, А.В. Путько. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2003. – 70 с.
5. Корнилов, А.А. Воздушное отопление как современная система отопления жилых домов и общественных зданий / А.А. Корнилов // Вестник магистратуры. – М. – 2018. – № 1-3(76). – С. 57–63.
6. Падалка, Д.Г. Отопление: от А до Я. / Д.Г. Падалка. – К. : Диалог-Пресс, 2008. – 44 с.
7. Пухкал, В.А. Особенности проектирования систем водяного отопления с внутрипольными конвекторами / В.А. Пухкал // АВОК. – М. – 2017. – № 7. – С. 24–26.

8. Мухина, А.О. Энергоэффективные решения для поддержания микроклимата в крытом бассейне детского лагеря / А.О. Мухина, Г.А. Медведева // Components of scientific and technological progress. – 2025. – № 4(106). – С. 15–21.

References

1. Skanavi, A.N. Otoplenie : учебник dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po napravleniyu «Stroitelstvo» / A.N. Skanavi. – М. : ASV, 2002. – 576 s.
2. Balashov, A.A. Proektirovanie sistem otopleniya i ventilyatsii zdaniy : ucheb. posobie / A.A. Balashov, N.YU. Polunina. – Tambov : TGTU, 2014. – 132 s.
3. Kamenev, P.N. Ventilyatsiya : ucheb. posobie; izd. 2-e, ispr. i dop. / P.N. Kamenev, E.I. Tertchnik. – М. : ASV, 2011. – 632 s.
4. CHajkovskij, G.P. Otoplenie i ventilyatsiya zdaniya : ucheb. posobie / G.P. CHajkovskij, A.V. Putko. – Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2003. – 70 s.
5. Kornilov, A.A. Vozdushnoe otoplenie kak sovremennaya sistema otopleniya zhilykh domov i obshchestvennykh zdaniy / A.A. Kornilov // Vestnik magistratury. – М. – 2018. – № 1-3(76). – С. 57–63.
6. Padalka, D.G. Otoplenie: ot A do YA. / D.G. Padalka. – К. : Dialog-Press, 2008. – 44 s.
7. Pukhkal, V.A. Osobennosti proektirovaniya sistem vodyanogo otopleniya s vnutripolnymi konvektorami / V.A. Pukhkal // AVOK. – М. – 2017. – № 7. – С. 24–26.
8. Mukhina, A.O. Energoeffektivnye resheniya dlya podderzhaniya mikroklimate v krytom bassejne detskogo lagerya / A.O. Mukhina, G.A. Medvedeva // Components of scientific and technological progress. – 2025. – № 4(106). – С. 15–21.

Innovative Approaches to the Development of Heating Systems in Sports Complexes

E.M. Kirpicheva, G.A. Medvedeva

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI;
Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan (Russia)*

Key words and phrases: innovative technologies; heating systems; sports complexes; energy efficiency; energy conservation.

Abstract. This article discusses the features of designing heating systems for sports facilities. Sports venues impose high requirements on climatic comfort, which is driven by the need to create optimal conditions for athletes and spectators. The paper analyzes key aspects of designing heating systems, including equipment selection, calculation of thermal loads, and the application of modern technologies and materials. Special attention is given to issues of energy efficiency and ecology, as well as the integration of heating systems with other engineering systems of the complex.

The study aims to investigate the features of designing heating systems for sports facilities.

The research tasks are to study the main requirements for climatic comfort in heating systems within sports complexes; to examine modern methods and technologies used in the design of heating systems for sports facilities; to find engineering solutions for managing heating systems that can enhance safety and comfort for visitors.

The research hypothesis suggests that the implementation of modern innovative technologies and methods in the design of heating systems for sports complexes will improve their energy efficiency, ensure an optimal microclimate, and reduce operational costs compared to traditional heating systems.

The research results may be useful for designers, architects, and specialists in the operation of sports facilities, as well as for students and graduate students studying topics related to the design and operation of engineering systems.

© Е.М. Кирпичева, Г.А. Медведева, 2025

УДК 620.9:621.4

Исследование влияния водородного топлива на характеристики горения в газотурбинных установках

Я.А. Субботин, И.А. Обиднов, А.И. Жупанов,
А.В. Ковылин

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

Ключевые слова и фразы: водородное топливо; выбросы NO_x ; газотурбинная установка; горение; декарбонизация; «зеленый» водород; камера сгорания; устойчивость пламени; энергетический переход.

Аннотация. В связи с глобальным переходом к углеродной нейтральности использование «зеленого» водорода в газотурбинных установках (ГТУ) представляет собой перспективный, но технически сложный путь декарбонизации энергетики. Задачей исследования является анализ влияния водородного топлива на процесс горения в ГТУ. Гипотеза работы предполагает, что использование водорода требует глубокой модернизации ГТУ из-за его уникальных физико-химических свойств, кардинально отличающихся от свойств метана. Методами сравнительного анализа и расчетов относительных параметров установлено, что скорость горения водорода в 7,11 раза выше, а энергия зажигания в 14,5 раза ниже, чем у метана, а температура пламени на 450 °С выше, что ведет к росту выбросов NO_x . Результаты подтверждают необходимость адаптации камер сгорания с использованием технологий предварительного смешивания, рециркуляции отработавших газов (EGR) и ступенчатого сжигания для создания надежных и экологичных водородных ГТУ.

Введение

Газотурбинные установки (ГТУ) играют ключевую роль в современных энергосистемах благодаря высокому КПД, быстрому запуску и гибкости, особенно в условиях роста доли переменных возобновляемых источников энергии. Переход к углеродной нейтральности делает актуальным использование «зеленого» водорода – топлива, при сгорании которого не образуется CO_2 . Однако замена природного газа на водород сопряжена с серьезными техническими вызовами. Высокая скорость горения, низкая энергия зажигания и широкие

пределы воспламеняемости H_2 увеличивают риски *flashback*, акустических колебаний и образования оксидов азота. Уже при содержании 10–20 % водорода в топливной смеси требуются доработки систем подачи и управления; использование чистого водорода – полная модернизация камеры сгорания. Настоящее исследование анализирует влияние водорода на процессы горения в ГТУ и оценивает пути адаптации оборудования. Цель – обосновать научно-технические подходы к созданию надежных и экологичных «водород-совместимых» ГТУ.

Физико-химические свойства водородного топлива и их отличие от природного газа

Водород обладает рядом уникальных характеристик, отличающих его от метана. Нормальная скорость горения водорода (~3,2 м/с) превышает таковую у метана более чем в 7 раз, что усиливает риск *flashback*. Энергия зажигания H_2 (0,02 мДж) в 14 раз ниже, чем у метана (0,29 мДж), а пределы воспламеняемости (4–75 %) значительно шире (у метана – 5–15 %), что повышает взрывоопасность. Несмотря на высокую массовую теплоту сгорания (~120 МДж/кг против ~50 МДж/кг у метана), объемная энергоемкость водорода в три раза меньше, что требует увеличения расхода топлива и модернизации топливных систем. Высокая теплопроводность (в 8 раз выше, чем у метана) влияет на теплообмен и стабильность пламени. Эти особенности приводят к росту температуры адиабатического пламени (до ~2400 °С против ~1950 °С у метана), что усиливает образование термических NO_x и провоцирует нестабильность горения [1; 2].

Влияние водорода на характеристики процесса горения в ГТУ

Использование водорода кардинально изменяет параметры горения в ГТУ. Высокая скорость горения способствует полному выгоранию топлива, однако значительно повышает риск *flashback*, особенно в диффузионных и слабо предварительно смешанных системах, что может привести к повреждению форсунок и жаровых труб. Низкая энергия зажигания и высокая диффузия H_2 делают процесс горения чувствительным к малым возмущениям, что способствует возникновению акустических нестабильностей: самоподдерживающихся колебаний давления, вызывающих вибрации и усталостные повреждения конструкций. Критическим фактором является рост температуры пламени, достигающей 2400 °С. Это приводит к значительному увеличению выбросов NO_x , что снижает экологическую эффективность даже при отсутствии CO_2 . Кроме того, низкая объемная энергоемкость требует увеличения массового расхода топлива, нагружая компрессор, топливные насосы и коллекторы. Высокая теплопроводность усложняет анкеровку пламени и стабилизацию режимов работы. Таким образом, внедрение водорода связано с комплексом взаимосвязанных явлений, требующих системных инженерных решений для обеспечения безопасности, устойчивости и экологичности ГТУ.

Инженерные решения и перспективы развития газотурбинных установок

Внедрение водородного топлива в газотурбинные установки сопряжено с рядом фундаментальных технических вызовов, обусловленных существенными отличиями физико-химических свойств водорода от природного газа. Для обеспечения безопасной, устойчивой и экологически эффективной работы ГТУ при использовании «зеленого» водорода в

чистом виде или в составе топливных смесей требуется комплексная модернизация ключевых систем, прежде всего камеры сгорания, системы подачи топлива и системы управления процессом горения [3].

Одним из главных рисков при сжигании водорода является обратное распространение пламени (*flashback*), связанное с высокой нормальной скоростью горения H_2 (~3,2 м/с против ~0,45 м/с у метана). Этот эффект особенно опасен в диффузионных и слабо предварительно смешанных камерах сгорания, где пламя может проникнуть в топливный коллектор, вызывая повреждение оборудования.

Снижение выбросов оксидов азота (NO_x). Основной причиной роста выбросов при сжигании водорода является высокая температура адиабатического пламени, достигающая ~2400 °С (против ~1950 °С у метана). При таких температурах интенсивно протекает термический механизм образования NO_x по реакции Зельдовича: $N_2 + O = NO + N$; $N + O_2 = NO + O$ [4].

Для подавления этого процесса можно использовать:

- рециркуляцию отработавших газов, суть которой заключается в добавление инертных газов (в основном N_2 и CO_2) в камеру сгорания, которое помогает в снижении пиковой температуры и концентрации кислорода, замедляя образование NO_x ;
- ступенчатое сжигание – подача топлива и воздуха в несколько этапов, позволяет снизить температуру в первичной зоне горения.

Низкая энергия зажигания водорода (0,02 мДж против 0,29 мДж у метана) и высокая диффузия делают процесс горения крайне чувствительным к малым возмущениям. Это может привести к возникновению акустических нестабильностей – самовозбуждающихся колебаний давления в камере сгорания, которые вызывают механические вибрации, усталостные повреждения и выход оборудования из строя.

Сравнительный анализ ключевых свойств топлива.

1. Относительная скорость горения:

$$K_V = V_{H_2} / V_{CH_4} = 3,2 / 0,45 = 7,11.$$

Скорость распространения пламени водорода в 7,11 раза выше, чем у метана.

2. Относительная чувствительность к воспламенению:

$$K_{Eign} = Eign_{H_2} / Eign_{CH_4} = 0,29 / 0,02 = 14,5.$$

Водород воспламенить в 14,5 раза легче, чем метан.

3. Относительная массовая энергоемкость:

$$K_{Q_m} = Q_{mH_2} / Q_{mCH_4} = 120 / 50 = 2,4.$$

Удельная теплота сгорания водорода по массе в 2,4 раза выше, чем у метана.

4. Относительная объемная энергоемкость:

$$K_{Q_v} = Q_{vCH_4} / Q_{vH_2} = 35,28 / 10,8 = 3,27.$$

Удельная теплота сгорания метана по объему (при н.у.) в 3,27 раза выше, чем у водорода.

5. Соотношение массовой и объемной энергии (фактор плотности энергии), кг/м³:

Таблица 1. Сравнение основных физико-химических характеристик водорода и метана

Параметр	Водород (H ₂)	Метан (CH ₄)
Нормальная скорость горения, м/с	3,2	0,45
Температура адиабатического пламени, °С	2400	1950
Энергия зажигания, мДж	0,02	0,29
Пределы воспламеняемости, % об.	4-75	5-15
Массовая теплота сгорания, МДж/кг	120	50
Объемная теплота сгорания, МДж/м ³ (н.у.)	10,8	35,28
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,18	0,023

$$\rho_{A_{H_2}} = Q_m / Q_v = 120 / 10,8 = 11,11;$$

$$\rho_{A_{CH_4}} = Q_m / Q_v = 50 / 35,28 = 1,42.$$

6. Относительная теплопроводность:

$$K_\lambda = \lambda_{H_2} / \lambda_{CH_4} = 0,18 / 0,023 = 7,83.$$

Теплопроводность водорода в 7,83 раза выше, чем у метана.

7. Разница температур горения, °С:

$$\Delta T = T_{H_2} - T_{CH_4} = 2400 - 1950 = 450.$$

Адиабатическая температура пламени водорода на 450 °С выше, чем у метана [2–5].

Вопросы по влиянию водородного топлива на характеристики в газотурбинных установках освещены в литературе [1–5].

Выводы

Внедрение «зеленого» водорода в газотурбинные установки – перспективный, но сложный путь декарбонизации. Отличия водорода от природного газа (высокая скорость горения, низкая энергия зажигания) создают риски: обратная вспышка пламени, нестабильность горения и рост выбросов оксидов азота (NO_x). Низкая объемная энергоемкость водорода требует модернизации топливных систем и увеличивает нагрузку на компоненты ГТУ. Для решения этих проблем необходима адаптация камер сгорания с использованием технологий предварительного смешивания, рециркуляции газов (EGR) и ступенчатого сжигания. Таким образом, переход на водород требует глубокой модернизации ГТУ, а не простой замены топлива, что формирует основу для создания безопасных и экологичных энергосистем будущего.

Литература

1. Ковылин, А.В. Топливо и теория горения / А.В. Ковылин, Д.Г. Усадский, В.И. Ле-

пилов. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2024. – 196 с. – EDN EZFJIY.

2. Ковылин, А.В. Теория горения / А.В. Ковылин, В.И. Лепилов. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2022. – 161 с. – EDN HIYEWC.

3. Маслов, А.Д. Исследование эффективности работы котла-утилизатора / А.Д. Маслов, А.А. Коноваленко, А.И. Жупанова, А.В. Ковылин // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 1(103). – С. 8–13.

4. Кулешов, Н.В. Водородная энергетика : учебник / Н.В. Кулешов, С.К. Попов, С.В. Захаров [и др.]. – М. : НИУ МЭИ, 2021. – 548 с.

5. Мельников, Е.В. Исследование материалов и процессов обогрева и теплоизоляции трубопроводов горячего и холодного водоснабжения, тепловых сетей, газопроводов / Е.В. Мельников, А.В. Ковылин // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 4(82). – С. 31–35.

References

1. Kovylin, A.V. Topливо i teoriya gorenija / A.V. Kovylin, D.G. Usadskij, V.I. Lepilov. – Volgograd : Volgogradskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2024. – 196 s. – EDN EZFJIY.

2. Kovylin, A.V. Teoriya gorenija / A.V. Kovylin, V.I. Lepilov. – Volgograd : Volgogradskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2022. – 161 s. – EDN HIYEWC.

3. Maslov, A.D. Issledovanie effektivnosti raboty kotla-utilizatora / A.D. Maslov, A.A. Konovalenko, A.I. Zhupanova, A.V. Kovylin // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 1(103). – S. 8–13.

4. Kuleshov, N.V. Vodorodnaya energetika : uchebnik / N.V. Kuleshov, S.K. Popov, S.V. Zakharov [i dr.]. – M. : NIU MEI, 2021. – 548 s.

5. Melnikov, E.V. Issledovanie materialov i protsessov obogreva i teploizolyatsii truboprovodov goryachego i kholodnogo vodosnabzheniya, teplovykh setej, gazoprovodov / E.V. Melnikov, A.V. Kovylin // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 4(82). – S. 31–35.

Investigation of the Effect of Hydrogen Fuel on Combustion Characteristics in Gas Turbine Installations

Ya.A. Subbotin, I.A. Obidnov, A.I. Zhupanova, A.V. Kovylin

*Volgograd State Technical University,
Volgograd (Russia)*

Key words and phrases: hydrogen fuel; gas turbine installation; combustion; NO_x emissions; decarbonization; “green” hydrogen; combustion chamber; flame stability; energy transition.

Abstract. Due to the global transition to carbon neutrality, the use of “green” hydrogen in gas turbine installations (GTI) represents a promising but technically challenging way to decarbonize energy. The objective of the study is to analyze the effect of hydrogen fuel on the combustion process in the gas turbine engine. The hypothesis of the work suggests that the use of hydrogen

requires a deep modernization of the GTI due to its unique physico-chemical properties, radically different from those of methane. Comparative analysis and calculations of relative parameters have shown that the combustion rate of hydrogen is 7.11 times higher, and the ignition energy is 14.5 times lower than that of methane, and the flame temperature is 450 °C higher, which leads to an increase in NO_x emissions. The results confirm the need to adapt combustion chambers using premixing, exhaust gas recirculation (**EGR**) and step-by-step combustion technologies to create reliable and environmentally friendly hydrogen gas turbine engines.

© Я.А. Субботин, И.А. Обиднов, А.И. Жупанов, А.В. Ковылин, 2025

УДК 532.529; 678.742.2

Сравнительный анализ моделей Стокса и Осеена для расчета седиментационного диаметра частиц СВМПЭ

И.В. Тертишников, И.А. Беляков, В.С. Симаков

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

Ключевые слова и фразы: дисперсный состав; модель Осеена; модель Стокса; осаждение частиц; сверхвысокомолекулярный полиэтилен; седиментационный диаметр; функция распределения; число Рейнольдса.

Аннотация. Исследована применимость моделей Стокса и Осеена для расчета седиментационного диаметра частиц сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Цель: сопоставить точность моделей и построить функцию распределения частиц по размерам. В задачи входило: провести седиментационный анализ СВМПЭ; построить экспериментальную функцию распределения частиц по диаметрам; рассчитать скорости оседания по моделям Стокса и Осеена; сопоставить расчетные и экспериментальные данные. Гипотеза исследования: модель Осеена точнее описывает седиментацию частиц СВМПЭ, чем модель Стокса. Работа выполнена методами седиментационного анализа в гравитационном поле, расчета скоростей оседания (Стокса и Осеена), построения кривых распределения частиц и статистической обработки данных. Результаты: получена функция распределения частиц СВМПЭ по седиментационному диаметру; подтверждено, что модель Осеена лучше соответствует экспериментальным данным для частиц размером 1–10 мкм.

Седиментационный диаметр частиц – это диаметр шара, скорость оседания и плотность которого равны скорости оседания и плотности исследуемой частицы неправильной формы. Данный диаметр определяется морфологическими свойствами частиц, включая форму, структуру и характерные размеры. Эти параметры учитываются в уравнениях динамики, связывающих силу сопротивления среды, силу тяжести и инерционные эффекты.

Для сферических частиц в ламинарном режиме $Re < 1$ сила сопротивления описывается законом Стокса [1]:

$$F_c = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_c \cdot v, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость среды, Па·с; d_c – седиментационный диаметр частицы, м; v – скорость оседания исследуемой частицы, м/с.

При учете инерционных сил в переходном режиме $1 < Re < 6$ применяется модификация Осеена [1]:

$$F_o = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_c \cdot v \cdot (1 + 3/8 Re), \quad (2)$$

число Рейнольдса Re определяется:

$$Re = (\rho_B \cdot v \cdot d_c) / \mu, \quad (3)$$

где ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

Сила тяжести, действующая на частицу, определяется по второму закону Ньютона:

$$F_T = 1/6 \cdot \pi \cdot d^3 \cdot g \cdot (\rho_c - \rho_B), \text{ Н}, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_c – плотность исследуемых частиц, кг/м³.

Классическая модель седиментации по Стоксу обеспечивает высокую точность лишь для сферических частиц при крайне малых числах Рейнольдса ($Re \ll 1$) [1]. В реальных дисперсных системах (промышленные аэрозоли, пылевые облака, полимерные взвеси) ее применение ограничено: частицы имеют сложную геометрию, а диапазон Re обычно составляет $0,1 < Re < 10$, что приводит к систематическим погрешностям при расчете седиментационного диаметра d_c . Погрешности обусловлены двумя ключевыми факторами.

Во-первых, модель идеализирует форму частиц, предполагая строго сферическую конфигурацию. В действительности частицы отклоняются от сферичности, обладают шероховатостью поверхности и анизометрией, что искажает оценку силы сопротивления: гидродинамическое поведение несферических частиц не описывается аналитическими решениями для шара. Для корректных расчетов необходимо вводить поправочные коэффициенты, учитывающие фактор формы и ориентацию в потоке [2]. При использовании формулы Стокса отклонение от сферичности может завышать расчетную скорость оседания на 20–40 % [3].

Во-вторых, модель не учитывает инерционные эффекты: при $Re > 0,1$ вклад инерционных сил в общее сопротивление становится значимым, но остается неучтенным. Для умеренных значений Re (до 10) применяют модель Осеена, вводящую корректирующий множитель $(1 + 8/3Re)$ в выражение для силы сопротивления. Это позволяет снизить погрешность расчета d_c при $Re > 1$ и учесть нелинейный рост сопротивления с увеличением скорости осаждения v [4]. Практическая применимость модели Осеена для дисперсных полимерных систем подтверждена для частиц диаметром 10–200 мкм в воздушной среде [1].

Требуется провести сравнительный расчет седиментационного диаметра d_c частиц СВМПЭ по моделям Стокса и Осеена, продемонстрировав расхождение результатов зависимости от Re и v , определить область применимости каждой модели частиц СВМПЭ в воздушной среде, а также обосновать необходимость учета инерционных поправок при $Re > 1$.

При стационарном осаждении частицы в вязкой среде уравниваются силы тяже-



Рис. 1. Фото экспериментальной установки по определению скорости оседания: 1 – седиментатор в виде пластин, на которые осаждаются частицы; 2 – пластина, на которую помещают навеску пыли перед началом эксперимента; 3 – купол с трубкой, с помощью которых пыль приводится во взвешенное состояние для проведения эксперимента

сти F_T и силы сопротивления, описываемые формулой Стокса и Осеена. Для выражения седиментационного диаметра из условия равновесия сил исходное уравнение с применением закона динамики частиц по Стоксу принимает вид:

$$3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_c \cdot v = 1/6 \cdot \pi \cdot d_c^3 \cdot g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}}), \quad (5)$$

отсюда:

$$d_c = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot v}{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}})}}. \quad (6)$$

Для выражения седиментационного диаметра из условия равновесия исходное уравнение с применением закона динамики частиц по Осеену принимает вид [5]:

$$3\mu d_c v \left(1 + \frac{3\rho_{\text{в}} v d_c}{8\mu} \right) = \frac{1}{6} \pi d_c^3 g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}}). \quad (7)$$

Приводим к каноническому виду квадратного уравнения:

$$d_c^2 - \frac{27\rho_{\text{в}} v^2}{4g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}})} d_c - \frac{18\mu v}{g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}})} = 0.$$

Решим уравнение общепринятым способом при условии $d_c > 0$.

Уравнение имеет единственный корень:

$$d_c = \frac{27\rho_{\text{в}} v^2 + \sqrt{729\rho_{\text{в}}^2 v^4 + 1152\mu v g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}})}}{8g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}})}. \quad (8)$$

Для определения скорости оседания запроектирована и реализована эксперимен-

Таблица 1. Геометрические и аэродинамические характеристики частиц

Образцы с пластины №1			Образцы с пластины №2			Образцы с пластины №3		
1	2	3	1	2	3	1	2	3
v , м/с	$d_э$, мкм	%	v , м/с	$d_э$, мкм	%	v , м/с	$d_э$, мкм	%
0,570-0,490	500-600	6,45	0,474-0,403	300-400	31,13	0,397-0,345	200-300	3,25
	600-700	29,03		400-500	50,94		300-400	35,77
	700-800	41,94		500-600	11,32		400-500	16,26
	800-900	22,58		600-700	3,70		500-600	23,58
	-	-		700-800	2,80		600-700	21,14
Образцы с пластины №4			Образцы с пластины №5			Образцы с пластины №6		
1	2	3	1	2	3	1	2	3
v , м/с	$d_э$, мкм	%	v , м/с	$d_э$, мкм	%	v , м/с	$d_э$, мкм	%
0,340-0,297	200-300	15,38	0,377-0,340	300-400	43,36	0,335-0,294	200-300	13,41
	300-400	41,03		400-500	28,32		300-400	49,39
	400-500	19,66		500-600	12,39		400-500	14,63
	500-600	16,24		600-700	15,93		500-600	14,63
	600-700	7,69		-	-		600-700	7,93

тальная установка, общий вид которой представлен на рис. 1. Она состоит из трех частей: пусковой механизм, тело трубы и седиментатор, где исследуемый материал осаждается внутри стеклянной трубы и далее оседает на пластины, которые закрываются во время эксперимента с определенным интервалом времени.

Для осевших на пластины частиц далее проводится исследование дисперсного анализа с учетом [6–8]. Данный оптический метод подразумевает использование микроскопа и применение компьютерной обработки. На предметное стекло наносятся частицы пыли и производится серия снимков. Изображения в черно-белом виде затем загружаются в специализированное программное обеспечение для анализа и проведения цифровой обработки с дальнейшими результатами о каждой частице. Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 1.

В табл. 1 представлены результаты геометрических и аэродинамических характеристик частиц СВМПЭ, в которой указана скорость оседания v (м/с), эквивалентный диаметр $d_э$ (мкм) и процентное содержание частиц в исследуемом образце, которое также представлено на рис. 2. На рис. 3 представлена функция распределения частиц по эквивалентному диаметру, которая указывает процентное содержание частиц, диаметр которых меньше, к общему количеству материала.

По результатам дисперсионного анализа и измерений скорости оседания шести образцов СВМПЭ выявлена прямая зависимость между размером частиц и скоростью их оседания: образцы 1–2, содержащие преимущественно частицы размером 500–900 мкм, демонстрируют наибольшие скорости оседания в диапазоне 0,403–0,570 м/с, тогда как образцы 3–6 с преобладанием частиц 200–700 мкм характеризуются пониженными скоростями оседания – 0,294–0,397 м/с. Анализ гранулометрического состава показал существенную неоднородность образцов: образец 1 отличается резко выраженной крупно-

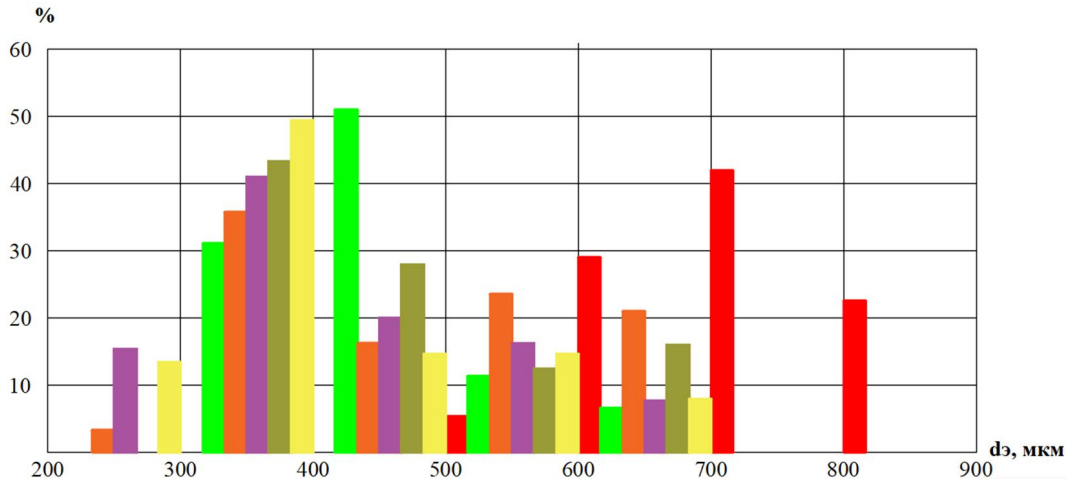


Рис. 2. Процентное содержание исследуемых частиц каждого образца:
 — образцы с пластины № 1; — образцы с пластины № 2;
 — образцы с пластины № 3; — образцы с пластины № 4;
 — образцы с пластины № 5; — образцы с пластины № 6

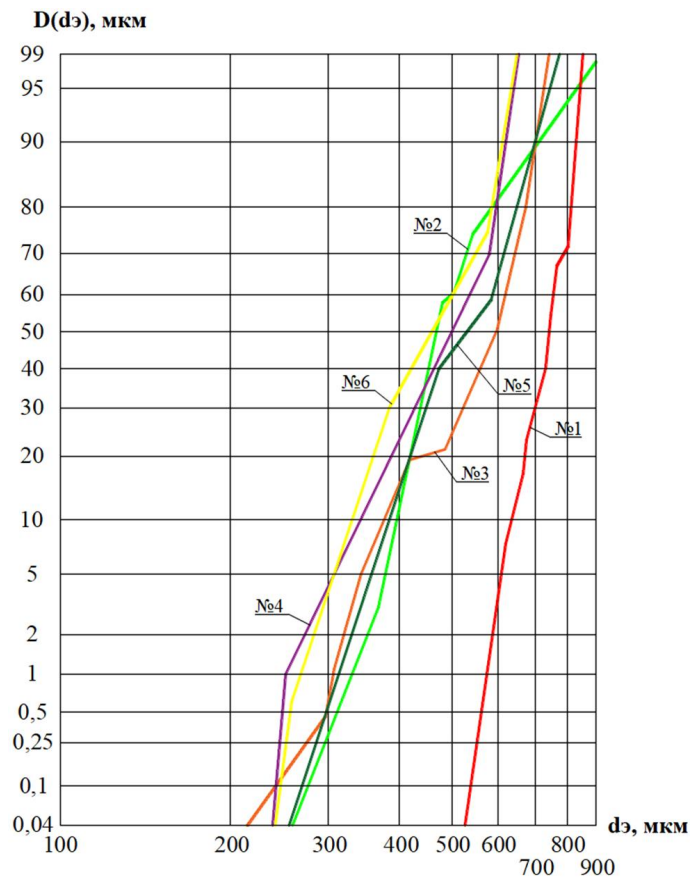


Рис. 3. Функция распределения размеров частиц СВМПЭ:
 — образцы с пластины № 1; — образцы с пластины № 2;
 — образцы с пластины № 3; — образцы с пластины № 4;
 — образцы с пластины № 5; — образцы с пластины № 6

Таблица 2. Геометрические и аэродинамические характеристики частиц СВМПЭ по классическим моделям Стокса и Осеена

Образцы с пластины	d _э , мкм	v, м/с	d _о (Осеен), мкм	d _с (Стокс), мкм	Re(Осеен)	Re(Стокс)
№1	589,8-902,6	0,49-0,57	269,7-338,4	129,9-140,1	8,8-12,9	4,3-5,3
№2	299,0-759,6	0,40-0,47	207,1-257,3	117,8-127,7	5,6-8,1	3,2-4,1
№3	250,0-700,6	0,34-0,40	171,8-203,2	109,0-116,9	3,9-5,4	2,5-3,1
№4	243,1-661,8	0,30-0,34	146,1-169,0	101,1-108,2	2,9-3,8	2,0-2,4
№5	277,1-696,6	0,34-0,38	169,0-190,7	108,2-113,9	3,8-4,8	2,4-2,9
№6	246,1-665,5	0,29-0,33	144,6-166,2	100,6-107,4	2,8-3,7	2,0-2,4

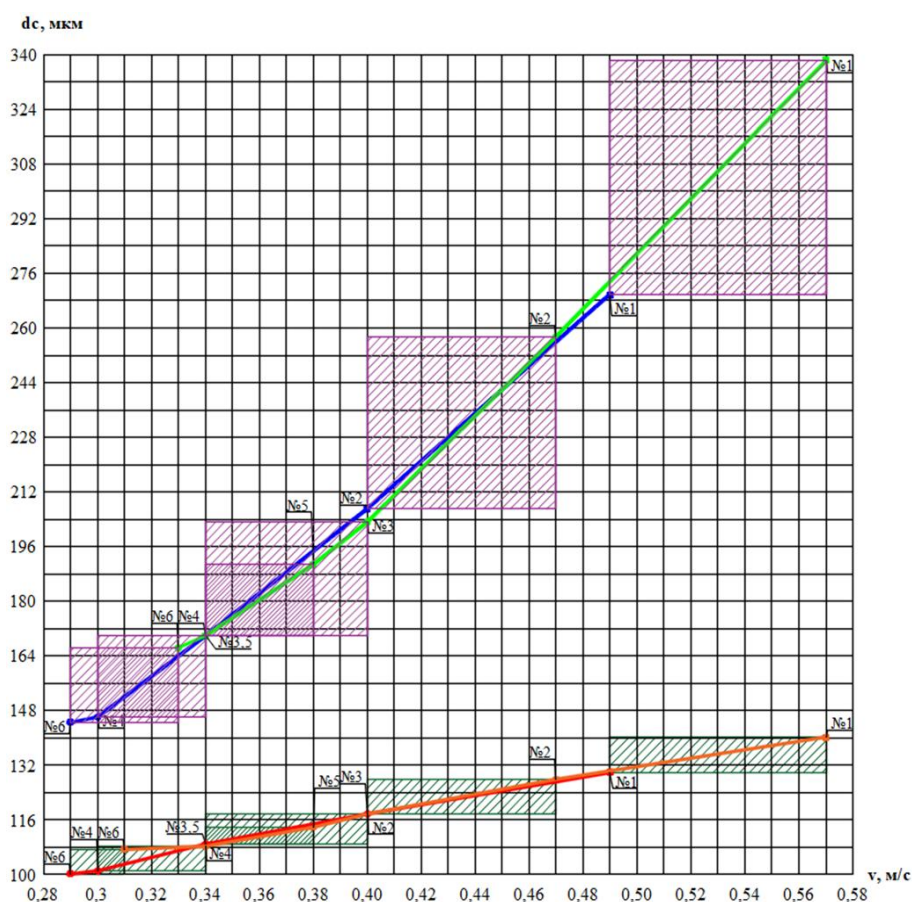


Рис. 4. Зависимость скорости осаждения от седиментационного диаметра моделям Стокса и Осеена: — зависимость максимальных значений по Стоксу; — зависимость минимальных значений по Стоксу; — зависимость минимальных значений по Осеену; — зависимость максимальных значений по Осеену; № 1–6 – номер образцов частиц взятых с седиментатора

дисперсностью с доминирующей фракцией 700–800 мкм (41,94 %) и суммарной долей частиц крупнее 500 мкм на уровне 96,77 %; образец 2 занимает промежуточное положение с выраженным пиком в диапазоне 400–500 мкм (50,94 %) и значительной долей частиц 300–400 мкм (31,13 %); образцы 3–6 характеризуются более равномерным распре-

делением с устойчивым пиком в диапазоне 300–400 мкм (35,77–49,39 %) и существенной долей частиц размером 400–600 мкм. На основании совокупности характеристик образцы сгруппированы в две основные категории: крупнодисперсные (образцы 1–2) с преобладанием частиц крупнее 500 мкм и высокими скоростями оседания, а также средне- и мелкодисперсные (образцы 3–6), где доминируют частицы размером 300–500 мкм при пониженных скоростях оседания; при этом образец 1 резко выделяется преобладанием крупных фракций (700–900 мкм), образец 2 занимает промежуточную позицию с пиком 400–500 мкм, а образцы 3–6 демонстрируют сходные профили распределения с пиком в диапазоне 300–400 мкм.

Проведем сравнительный анализ седиментационного диаметра d_c частиц СВМПЭ по классическим моделям Стокса и Осеена на основе полученных данных скорости оседания и дисперсного анализа частиц по формулам (6) и (8). Сведем полученные результаты в табл. 2.

Зависимость v от d_c изображена на рис. 4. По результатам дисперсионного анализа частиц СВМПЭ установлено, что их распределение по размерам соответствует нормальному (Гауссову) распределению. Седиментационный анализ частиц СВМПЭ по классической формуле Стокса методически необоснован: в исследуемом диапазоне погрешность расчета седиментационного диаметра достигает 40–140 % относительно данных метода Осеена [9; 10]. Причина – игнорирование инерционных эффектов, которые становятся определяющими при росте скорости оседания и размера частиц.

Литература

1. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
2. Фигуровский, Н.А. Основы седиментационного анализа / Н.А. Фигуровский. – М. : Наука, 1970.
3. Готлибов, И.И. Седиментационный анализ в коллоидной химии / И.И. Готлибов. – М. : Химия, 1985.
4. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика : 2-е изд., доп. и перераб. / В.Г. Левич. – М. : Физматгиз, 1959. – 699 с.
5. Истомин, В.Л. Методика определения аэродинамического диаметра аэрозольных частиц сложной геометрической формы в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,1 до 6,0 / В.Л. Истомин, К.П. Куценогий // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17. – № 1. – С. 77–83.
6. Азаров, В.Н. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) / В.Н. Азаров, Н.М. Сергина; Волгогр. гос. арх-стронт. акад. – Волгоград, 2002. – Деп. в ВИНТИ 15.07.2002 № 1332-80002. – 7 с.
7. Азаров, В.Н. О совершенствовании алгоритма компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде / В.Н. Азаров, В.А. Ребров, Е.Ю. Козловцева, А.В. Азаров, Д.Р. Добринский, И.В. Тертишников, И.В. Поляков, Б.А. Абухба // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : ivdon.ru/magazine/archive/n2y20185/4976.
8. ГОСТ Р 56929–2016. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Исследование фракционного состава пыли оптическим методом при нормировании качества атмосферного воздуха.
9. Фигуровский, Н.А. Основы седиментационного анализа / Н.А. Фигуровский. – М. : Наука, 1970.

10. Готлибов, И.И. Седиментационный анализ в коллоидной химии / И.И. Готлибов. – М. : Химия, 1985.
11. Левич, В.Г. Физико химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М. : Физматгиз, 1959.

References

1. Fuks, N.A. Mekhanika aerorozlej / N.A. Fuks. – М. : Izd-vo AN SSSR, 1955. – 352 s.
2. Figurovskij, N.A. Osnovy sedimentatsionnogo analiza / N.A. Figurovskij. – М. : Nauka, 1970.
3. Gotlibov, I.I. Sedimentatsionnyj analiz v kolloidnoj khimii / I.I. Gotlibov. – М. : KHimiya, 1985.
4. Levich V.G. Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika : 2-e izd., dop. i pererab. / V.G. Levich. – М. : Fizmatgiz, 1959. – 699 s.
5. Istomin, V.L. Metodika opredeleniya aerodinamicheskogo diametra aeroroznykh chastits slozhnoj geometricheskoy formy v diapazone chisel Rejnoldsa ot 0,1 do 6,0 / V.L. Istomin, K.P. Kutsenogij // Teplofizika i aeromekhanika. – 2010. – Т. 17. – № 1. – S. 77–83.
6. Azarov, V.N. Metodika mikroskopicheskogo analiza dispersnogo sostava pyli s primeneniem personalnogo kompyutera (PK) / V.N. Azarov, N.M. Sergina; Volgogr. gos. arkh-stront. akad. – Volgograd, 2002. – Dep. v VINITI 15.07.2002 № 1332-80002. – 7 s.
7. Azarov, V.N. O sovershenstvovanii algoritma kompyuternoj programmy analiza dispersnogo sostava pyli v vozduшной srede / V.N. Azarov, V.A. Rebrov, E.YU. Kozlovitseva, A.V. Azarov, D.R. Dobrinskij, I.V. Tertishnikov, I.V. Polyakov, B.A. Abukhba // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2018. – № 2 [Electronic resource]. – Access mode : ivdon.ru/magazine/archive/n2y20185/4976.
8. GOST R 56929–2016. Vybrosty zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu. Issledovanie fraktsionnogo sostava pyli opticheskim metodom pri normirovanii kachestva atmosfernogo vozdukha.
9. Figurovskij, N.A. Osnovy sedimentatsionnogo analiza / N.A. Figurovskij. – М. : Nauka, 1970.
10. Gotlibov, I.I. Sedimentatsionnyj analiz v kolloidnoj khimii / I.I. Gotlibov. – М. : KHimiya, 1985.
11. Levich, V.G. Fiziko khimicheskaya gidrodinamika / V.G. Levich. – М. : Fizmatgiz, 1959.

Comparative Analysis of the Stokes and Oseen Models for Calculating the Sedimentation Diameter of UHMWPE Particles

I.V. Tertishnikov, I.A. Belyakov, V.S. Simakov

Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia)

Key words and phrases: ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE); particle size distribution; sedimentation diameter; Stokes model; Oseen model; Reynolds number; particle deposition.

Abstract. The applicability of the Stokes and Oseen models for calculating the sedimentation diameter of UHMWPE particles was investigated. The objective was to compare the accuracy of the models and construct a particle size distribution function. The tasks included: conducting a

sedimentation analysis of UHMWPE; constructing an experimental particle diameter distribution function; calculating settling velocities using the Stokes and Oseen models; and comparing the calculated and experimental data. The study hypothesis suggests the Oseen model describes the sedimentation of UHMWPE particles more accurately than the Stokes model. The study was carried out using the methods of sedimentation analysis in a gravity field, calculating settling velocities (Stokes and Oseen), constructing particle distribution curves and statistical data processing. The findings are as follows: the distribution function of UHMWPE particles by sedimentation diameter was obtained; it was confirmed that the Oseen model fits the experimental data better for particles of 1–10 μm in size.

© И.В. Тертишников, И.А. Беляков, В.С. Симаков, 2026

УДК 004.925.8:691.327.33

Исследование пористой структуры теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов методом анализа изображений

Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, М.А. Богачева

*ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет имени В.Г. Шухова»,
г. Белгород (Россия)*

Ключевые слова и фразы: анализ изображений; бинаризация; метод подсчета ячеек; пенобетон; пористая структура; фрактальная размерность.

Аннотация. Исследование фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов позволяет количественно оценить геометрическую сложность порового пространства и управлять микроструктурой материала. В работе представлен метод определения фрактальной размерности по цифровому изображению поверхности ячеистого бетона, основанный на последовательном изменении разрешения изображения, где размер ячейки соответствует размеру пикселя. Этот подход исключает погрешности, связанные с наложением сетки на контур, характерные для традиционных методов, и повышает точность расчетов. Эксперименты проведены на образцах теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности D300 и D400 с использованием цифровой камеры высокого разрешения и специализированного программного обеспечения для обработки изображений. Показано, что предложенный метод обеспечивает более достоверные результаты по сравнению с известным прототипом: наблюдается увеличение значения фрактальной размерности и коэффициента регрессии аппроксимирующей зависимости, а также снижение разброса измерений. Полученные результаты могут быть применены для контроля качества ячеистых бетонов, оптимизации технологических режимов их производства и установления корреляции между фрактальной размерностью и физико-механическими свойствами материала.

В современном строительстве ячеистые бетоны широко применяются в качестве конструктивно-теплоизоляционных и теплоизоляционных материалов благодаря сочетанию

малой плотности, высокой пористости, низкой теплопроводности и достаточной прочности [1; 2]. Реальная пористая структура таких материалов представляет собой сложную систему пор различной формы и размеров, распределенных в объеме вяжущей матрицы. Традиционные параметры описания структуры, такие как средний размер пор, пористость, распределение пор по размерам, коэффициенты формы, не позволяют в полной мере охарактеризовать геометрическую сложность порового пространства и его самоорганизацию на различных масштабных уровнях. В связи с этим важное значение приобретает использование фрактальной геометрии, позволяющей описывать сложные, самоподобные структуры с помощью фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов, принимающей нецелые значения [3–5].

Фрактальная размерность пористой структуры ячеистого бетона характеризует степень заполнения исследуемой области порами и отражает сложность их пространственного распределения. При этом большему значению фрактальной размерности соответствует более развитая структура порового пространства, в которой возрастает доля мелких пор и увеличивается извилистость границ межпоровых перегородок. Известные методы определения фрактальной размерности, основанные на подсчете числа ячеек N , содержащих часть объекта при различных значениях размера ячеек h , предполагают наложение сетки на цифровое изображение. При этом при малых размерах ячеек линии сетки накладываются на контур фрактала, что приводит к снижению точности определения количества занятых ячеек и, как следствие, к погрешности в вычислении фрактальной размерности, а учет наложения линий сетки на контур изображения поверхности ячеистого бетона приводит к усложнению расчета. Кроме того, в ряде методов требуется ручное задание допусков отклонения тоновых значений пикселей, что повышает трудоемкость анализа и вводит субъективный фактор [6–8].

В связи с выявленными недостатками был разработан способ определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов, в котором размер ячейки h принимается равным размеру пикселя цифрового изображения, а изменение h осуществляется путем последовательного изменения разрешения изображения [9]. Такой подход позволяет реализовать метод подсчета ячеек на уровне пиксельного анализа без физического наложения сетки, что повышает точность и воспроизводимость результатов.

В качестве объекта исследования использованы образцы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности $D300$ и $D400$ с размерами сторон лицевой поверхности 50–100 мм. Лицевая поверхность образца подвергалась предварительной обработке: осуществлялась шлифовка до получения ровной однородной поверхности с минимальными высотными неровностями, исключая влияние шероховатости на результат анализа. Для предотвращения закупоривания пор абразивной пылью поверхность продувалась сжатым воздухом с использованием компрессора. После завершения шлифовки и продувки визуально контролировалось качество поверхности, исключались участки с дефектами и локальными повреждениями [10].

Получение цифровых изображений лицевой поверхности образцов пенобетона осуществлялось с помощью цифровой фотокамеры высокого разрешения, установленной на штативе таким образом, чтобы оптическая ось объектива была ориентирована перпендикулярно поверхности образца (рис. 1а). Расстояние от объектива до поверхности подбиралось исходя из обеспечения требуемого масштаба изображения и четкости визуализации пористой структуры образца. Для повышения качества изображения использовалось равномерное освещение, исключаящее появление теней, бликов, шумов и других артефактов изображения, снижающих качество последующей обработки.

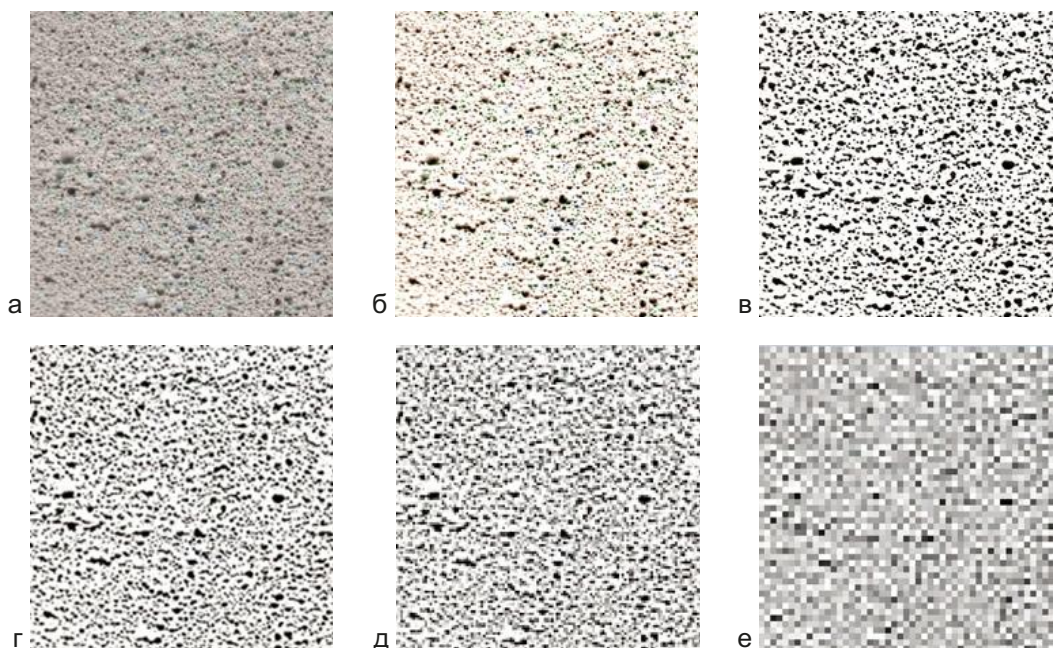


Рис. 1. Обработка цифрового изображения лицевой поверхности пенобетона:
 а – натуральный вид; б – преобразованное изображение в полутоновое;
 в – бинаризованное изображение; г–е – последовательное изменение разрешения
 изображения

Дальнейшая обработка изображения включала следующую последовательность действий. На начальном этапе цветное изображение импортировалось в специализированную программу для обработки изображений, где выполнялось преобразование в полутоновое с распределением интенсивностей пикселей по уровню серого (рис. 1б). Затем осуществлялась бинаризация изображения с разделением пикселей на принадлежащие поровой и твердой составляющим лицевой поверхности образцов ячеистых бетонов. При этом пиксели, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету, относились к порам, а более светлые пиксели – к межпоровым перегородкам. Порог бинаризации выбирался автоматически на основании анализа гистограммы распределения уровней серого, что позволило минимизировать субъективность выбора границы между порами и матрицей.

Бинаризованное изображение импортировалось в специализированную программу анализа цветораспределений пикселей, позволяющую задавать различное разрешение изображения и определять количество пикселей с заданным диапазоном значений (рис. 1в). В реализованном способе размер ячейки h принимался равным размеру пикселя при соответствующем разрешении. Последовательно задавались несколько уровней разрешения, соответствующих различным значениям h (рис. 1г–е). Для каждого значения разрешения определялось количество пикселей N , интенсивность которых наиболее близка к черному цвету, то есть соответствующих поровому пространству. Таким образом, формировался набор пар значений (h, N) , по которому затем осуществлялось построение зависимости $\ln N$ от $\ln h$.

Теоретически связь между числом занятых ячеек N и размером ячейки h для фрактальной структуры описывается выражением:

$$D_p = \ln N / \ln h, \quad (1)$$

Таблица 1. Результаты расчета параметров для построения линии логарифмической зависимости

Показатель	Размер ячейки h , мм				
	1	0,(6)	0,5	0,(3)	0,25
С использованием метода подсчета ячеек					
Марка по средней плотности образца	D300				
Количество ячеек N	58	98	265	735	5150
$\ln h$	0	0,405	0,693	1,099	1,386
$\ln N$	4,06	4,58	5,58	6,54	8,55
Марка по средней плотности образца	D400				
Количество ячеек N	70	120	350	950	6500
$\ln h$	0	0,405	0,693	1,099	1,386
$\ln N$	4,25	4,79	5,86	6,86	8,78
С использованием разработанного способа					
Марка по средней плотности образца	D300				
Количество ячеек N	55	93	250	700	4900
$\ln h$	0	0,405	0,693	1,099	1,386
$\ln N$	3,91	4,82	5,80	6,81	7,93
Марка по средней плотности образца	D400				
Количество ячеек N	66	112	330	910	6200
$\ln h$	0	0,405	0,693	1,099	1,386
$\ln N$	4,19	4,72	5,80	6,81	8,73

где D_p – фрактальная размерность.

Определение зависимости количества занятых ячеек N со стороны ячейки h от размера ячейки осуществлялось в двойных логарифмических координатах при построении графика линии логарифмической зависимости по $\ln N$ от $\ln h$ и определении фрактальной размерности D_p по тангенсу угла наклона линии, полученной построением логарифмической зависимости. Для оценки качества аппроксимации и достоверности полученного значения фрактальной размерности рассчитывался коэффициент детерминации R^2 .

Для оценки эффективности реализованного способа было проведено сравнительное исследование с использованием метода, основанного на наложении сетки с квадратными ячейками на цифровое изображение и последовательном изменении размера ячейки h при ручном подсчете числа ячеек, содержащих контур фрактала.

Результаты расчета параметров для построения линии логарифмической зависимости представлены в табл. 1.

График логарифмической зависимости по $\ln N$ от $\ln h$ приведен на рис. 2. Методом наименьших квадратов построены прямолинейные зависимости $\ln N = k \ln h$ и определен тангенс угла наклона полученной прямой. Значение тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой соответствует значению фрактальной размерности D_p .

Анализ результатов показал, что реализованный способ обеспечивает более высокие значения коэффициента регрессии, меньший разброс измерений и более устойчивое

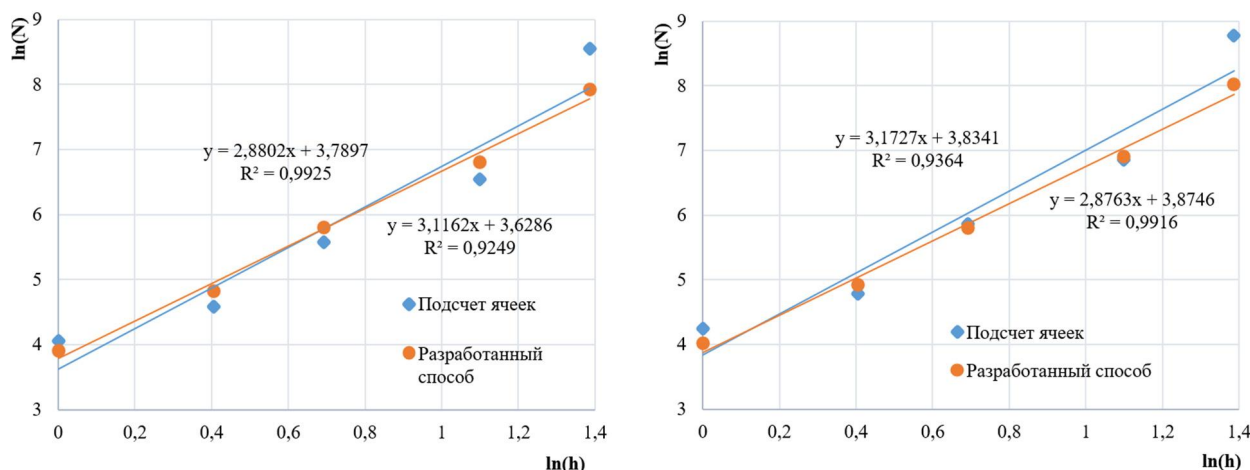


Рис. 2. График логарифмической зависимости по $\ln N$ от $\ln h$ для образцов марки по средней плотности: слева – D300; справа – D400

значение фрактальной размерности по сравнению с традиционным методом определения фрактальной размерности. Установлено, что оба способа обеспечивают хорошую линейность зависимости $\ln N$ от $\ln h$ в двойных логарифмических координатах, однако разработанный способ отличается большей крутизной линии регрессии для теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов марок по средней плотности D300 и D400. То есть при последовательном изменении разрешения изображения, когда размер ячейки h приравнивается размеру пикселя, происходит более чувствительное отражение сложности пористой структуры материала. Повышенное значение углового коэффициента в разработанном способе связано с тем, что исключение наложения линий сетки на контуры пор позволяет более точно фиксировать мелкие поры и их распределение по масштабам, что приводит к увеличению значения фрактальной размерности и лучшему разделению структурных характеристик между образцами разных марок.

Полученные значения фрактальной размерности могут быть интерпретированы с точки зрения наполненности площади рассматриваемого сечения порами и степени развития микрорельефа границ пор. Более высокое значение фрактальной размерности свидетельствует о большем числе мелких пор и более сложном контуре межпоровых перегородок. В условиях одинаковой пористости увеличение фрактальной размерности можно связать с перераспределением пор по размерам в сторону уменьшения среднего диаметра пор при увеличении их количества.

Использование реализованного способа в практике контроля качества ячеистых бетонов позволяет не только количественно оценить структуру порового пространства, но и установить корреляции между фрактальной размерностью и физико-механическими характеристиками материала. Повышение фрактальной размерности, как правило, сопровождается увеличением извилистости поровых каналов, что может способствовать улучшению теплозащитных свойств, но одновременно влиять на прочностные характеристики.

Таким образом, фрактальная размерность может рассматриваться как дополнительный информативный параметр при оптимизации структуры и свойств ячеистых бетонов. Полученные результаты подтверждают возможность использования реализованного способа в качестве эффективного инструмента для анализа пористой структуры ячеистых бетонов и контроля качества материалов. Фрактальная размерность, определенная по циф-

ровым изображениям лицевой поверхности, может служить информативным параметром при оценке микроструктуры и прогнозировании эксплуатационных характеристик ячеистых бетонов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение области применения метода при установлении количественных связей между фрактальной размерностью и теплофизическими, прочностными и деформационными свойствами, а также на разработку автоматизированных систем контроля качества на основе анализа цифровых изображений.

Литература

1. Сулейманова, Л.А. Повышение эффективности производства и применения ячеистых бетонов / Л.А. Сулейманова, А.С. Коломацкий, И.А. Погорелова, М.В. Марушко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 11. – С. 34–42.
2. Вылегжанин, В.П. Особенности пористой структуры ячеистых бетонов и ее влияние на теплопроводность / В.П. Вылегжанин, В.А. Пинскер, Т.М. Петрова // Строительные материалы. – 2021. – № 8. – С. 67–72.
3. Wang, Z. A Rapid Quantitation of Cell Attachment and Spreading Based on Digital Image Analysis: Application for Cell Affinity and Compatibility Assessment of Synthetic Polymers / Z. Wang, Y. Guo, P. Zhang // Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 128. – P. 112267.
4. Беликова, В.О. Фрактальная размерность и аспекты ее применения / В.О. Беликова // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем : межвузовский сборник научных трудов / Рязанский государственный радиотехнический университет. – Рязань : BookJet, 2019. – Вып. 2. – С. 56–58.
5. Марков, Б.Н. Вычисление фрактальной размерности поверхности по стандарту ИСО / Б.Н. Марков, Д.А. Мастеренко, В.И. Телешевский // Наука сегодня: вызовы, перспективы и возможности : материалы международной научно-практической конференции. – Вологда : Маркер, 2019. – Т. 1. – С. 85–87.
6. Gabriele, A. From Fractal Geometry to Fractal Analysis / A. Gabriele, D.R. Losa, R. Dejan, Z. Ivan, B. Stefano // Applied Mathematics. – 2016. – Vol. 7. – No. 4. – P. 346–354.
7. Zhao, L. Microstructure and Pore Fractal Dimensions of Recycled Thermal Insulation Concrete / L. Zhao, W. Wang, Z. Li, Y.F. Chen // Materials Testing. – 2015. – Vol. 57. – No. 4. – P. 349–359.
8. Ebrahimi, S. Iris Recognition System Based on Fractal Dimensions Using Improved Box Counting / S. Ebrahimi, M.B. Tavakolii, F. Setoudeh // Journal of Information Science and Engineering. – 2019. – Vol. 32. – P. 275–290.
9. Peng, R.D. Computation Method of Fractal Dimension for 2D Digital Image / R.D. Peng, H.P. Xie, Y. Ju // Journal of China University of Mining & Technology. – 2004. – Vol. 33. – P. 19–24.
10. Патент № 2848926 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/38, G01N 21/00. Способ определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов. – Заявл. 05.06.2025. – Опубл. 21.10.2025 / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский, М.А. Богачева; заявитель ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова».
11. Сулейманова, Л.А. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистого бетона / Л.А. Сулейманова, И.С. Рябчевский, И.А. Погорелова, М.А. Богачева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 2. – С. 8–15.

References

1. Sulejmanova, L.A. Povyshenie effektivnosti proizvodstva i primeneniya yacheistykh betonov / L.A. Sulejmanova, A.S. Kolomatskij, I.A. Pogorelova, M.V. Marushko // Vestnik BGTU im. V.G. SHukhova. – 2017. – № 11. – S. 34–42.
2. Vylegzhanin, V.P. Osobennosti poristoj struktury yacheistykh betonov i ee vliyanie na teploprovodnost / V.P. Vylegzhanin, V.A. Pinsker, T.M. Petrova // Stroitelnye materialy. – 2021. – № 8. – S. 67–72.
4. Belikova, V.O. Fraktalnaya razmernost i aspekty ee primeneniya / V.O. Belikova // Matematicheskoe i programmnoe obespechenie vychislitelnykh sistem : mezhvuzovskij sbornik nauchnykh trudov / Ryazanskij gosudarstvennyj radiotekhnicheskij universitet. – Ryazan : BookJet, 2019. – Vyp. 2. – S. 56–58.
5. Markov, B.N. Vychislenie fraktalnoj razmernosti poverkhnosti po standartu ISO / B.N. Markov, D.A. Masterenko, V.I. Teleshevskij // Nauka segodnya: vyzovy, perspektivy i vozmozhnosti : materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii. – Vologda : Marker, 2019. – T. 1. – S. 85–87.
10. Patent № 2848926 C1 Rossijskaya Federatsiya, MPK G01N 33/38, G01N 21/00. Sposob opredeleniya fraktalnoj razmernosti poristoj struktury yacheistykh betonov. – Zayavl. 05.06.2025. – Opubl. 21.10.2025 / L.A. Sulejmanova, I.A. Pogorelova, I.S. Ryabchevskij, M.A. Bogacheva; zayavitel FGBOU VO «BGTU im. V.G. SHukhova».
11. Sulejmanova, L.A. Fraktalnaya razmernost poristoj struktury yacheistogo betona / L.A. Sulejmanova, I.S. Ryabchevskij, I.A. Pogorelova, M.A. Bogacheva // Vestnik BGTU im. V.G. SHukhova. – 2024. – № 2. – S. 8–15.

A Study of the Porous Structure of Thermal-Insulating Dispersed-Reinforced Foam Concrete by Image Analysis

L.A. Suleymanova, I.A. Pogorelova, M.A. Bogacheva

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod (Russia)*

Key words and phrases: fractal dimension; porous structure; cellular concrete; cell counting method; image analysis; binarization.

Abstract. The study of the fractal dimension of the porous structure of cellular concretes makes it possible to quantify the geometric complexity of the pore space and control the microstructure of the material. The paper presents a method for determining fractal dimension from a digital image of a cellular concrete surface based on a sequential change in image resolution, where the cell size corresponds to the pixel size. This approach eliminates the errors associated with applying the grid to the contour, which are typical for traditional methods, and improves the accuracy of calculations. The experiments were carried out on samples of thermal insulation dispersion-reinforced foam concrete of average density grades D300 and D400 using a high-resolution digital camera and specialized software for image processing. It is shown that the proposed method provides more reliable results compared to the known prototype: there is an increase in the value of the fractal dimension and the regression coefficient of the approximating dependence, as well as a decrease in the measurement spread. The results

obtained can be used to control the quality of cellular concretes, optimize the technological modes of their production and establish a correlation between the fractal dimension and the physical and mechanical properties of the material.

© Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, М.А. Богачева, 2026

УДК 614.876

Метод автономной оценки радиационной обстановки в помещениях радиационно-опасных объектов с целью повышения экологической и производственной безопасности

А.С. Бурый, О.Л. Козлова

*ЧУПО «Краснознаменский городской колледж»,
г. Краснознаменск (Россия)*

Ключевые слова и фразы: автономная оценка; дозовая нагрузка персонала; производственная безопасность; радиационная обстановка; радиационно-опасные объекты; радиационный контроль; экологическая безопасность.

Аннотация. Цель исследования – обоснование метода автономной оценки радиационной обстановки в помещениях радиационно-опасных объектов для снижения дозовой нагрузки персонала. Научная новизна заключается в разработке модели автономного радиационного мониторинга, ориентированного на предварительную оценку радиационной обстановки до входа персонала. Метод – анализ практики радиационного контроля и условий эксплуатации помещений. Полученные результаты подтверждают возможность использования автономных мобильных систем для обоснованного допуска персонала и сокращения дозовой нагрузки в рамках производственного радиационного контроля.

Эксплуатация зданий и помещений радиационно-опасных объектов связана с радиационным контролем, при котором измерения выполняются при физическом присутствии персонала в контролируемых зонах [1]. Нормы радиационной безопасности устанавливают предельные значения доз, при этом отсутствие научно обоснованных безопасных уровней ионизирующего излучения обуславливает необходимость уменьшения дозовой нагрузки в процессе эксплуатации [8]. Прямое участие персонала в процедурах измерения формирует дополнительную дозовую нагрузку, не связанную с выполнением основных производственных функций, что усиливает риски экологической и производственной безопасности [9–10]. Кроме того, использование зарубежных беспилотных систем автономного мониторинга не обеспечивает ожидаемой эффективности при эксплуатации отечественных объектов и не приводит к снижению эксплуатационных рисков [7]. В связи с этим актуальной является разработка метода автономной оценки радиационной обстановки.

Радиационный контроль в помещениях объектов атомной и радиационно-опасной инфраструктуры осуществляется в условиях пространственной неоднородности ионизирую-

Таблица 1. Особенности радиационного контроля в помещениях радиационно-опасных объектов

Аспект контроля	Характеристика помещений	Ограничение измерений	Потенциал автономной оценки
Пространственная структура излучения	Неоднородное распределение радиационного фона	Необходимость измерений в нескольких зонах	Предварительное зонирование обстановки
Тип источников излучения	Наличие открытых и закрытых источников	Ограничение перемещения персонала	Дистанционное обследование помещений
Геометрия и планировка помещений	Сложная конфигурация строительных и технологических элементов	Ограниченная доступность отдельных участков	Обход препятствий автономной мобильной системой
Регламент измерений	Фиксация прибора в контрольных точках	Необходимость остановки в зонах контроля	Снижение времени присутствия человека
Организация производственного контроля	Периодичность измерений в процессе эксплуатации	Повторяемость контрольных операций	Использование автономной оценки до входа персонала

щего излучения [2], связанной с размещением источников [4], особенностями строительных конструкций [3] и наличием технологического оборудования (табл. 1).

Проведение измерений в таких помещениях предполагает пребывание персонала в зонах с переменным уровнем мощности эквивалентной дозы [4], а также необходимость временной фиксации измерительного прибора в отдельных точках для получения корректных значений [6]. Ограничениями выступают наличие открытых и закрытых источников ионизирующего излучения, а также ограниченная доступность отдельных участков помещений. Важно отметить, что нормативные требования радиационной безопасности в Российской Федерации устанавливают предельные значения доз облучения персонала и разграничивают персонал групп А и Б [5]. Для повышения экологической и производственной безопасности предлагается авторская модель (рис. 1).

Модель отражает включение автономной мобильной системы в систему эксплуатации зданий для предварительной оценки радиационной обстановки до входа персонала и формирования регламента допуска к работам. В модели показана связь регламентных измерений физических факторов и радиометрического контроля с дозовой нагрузкой персонала групп А и Б, которая усиливается пространственной неоднородностью радиационной обстановки и особенностями открытых и закрытых источников ионизирующего излучения. Автономная мобильная система объединяет радиометр и средства ориентирования в замкнутом пространстве для построения карты радиационной обстановки и зонирования помещения, что обеспечивает выбор контрольных точек, ограничение времени пребывания персонала и снижение совокупной дозовой нагрузки.

Эффекты внедрения предлагаемого метода автономной оценки радиационной обстановки показаны ниже (табл. 2).

Предложенный метод автономной оценки радиационной обстановки обладает практической значимостью для эксплуатации зданий и помещений радиационно-опасных объектов, поскольку ориентирован на предварительное обследование среды до входа персонала и использование результатов оценки при формировании регламента допуска к работам. Применение метода в рамках производственного радиационного контроля обеспечивает

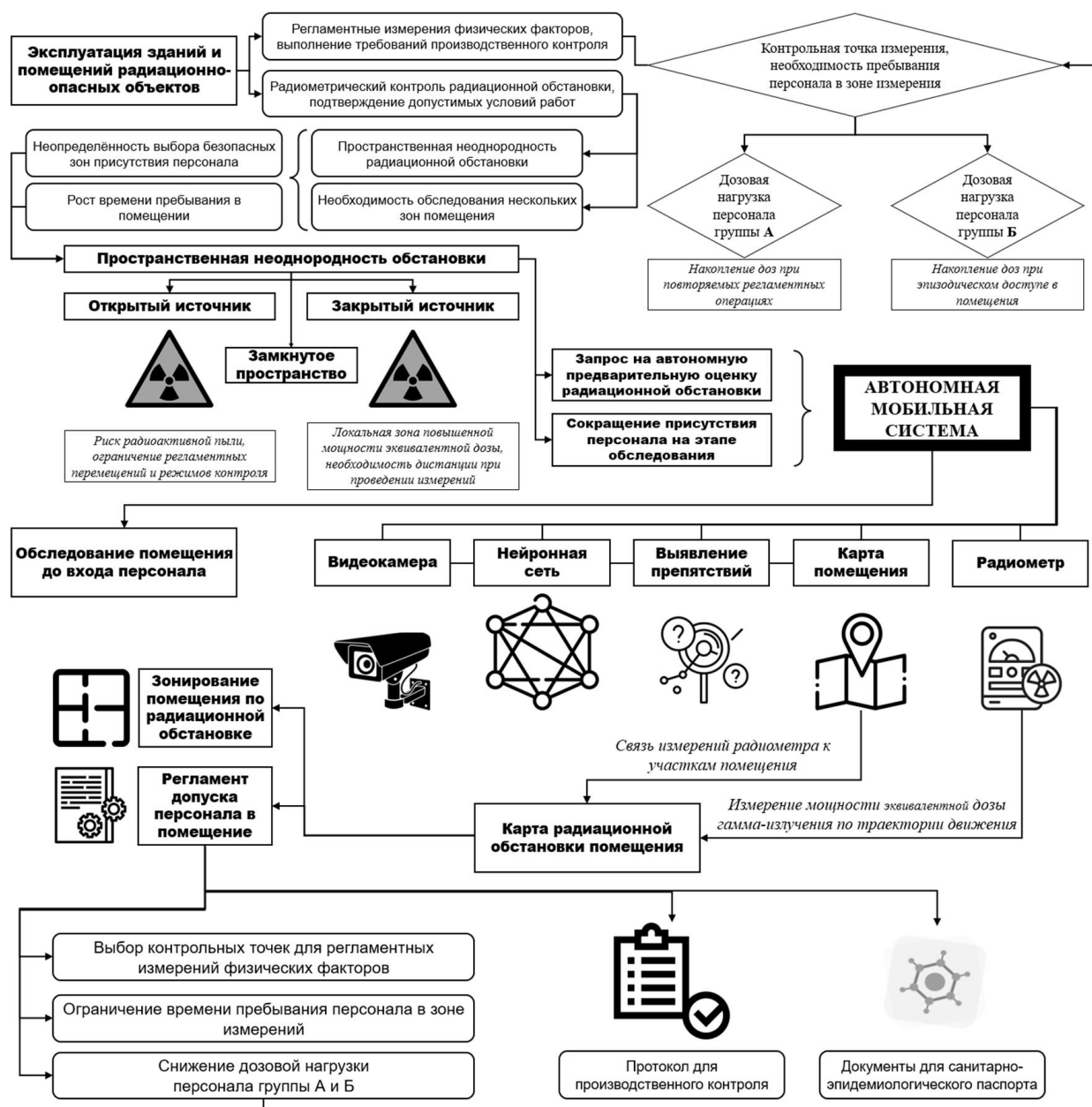


Рис. 1. Модель автономного радиационного мониторинга помещений радиационно-опасных объектов

сокращение дозовой нагрузки персонала групп А и Б, а также повышает воспроизводимость и сопоставимость данных при выполнении регламентных процедур и оформлении документации санитарно-эпидемиологического характера. Роль предложенного метода заключается во включении автономной мобильной системы как элемента управления условиями эксплуатации помещений с источниками ионизирующего излучения, что обеспечивает переход к предварительной оценке радиационной обстановки. Вклад предлагаемой модели в развитие экологической безопасности строительства и городского хозяйства состоит в развитии экологически ориентированного мониторинга, основанного на учете пространственной неоднородности радиационной обстановки при эксплуатации радиаци-

Таблица 2. Эффекты внедрения автономной оценки радиационной обстановки

Экологические	Производственно-технологические
Снижение дозовой нагрузки персонала при выполнении регламентных измерений; сокращение контакта персонала с ионизирующим излучением на этапе обследования помещений; учет пространственной неоднородности радиационной обстановки при допуске к работам	Перенос обследования помещения на автономную мобильную систему; обоснованный выбор контрольных точек регламентных измерений; ограничение времени пребывания персонала в зонах измерений; формирование карты радиационной обстановки для производственного контроля

онно-опасных объектов.

Результаты исследования показывают, что метод автономной оценки радиационной обстановки ориентирован на снижение дозовой нагрузки персонала при эксплуатации зданий и помещений радиационно-опасных объектов за счет предварительного обследования среды до входа человека. Предложенная модель автономного радиационного мониторинга отражает взаимосвязь регламентных измерений, пространственной неоднородности радиационной обстановки и процедур допуска персонала к работам. Практическая значимость метода связана с применением результатов автономной оценки в производственном радиационном контроле и оформлении санитарно-эпидемиологической документации.

Литература

1. Кононенко, Д.В. Новые методические рекомендации по радиационному контролю участков территории для их санитарно-эпидемиологической оценки по показателям радиационной безопасности / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская, А.С. Васильев, К.А. Сапрыкин // Радиационная гигиена. – 2025. – Т. 18. – № 1. – С. 112–120.
2. Куровский, С.В. Разработка методики оценки эффективности проектов в энергетическом секторе / С.В. Куровский, А.В. Коржаневский, Д.А. Мишин // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 5. – С. 258–262.
3. Куровский, С.В. Комплексный подход к экологической безопасности строительного производства с учетом воздействия химических факторов / С.В. Куровский, Д.А. Мишин, Е.В. Кормош, И.Н. Молостова // Экономика строительства. – 2025. – № 1. – С. 522–526.
4. Куровский, С.В. Химические и пространственные методы анализа строительных объектов: экологические аспекты / С.В. Куровский, Д.А. Мишин, Е.В. Кормош, И.Н. Молостова // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 2. – С. 616–620.
5. Куровский, С.В. Особенности обеспечения экологической безопасности в рамках снижения частоты пожароопасных ситуаций на нефтегазовых трубопроводах / С.В. Куровский, Д.А. Мишин, Л.Ю. Фомичев // Экономика строительства. – 2025. – № 1. – С. 339–343.
6. Куровский, С.В. Особенности обеспечения экологической безопасности пожароопасных объектов нефтегазовой промышленности / С.В. Куровский, Д.А. Мишин, Л.Ю. Фомичев // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 3. – С. 774–778.
7. Манаширов, Э.С. Экономическая неэффективность трансфера западных технологий в условиях низкой стоимости труда: капиталово-трудовой парадокс развивающихся стран / Э.С. Манаширов // Экономическое развитие России. – 2025. – № 11. – С. 20–28.
8. Спиридонов, С.И. К вопросу о выборе дозовых критериев для оценки мониторинговых уровней оперативного вмешательства после аварии на АЭС / С.И. Спиридонов,

Р.А. Микаилова, Е.И. Карпенко // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2025. – Т. 65. – № 1. – С. 15–23.

9. Харисов, Р.А. Разработка научных основ экспресс-методов расчета характеристик прочностной безопасности оболочковых элементов трубопроводных систем в водородсодержащих рабочих средах : автореф. дис. ... докт. техн. наук / Р.А. Харисов. – Уфа, 2015. – 22 с. – EDN ZPWYIZ.

10. Харисов, Р.А. Разработка научных основ экспресс-методов расчета характеристик прочностной безопасности оболочковых элементов трубопроводных систем в водородсодержащих рабочих средах : дис. ... докт. техн. наук / Р.А. Харисов; Институт проблем транспорта энергоресурсов, 2015. – 228 с. – EDN VEBFJH.

References

1. Kononenko, D.V. Novye metodicheskie rekomendatsii po radiatsionnomu kontrolyu uchastkov territorii dlya ikh sanitarno-epidemiologicheskoy otsenki po pokazatelyam radiatsionnoy bezopasnosti / D.V. Kononenko, T.A. Kormanovskaya, A.S. Vasilev, K.A. Saprykin // Radiatsionnaya gigiena. – 2025. – Т. 18. – № 1. – С. 112–120.

2. Kurovskij, S.V. Razrabotka metodiki otsenki effektivnosti proektov v energeticheskom sektore / S.V. Kurovskij, A.V. Korzhanevskij, D.A. Mishin // Innovatsii i investitsii. – 2024. – № 5. – С. 258–262.

3. Kurovskij, S.V. Kompleksnyj podkhod k ekologicheskoy bezopasnosti stroitel'nogo proizvodstva s uchetom vozdejstviya khimicheskikh faktorov / S.V. Kurovskij, D.A. Mishin, E.V. Kormosh, I.N. Molostova // Ekonomika stroitelstva. – 2025. – № 1. – С. 522–526.

4. Kurovskij, S.V. KHimicheskie i prostranstvennyye metody analiza stroitelnykh obektov: ekologicheskie aspekty / S.V. Kurovskij, D.A. Mishin, E.V. Kormosh, I.N. Molostova // Innovatsii i investitsii. – 2025. – № 2. – С. 616–620.

5. Kurovskij, S.V. Osobennosti obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti v ramkakh snizheniya chastoty pozharoopasnykh situatsij na neftegazovykh truboprovodakh / S.V. Kurovskij, D.A. Mishin, L.YU. Fomichev // Ekonomika stroitelstva. – 2025. – № 1. – С. 339–343.

6. Kurovskij, S.V. Osobennosti obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti pozharoopasnykh obektov neftegazovoy promyshlennosti / S.V. Kurovskij, D.A. Mishin, L.YU. Fomichev // Innovatsii i investitsii. – 2025. – № 3. – С. 774–778.

7. Manashirov, E.S. Ekonomicheskaya neeffektivnost transfera zapadnykh tekhnologij v usloviyakh nizkoj stoimosti truda: kapitalovo-trudovoj paradoks razvivayushchikhsya stran / E.S. Manashirov // Ekonomicheskoe razvitie Rossii. – 2025. – № 11. – С. 20–28.

8. Spiridonov, S.I. K voprosu o vybore dozovykh kriteriev dlya otsenki monitoringovykh urovnej operativnogo vmeshatelstva posle avarii na AES / S.I. Spiridonov, R.A. Mikailova, E.I. Karpenko // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2025. – Т. 65. – № 1. – С. 15–23.

9. KHarisov, R.A. Razrabotka nauchnykh osnov ekspress-metodov rascheta kharakteristik prochnostnoj bezopasnosti obolochkovykh elementov truboprovodnykh sistem v vodorodsoderzhashchikh rabochikh sredakh : avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk / R.A. KHarisov. – Ufa, 2015. – 22 s. – EDN ZPWYIZ.

10. KHarisov, R.A. Razrabotka nauchnykh osnov ekspress-metodov rascheta kharakteristik prochnostnoj bezopasnosti obolochkovykh elementov truboprovodnykh sistem v vodorodsoderzhashchikh rabochikh sredakh : dis. ... dokt. tekhn. nauk / R.A. KHarisov; Institut problem transporta energoresursov, 2015. – 228 s. – EDN VEBFJH.

**A Method of Autonomous Assessment of the Radiation Situation
in the Premises of Radiation-Hazardous Facilities
to Improve Environmental and Industrial Safety**

A.S. Buryi, O.L. Kozlova

*Krasnoznamensk City College,
Krasnoznamensk (Russia)*

Key words and phrases: radiation situation; radiation-hazardous facilities; autonomous assessment; environmental safety; industrial safety; personnel dose load; radiation monitoring.

Abstract. The purpose of the study is to substantiate the method of autonomous assessment of the radiation situation in the premises of radiation-hazardous facilities to reduce the dose burden of personnel. The scientific novelty lies in the development of an autonomous radiation monitoring model focused on a preliminary assessment of the radiation situation before personnel enter. The research method was analysis of the practice of radiation monitoring and the operating conditions of the premises. The results obtained confirm the possibility of using autonomous mobile systems for the reasonable admission of personnel and reducing the dose burden within the framework of industrial radiation control.

© А.С. Бурый, О.Л. Козлова, 2026

УДК 631.45

Экологическая оценка воздействия на почвы фильтрата станции обезжелезивания питьевой воды

Т.А. Космынина, С.В. Остах

*ФГАОУ ВО «Российский государственный университет
нефти и газа (национальный исследовательский
университет) имени И.М. Губкина»;
ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии
имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук»,
г. Москва (Россия)*

Ключевые слова и фразы: железо; отход; оценка; почва; тест; фильтрат; фитотест.

Аннотация. Работа направлена на оценку экологического воздействия фильтрата, образующегося при обезжелезивании питьевой воды, на почву и высшие растения. В задачи исследования входили определение класса опасности фильтрата, оценка его токсичности при различных кратностях разведения и анализ влияния периодического поступления на ростовые показатели растений. Гипотеза исследования заключалась в предположении, что фильтрат, относящийся к IV классу опасности, при регламентированном режиме сброса не вызывает выраженного фитотоксического эффекта. Для проверки гипотезы использовали методы биотестирования с применением *Artemia salina* и *Paramecium caudatum*, а также фитотестирование с использованием ячменя (*Hordeum vulgare*) и овса (*Avena sativa*). Результаты показали отсутствие существенного ингибирующего воздействия на почву и растения при безопасных режимах поступления фильтрата, при этом отмечена необходимость учета потенциального экологического риска.

Обеспечение людей чистой питьевой водой сегодня – важнейшая задача для компаний, занимающихся водоснабжением и очисткой воды.

Высокая концентрация железа в природных водах является значительной проблемой, поскольку она ставит под угрозу здоровье людей и вредит системам обеспечения населения водой.

Учитывая это, установки по удалению железа являются важной частью процесса подготовки воды, гарантируя ее соответствие стандартам качества и гигиеническим показателям [1].

Работа очистных сооружений по удалению железа влечет за собой образование боль-

Таблица 1. Результаты биотестирования с использованием *Artemia salina*

Разведение	Количество внесенных особей, шт	Количество живых особей, шт		Смертность, %
		1 мин	60 мин	
Без разведения	15	5	4	60 %
1:10		7	5	53 %
1:100		15	14	0 %

Таблица 2. Биотестирование фильтрата с использованием *Paramecium caudatum*

Разведение	Количество внесенных особей, шт	Количество живых особей, шт		Смертность, %
		1 мин	60 мин	
Без разведения	15	10	8	48 %
1:10		12	8	42 %
1:100		14	13	10 %

шого объема отходов – железистоокисного шлама [2]. Неправильное хранение и обработка этого шлама способна вызвать негативное воздействие на окружающую среду, включая загрязнение почвы вокруг очистных комплексов. Это не соответствует современным требованиям экологичности и принципам устойчивости.

Стандартные способы обработки такого шлама сталкиваются с трудностями в связи с усилением контроля над охраной природы и риском попадания вредных веществ в экосистему [3; 4]. В данной ситуации целесообразно использовать биологическую очистку загрязненных почв посредством растений-гипераккумуляторов [5], применяемых для восстановления земель, загрязненных железосодержащими отходами.

Данное исследование направлено на определение влияния фильтрата, полученного в процессе очистки питьевой воды от железа, на почву с последующей оценкой его возможного негативного воздействия на растения.

Фильтрат можно отнести к IV классу опасности, согласно Федеральному классификационному каталогу, как отход обезжелезивания промывки фильтров в смеси при подготовке подземных вод с кодом 7 10 232 01 39 4.

Количественным признаком в данном случае служит показатель класса опасности, который оценивается согласно приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 31.03.2025 № 158 [6].

В качестве тест-объекта при биотестировании фильтрата использовали равноресничную инфузорию *Paramecium caudatum*, представляющую часть активного ила, и *Artemia salina*, тест-функция – смертность гидробионтов.

Результаты проведенных экспериментальных исследований представлены в табл. 1 и 2.

Исходя из полученных результатов, можно сказать, что безопасной кратностью разведения является 1:100.

С целью изучения влияния сброса фильтрата станции обезжелезивания питьевой воды был смоделирован процесс и проведено фитотестирование почвы.

Фитотоксичность – свойство почвы, обусловленное наличием загрязняющих веществ



Рис. 1. Визуализация результатов экспериментальных исследований (по истечении месяца от их начала)

Таблица 3. Ход проведения эксперимента

Дата	Наблюдения
18.02	Начало эксперимента. Посев по 10 семян в каждый горшок (2 шт. – контроль для овса и ячменя, 8 шт. – используемые в моделировании процесса)
25.02	Имитация сброса фильтрата (125 мл в 8 горшков). Видимых изменений нет
04.03	Сброс фильтрата. Наблюдается деградация почвы, рыхлости и сухости
11.03	Сброс фильтрата. Появление проростков семян, преимущественно овса. Ощущение резкого запаха
18.03	Фитотестирование почвы. Семена овса и ячменя проросли (рис. 1)

Таблица 4. Результаты фитотестирования образцов почв

Семена	Количество посаженных семян, шт.	Количество проросших, шт.	Длина ростка, см	Длина корня, см
Ячмень	10	Контроль: 10	15	8
		9	13	7
		9	14	6
		7	15	7
		8	13	6
Овес	10	Контроль: 9	17	10
		8	16	6
		8	16	6
		7	16	7
		5	17	8



Рис. 2. Проростки ячменя



Рис. 3. Проростки овса

и токсинов, подавлять рост и развитие высших растений (тестовый показатель).

Фитотестирование заключается в извлечении посаженных семян и подсчете количества проростков, их длины стеблей и корней.

Экспериментальные исследования включали в себя анализ содержания pH , структуры почвы и ее способность к фиторемедиации нарушенных земель за счет проведения фитотестирования.

Для моделирования процесса сброса на рельеф местности был поставлен эксперимент, при котором производили полив, имитирующий сброс на несколько горшков с почвой, где были посажены тест-объекты: ячмень *Hordeum vulgare* и овес *Avena*.

Для экспериментальных исследований использовались семена овса и ячменя, относящиеся к семейству Злаки (*Poaceae*), ввиду их чувствительности к неблагоприятным изменениям в почве и воспроизводимости в ходе лабораторных исследований.

Исходя из технологических особенностей работы станции обезжелезивания, сброс фильтрата осуществляется каждую неделю.

Для оценки токсичности почвы в течение месяца каждую неделю происходил полив фильтратом объемом 125 мл, исходя из производительности реальных фильтров.

В ходе биотестирования устанавливался класс отхода фильтрата после проведения экспериментальной работы.

Результаты проведенного фитотестирования представлены на рис. 1 и в табл. 3 и 4.

Длина корней исследуемых образцов значительно не отличается, однако длина проростка овса оказалась выше на 2–3 см (рис. 2, 3).

Фитотоксичность оценивалась по формуле:

$$T = (B1 - B2)/B1 \times 100 \%, \quad (1)$$

где T – фитотоксичность (%), $B1$ – количество проросших семян (шт.), $B2$ – количество

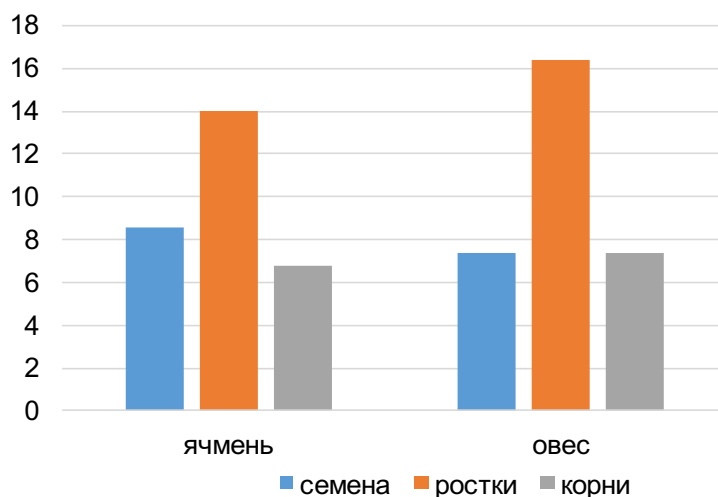


Рис. 4. Результаты фитотестирования по двум фитотест-культурам

проросших семян в контроле (шт.).

Фитотоксичными считают почвы, которые ингибируют прорастание семян или развитие проростков и корней на 20 % и более в сравнении с контролем; стимулирующее действие (>30 %).

По ячменю:

$$T = (10 - 8,25)/10 \times 100 \% = 17,5 \%$$

По овсу:

$$T = (9 - 7)/9 \times 100 \% = 22 \%$$

Полученные результаты измеряемых параметров по двум фитотест-культурам представлены в виде столбчатой диаграммы на рис. 4.

По результатам фитотестирования можно сделать следующий вывод: критерием наличия эффекта фитотоксичности является превышение показателя T более 20 %.

Установлено, что фитотоксичность по двум фитотест-культурам или не превышает (по ячменю), или незначительно превышает (по овсу) эту величину.

Следовательно, отведение фильтрата на почву с периодичностью раз в неделю в течение месяца не привело к ухудшению состояния почвы.

Дополнительно можно исследовать фактор всхожести проростков семян в контроле и экспериментальных образцах почв.

Этапы расчета:

а) расположить варианты двух выборок в общий ряд по возрастанию и пронумеровать члены ряда от 1 до $N = n_1 + n_2$;

б) отдельно для каждой выборки найти суммы рангов R и определить величины по формулам:

$$U_1 = R_1 - n_1(n_1 + 1)/2, \quad (2)$$

где U – U -критерий Уилкоксона (Манна – Уитни); R_1 – сумма рангов первой сравниваемой выборки; n_1 – объем первой выборки.

$$U_2 = R_2 - n_2(n_2 + 1)/2, \quad (3)$$

где U – U -критерий Уилкоксона (Манна – Уитни); R_2 – сумма рангов второй сравниваемой выборки; n_2 – объем второй выборки.

На основе формул (2) и (3) получаем:

$$U_1 = 43 - (8,6(8,6 + 1))/2 = 1,72.$$

$$U_2 = 37 - 7,4(7,4 + 1)/2 = 5,92.$$

При ее принятии делается вывод о том, что исследуемый фактор оказывает существенное влияние и анализируемые выборки существенно различаются по количеству проросших семян.

Исходя из исследованных данных на тест-объектах о классе опасности фильтрата, в небольших количествах он не оказывает значительного негативного воздействия: произошло прорастание семян с эффективным ростом стебля и корневой системы.

По результатам фитотестирования с моделированием процесса работы станции обезжелезивания питьевой воды выявлен существующий экологический риск.

Используемая методика исследования применима для изучения практических возможностей фитостимулирования и, как следствие, реализуемости фиторемедиации загрязненных почв.

Литература

1. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» : постановление Главного государственного врача Российской Федерации от 20 января 2021 г. № 2.
2. Романовский, В.И. Очистка промывных вод станций обезжелезивания / В.И. Романовский, Н.А. Андреева // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2012. – № 3. – С. 66–69.
3. Усова, Н.Т. Утилизация отходов водоподготовки станций обезжелезивания / Н.Т. Усова, О.Д. Лукашевич, Л.В. Герб, О.Ю. Гончаров // Вестник ТГАСУ. – 2011. – № 2. – С. 113–123.
4. Максименко, А.Ф. Оценка экологических рисков, обусловленных воздействием разливов нефтепродуктов / А.Ф. Максименко, О.А. Мишина, С.В. Остах // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 5(83). – С. 76–81.
5. Андреева, И.В. Сравнительная характеристика растений – гипераккумуляторов по накоплению никеля для целей фиторемедиации / И.В. Андреева // Агрехимический вестник. – 2013. – № 6. – С. 31–33.
6. Об утверждении критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду : Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 31.03.2025 № 158 (Зарегистрирован 29.04.2025 № 82010).

References

1. Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya» : postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo vracha Rossijskoj Federatsii ot 20 yanvarya 2021 g. № 2.
2. Romanovskij, V.I. Ochistka promyvnykh vod stantsij obezzhelozivaniya / V.I. Romanovskij, N.A. Andreeva // Trudy BGTU. KHimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv. – 2012. – № 3. – S. 66–69.
3. Usova, N.T. Utilizatsiya otkhodov vodopodgotovki stantsij obezzhelozivaniya / N.T. Usova, O.D. Lukashevich, L.V. Gerb, O.YU. Goncharov // Vestnik TGASU. – 2011. – № 2. – S. 113–123.
4. Maksimenko, A.F. Otsenka ekologicheskikh riskov, obuslovlennykh vozdeystviem razlivov nefteproduktov / A.F. Maksimenko, O.A. Mishina, S.V. Ostakh // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 5(83). – S. 76–81.
5. Andreeva, I.V. Sravnitel'naya kharakteristika rastenij – giperakkumulyatorov po nakopleniyu nikelya dlya tselej fitoremediatsii / I.V. Andreeva // Agrokhimicheskij vestnik. – 2013. – № 6. – S. 31–33.
6. Ob utverzhdenii kriteriev otneseniya otkhodov k I-V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu : Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossijskoj Federatsii ot 31.03.2025 № 158 (Zaregistrovan 29.04.2025 № 82010).

Ecological Assessment of the Impact of Drinking Water Deferrousation Filtrate on Soils

T.A. Kosmylina, S.V. Ostakh

*Russian State University of Oil and Gas (NIU) named after I.M. Gubkin;
Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry
named after A.N. Frumkin of the Russian Academy of Sciences,
Moscow (Russia)*

Key words and phrases: iron; waste; assessment; soil; test; filtrate; phytotest.

Abstract. This study aimed to assess the environmental impact of leachate generated during iron removal from drinking water on soil and higher plants. The objectives of the study included determining the hazard class of the leachate, assessing its toxicity at various dilution rates, and analyzing the impact of periodic application on plant growth. The research hypothesis was that leachate, classified as hazard class IV, does not cause significant phytotoxic effects under regulated discharge conditions. Bioassays using *Artemia salina* and *Paramecium caudatum*, as well as phytotesting using barley (*Hordeum vulgare*) and oats (*Avena sativa*), were used to test this hypothesis. The results showed no significant inhibitory effects on soil or plants under safe leachate application conditions, although the need to consider potential environmental risks was noted.

© T.A. Космылина, С.В. Остак, 2026

УДК 711:902:504.54

**Археологическое наследие
как фактор идентичности и развития:
проблемы проживания
с археологическим наследием в Алжире
(Джемила и Тимгад)**

Берталь Хаула, П.В. Капустин

*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»,
г. Воронеж (Россия)*

Ключевые слова и фразы: археологическое наследие; Джемила; идентичность; проживание наследия; развитие; сохранение; Тимгад.

Аннотация. Приумножение археологического наследия имеет важное значение для развития и идентичности региона, особенно когда это хрупкая сельская территория. В работе рассматриваются археологические памятники Тимгад, расположенный в Батне, и Джемила, расположенный в Сетифе. Эти места обладают историческим значением и неоспоримым потенциалом, считаясь основными вехами в римской истории Северной Африки. Однако оно изменяется и находится под угрозой из-за забывчивости и неосознания этой важности.

Археологическое наследие является важным доказательством истории древних цивилизаций и вносит значительный вклад в становление и укрепление коллективной идентичности современных обществ. В Алжире Джемила и Тимгад, два известных археологических памятника, наглядно иллюстрируют, как материальное наследие способствует формированию местной и национальной идентичности. Эти объекты Всемирного наследия ЮНЕСКО не только представляют великолепие Римской империи, но и играют решающую роль в понимании и демонстрации алжирских культурных корней.

С целью сохранения и оценки археологического наследия в данной статье рассматриваются подходы, которые должны быть применены для включения в развитие и строительство пространства со стратегией «проживания в наследии». Чтобы решить эту задачу, мы рекомендуем использовать возможности, предлагаемые участком, для создания привлекательной и конкурентоспособной территории, а также адаптировать эти участки

для археологических раскопок и создания устойчивого туризма с целью повышения их привлекательности. Исследуется идея обитания в наследии и соединения его с туристическим маршрутом.

Введение

Проживание в археологических памятниках – это захватывающая и сложная тема, связанная с тем, как современные общества взаимодействуют с археологическими памятниками или территориями, представляющими ценность наследия, и проживают в них. Эта область исследований охватывает археологию, градостроительство, сохранение наследия и социальные вопросы. Такого рода статьи могут затрагивать различные аспекты, такие как проблемы сохранения, сосуществование между местными сообществами и археологическими памятниками, а также подходы к устойчивой интеграции археологических пространств в жилые районы.

Джемила и Тимгад, два крупных археологических памятника, иллюстрирующих римскую цивилизацию в Северной Африке, сталкиваются с рядом проблем, связанных с их сохранением, обновлением и заселением. Эти два города, внесенные в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, представляют собой не только эмблему алжирского наследия, но и объекты, посвященные учебе, исследованиям и туризму. То, как они восстанавливаются и управляются, может существенно повлиять на их долгосрочную сохранность и на отношения местных сообществ с этими городами. Этот процесс размещения, перепланировки и управления археологическим наследием поднимает сложные вопросы о балансе, который должен быть найден между сохранением, доступностью и проживанием на объектах.

Интерес к проживанию в памятниках старины ради их сохранения

Жить среди археологического наследия – значит находиться в самом сердце тысячелетней истории, в пространстве, где каждый камень и каждая руина несут на себе следы далекого прошлого. Такой уникальный опыт дает неоспоримые преимущества, прежде всего – возможность участвовать в сохранении ценного культурного наследия.

Однако сосуществование с историей сопряжено и с определенными трудностями. С необходимостью защиты объектов, обеспечением безопасности жителей и поиском баланса между современными условиями и сохранностью исторической среды возникает множество проблем.

Этот тонкий баланс между уважением к наследию и современными потребностями поднимает важные вопросы об управлении жилыми пространствами и их адаптации. Поэтому важно понимать не только преимущества, но и вызовы проживания в подобных местах, чтобы применять наилучшие практики и обеспечивать гармоничное будущее этого уникального жизненного пространства.

Джемила: строгий, но находящийся под угрозой исчезновения заповедник

Джемила – это римское место, которое выделяется качеством своего наследия. Тем не менее реконструкция этого объекта сопряжена с серьезными проблемами. Первая проблема заключается в необходимости сохранить его подлинность, позволяя посетителям безопасно открывать и исследовать место. Хорошо сохранившиеся здания, такие как те-

атр, храмы, дома и крепостные стены, требуют особого внимания, чтобы избежать их разрушения, сохраняя при этом подход, который уважает их историческую целостность.

Ремонт в Джемиле должен проводиться тщательно, с использованием современных технологий, которые не переделывают исходные материалы. Археологические эксперты провели восстановительные работы, но перенаселенность и климатические условия, включая выветривание и эрозию, остаются постоянной угрозой. Урбанизация вокруг участка также может стать проблемой, так как развитие местной инфраструктуры может привести к увеличению нагрузки на охранную зону.

Тимгад: модель планирования и сохранения

Тимгад, основанный при императоре Траяне в начале II века, является впечатляющим образцом римского градостроительства. Сохранение и реконструкция Тимгада сопряжены с теми же проблемами, что и в Джемиле, но с особенностями, связанными с конфигурацией участка. Действительно, Тимгад – это спланированный римский город с сетью ортогональных улиц и внушительных общественных зданий, что требует строгого подхода к консервации.

Реконструкция Тимгада основана на строгих археологических принципах, которые отдают приоритет сохранению существующих сооружений, позволяя при этом улучшить место для публики. Однако, как и в случае с Джемилей, усилия по сохранению должны быть направлены на решение еще одной проблемы: сохранение целостности объекта перед лицом последствий времени, эрозии и туристического давления.

Управление Тимгадом также включает в себя важнейший аспект: посещаемость участка. В отличие от Джемилы, где останки более целы и менее подвержены человеческому давлению, Тимгад имеет большую посещаемость туристов, что требует инфраструктуры приема и решений для управления притоком посетителей. Вокруг объекта были созданы рекреационные зоны и туристические объекты для предоставления услуг посетителям без ущерба целостности археологических сооружений.

Жилье и современное использование объектов: проблема сохранения

Одним из основных вопросов, поднятых в связи с городами Джемиле и Тимгад, является возможность сделать эти объекты пригодными для жизни, сохраняя при этом их историческую ценность. Традиционно эти участки не предназначались для проживания в традиционном смысле, но определенные районы вокруг этих объектов, такие как местные поселения, могут играть важную роль в жизни окружающих сообществ.

В Тимгаде, например, современное жилье и инфраструктура гостеприимства необходимы для поддержки местной экономики, которая частично зависит от туризма. Однако очень важно, чтобы эти сооружения были выполнены таким образом, чтобы не потревожить древние останки. Это включает в себя тщательное планирование, направленное на отделение археологических зон от новых построек при одновременной интеграции культурных и туристических пространств с низким воздействием на окружающую среду. Проекты в области устойчивого развития, такие как строительство энергоэффективных зданий или использование местных материалов, также могут предложить подходящие решения этой дилеммы.

Эта проблема особенно сложна для сообществ, проживающих рядом с объектами. В Джемиле, например, близость к крупному историческому объекту не должна приводить к

чрезмерному давлению на природные ресурсы или местные социальные структуры. Проблема заключается в балансе между местным развитием, благополучием жителей и сохранением археологических памятников. Местные власти в сотрудничестве с экспертами по городскому планированию и охране окружающей среды должны обеспечить, чтобы проживание рядом с историческими участками не приводило к их ухудшению.

Вопрос о размещении объектов археологического наследия, особенно в таких знаковых местах, как Джемила и Тимгад, ставит сложные задачи. Эти два древних объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО являются не только свидетелями римского прошлого, но и ключевыми элементами местной и национальной идентичности. Тем не менее, проживание в этих местах с сохранением их исторического и культурного характера требует сбалансированной стратегии между сохранением природы, развитием туризма и участием сообщества. Цель нашего исследования – предложить стратегию, которая позволит заселить объекты наследия, соблюдая при этом требования к их сохранению и способствуя анимации этих пространств.

Одним из фундаментальных аспектов проживания в археологическом наследии в Джемиле и Тимгаде является устойчивое обновление, которое позволит местному населению активно интегрироваться в управление объектами, сохраняя при этом их историческую целостность.

Бережное градостроительство и региональное планирование

Эти два объекта, Джемила и Тимгад, являются объектами наследия и жизни для местного населения. Поэтому крайне важно интегрировать городское планирование, которое уважает целостность наследия и в то же время удовлетворяет потребности населения. Градостроительство должно разрабатываться в гармонии с наследием и при этом позволять региону развиваться устойчиво.

1. Буферные зоны и контролируемое развитие. Одним из первых шагов к устойчивому заселению наследия является создание буферных зон вокруг объектов. На эти территории будут распространяться строгие правила в отношении строительства и урбанизации, чтобы гарантировать, что наследию не угрожает чрезмерное разрастание городов. В этих районах могут быть разрешены только традиционные и благоприятные для ландшафта постройки, чтобы сохранить визуальную и историческую целостность объектов.

2. Развитие инфраструктуры в соответствии с наследием. Урбанизация и строительство современной инфраструктуры (дорог, жилья, общественных объектов) должны осуществляться в соответствии с историческим наследием. Это требует чуткого подхода к проектированию, при котором новое строительство учитывает традиционные формы и материалы, используя при этом современные технологии. Например, такие решения, как народная архитектура (с использованием местных материалов, таких как камень и дерево), могут быть использованы для обеспечения плавного перехода от древнего наследия к современному развитию.

3. Содействие развитию комплексных туристических маршрутов. Расширение концепции проживания объектов культурного наследия предполагает также содействие развитию комплексных туристических маршрутов в окружающих ландшафтах с уделением особого внимания как археологическим памятникам, так и местным деревням. Этот тип застройки побуждает посетителей исследовать окрестности в уважительной манере, одновременно стимулируя местную экономику и сохраняя окружающую среду. Маршруты могут включать в себя пешеходные тропы, велосипедные прогулки и даже прогулки на верблюдах, чтобы

способствовать уважительному отношению к месту и его окрестностям.

Заключение

В заключение следует отметить, что проживание в археологическом наследии сопряжено как с проблемами, так и со значительными перспективами. С одной стороны, оно предлагает уникальное погружение в историю, позволяя жить в самом сердце культурных реликвий и укреплять связь с прошлым. С другой стороны, эти объекты также могут создавать проблемы, особенно с точки зрения сохранения, управления наследием и адаптации современной инфраструктуры с учетом археологических ограничений. Жителям приходится ориентироваться в важности сохранения и требованиями повседневной жизни, что может привести к напряженности между развитием и защитой наследия. Тем не менее, при правильном управлении, этот тип жилой среды может стать значительным активом с точки зрения культурной самобытности, туризма и приумножения наследия. Поэтому важно найти баланс между уважением к истории и современными потребностями, если мы хотим, чтобы сосуществование с археологическим наследием было долгосрочным и успешным.

Проживание в археологическом наследии в Джемиле и Тимгаде требует целостного и многомерного подхода, объединяющего меры по сохранению, устойчивому управлению, участию сообщества и местному развитию. Необходимо обеспечить баланс между сохранением исторических мест и их современным использованием, обеспечивая сохранение их целостности и позволяя местным сообществам извлекать выгоду из экономических, социальных и культурных перспектив, создаваемых этим наследием.

Для этого необходимо совместное управление с участием местных органов власти, жителей, исследователей и посетителей. Такая стратегия гарантирует, что Джемиле и Тимгад сохранятся не только как историческое прошлое, но и для их будущей роли в алжирском обществе и за его пределами. При реализации стратегии устойчивости, признания культурного разнообразия и ответственного управления эти объекты могут продолжать воплощать важную часть местной, национальной и глобальной идентичности.

Литература/References

1. Ballu, A. Guide illustré Timgad (Antique Thamugadi) : 2e éd. / A. Ballu [Electronic resource]. – Access mode : <https://humazur.univ-cotedazur.fr/files/original/da55a19168cbb131b5646ceab6551d5e89d73d35.pdf>.
2. Duval, N. Djemila / N. Duval // Encyclopédie berbère. – 1995. – № 16. – Document D69. – DOI: 10.4000/encyclopedieberbere.2185 [Electronic resource]. – Access mode : <http://journals.openedition.org/encyclopedieberbere/2185>.
3. Gillot, L. La mise en valeur du patrimoine archéologique comme outil de développement / L. Gillot // Tourisme et développement / éd. Par C. Bataillou, B. Schéou. – Perpignan : Presses universitaires de Perpignan, 2007. – DOI: 10.4000/books.pupvd.33812.
4. Gravari-Barbas Habiter le patrimoine / sous la dir. de M. Gravari-Barbas. – Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2005. – DOI: 10.4000/books.pur.2208.
5. Voisenat, C. L'archéologie comme affect / C. Voisenat // Imaginaires archéologiques / sous la dir. de C. Voisenat. – Paris : Éditions de la Maison des sciences de l'homme, 2008. – DOI: 10.4000/books.editionsmsmsh.3415.
6. Zirout, A.N. Le site antique de Djemila (Algérie). Entre découverte et approche de valorisation / A.N. Zirout // Annales de l'Université "Valahia" Târgoviște. Section d'Archéologie et

d'Histoire. – 2020. – T. 22. – P. 47–67. – DOI : 10.3406/valah.2020.1440 [Electronic resource]. – Access mode : https://www.persee.fr/doc/valah_1584-1855_2020_num_22_1_1440.

**Archaeological Heritage as a Factor of Identity and Development:
Problems of living in the Archaeological Heritage in Algeria (Jemila and Timgad)**

Bertal Khaoula, P.V. Kapustin

*Voronezh State Technical University,
Voronezh (Russia)*

Key words and phrases: archaeological heritage; identity; development; preservation; living the heritage; Timgad; Djemila.

Abstract. Enhancing the archaeological heritage is important for the development and identity of a region, especially when it is a fragile rural territory. The work deals with the archaeological sites of Timgad, located in Batna, and Djemila, located in Setif. These sites possess historical significance and undeniable potential, being considered major references in the Roman history of North Africa. However, it is altered and endangered by forgetfulness and lack of awareness of this importance.

Archaeological heritage is an essential proof of the history of ancient civilizations and contributes significantly to the establishment and strengthening of the collective identity of today's societies. In Algeria, Djemila and Timgad, two prominent archaeological sites, vividly illustrate how tangible heritage contributes to the construction of local and national identity. These UNESCO World Heritage Sites are not only representations of the magnificence of the Roman Empire, but also play a crucial role in understanding and showcasing Algerian cultural roots.

With the aim of preserving and appreciating archaeological heritage, this article examines the approaches to be put in place to incorporate it into the development and construction of its space, with a strategy of "inhabiting the heritage". To meet this challenge, we suggest exploiting the possibilities offered by the site to establish an attractive and competitive territory, as well as adapting these sites for archaeological excavations and establishing sustainable tourism in order to increase their attractiveness. While exploring the idea of inhabiting heritage and connecting it through a tourist route.

© Берталь Хаула, П.В. Капустин, 2026

УДК 69.05

**Совершенствование системы
управления строительным проектом
с целью снижения рисков,
возникающих из-за конфликтов интересов
на этапе проектирования**

В.А. Иошкин, Я.В. Шестерикова

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

Ключевые слова и фразы: конфликт интересов; организационно-управленческие решения; проектирование; строительный проект; система управления проектом; ТИМ; управление рисками.

Аннотация. В условиях роста масштабов и сложности современных строительных проектов особо актуальной становится проблема конфликтов интересов на стадии проектирования, что влияет на стратегические решения, сроки и стоимость реализации.

Целью настоящего исследования является совершенствование управления строительным проектом путем интеграции риск-ориентированных методов для снижения и профилактики конфликтов интересов на этапе проектирования.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: провести анализ причин и классификацию конфликтов интересов между основными участниками (инвестор, девелопер, заказчик, проектировщик, эксплуатант, государственные органы) в процессе проектирования; проанализировать типовую систему управления строительным проектом и выявить недостатки в управлении конфликтами; разработать методику интеграции риск-менеджмента и системных процедур управления конфликтами интересов; создать структурированную модель управления рисками конфликтов интересов и дать практические рекомендации по ее внедрению.

В ходе работы была выдвинута гипотеза, что внедрение формализованных методов управления рисками конфликтов интересов на стадии проектирования (включая их идентификацию, классификацию и цифровую верификацию) позволяет повысить прозрачность процессов, уменьшить частоту и последствия конфликтов, тем са-

мым повышая эффективность и устойчивость реализации строительных проектов.

В качестве методов исследования применялись: системный и процессный подходы; структурно-функциональный и причинно-следственный анализ; методы риск-менеджмента по стандарту ISO 31000:2018; средства функционального анализа конфликтных ситуаций; анализ эффективности внедрения цифровых инструментов (ТИМ/ВІМ, ЭДО).

Современные строительные проекты характеризуются возрастанием сложности из-за масштабов, многообразия участников и длительности жизненного цикла. На стадии проектирования принимаются стратегические решения, возникают противоречия интересов между инвестором, девелопером, заказчиком, проектировщиками, будущим эксплуатантом и государственными органами.

Цель исследования – совершенствование управления строительным проектом путем интеграции риск-ориентированных методов снижения конфликтов на этапе проектирования. Новизна заключается в развитии инструментов риск-менеджмента применительно к проектному этапу, включая классификацию конфликтов и модель управления ими. Практическая значимость состоит во внедрении этих подходов в деятельность строительных организаций и подготовке специалистов.

В методологической основе исследования лежат системный и процессный подходы, что предполагает рассмотрение строительного проекта как совокупности взаимосвязанных процессов, реализуемых в многоуровневой организационной среде. Используются методы структурно-функционального анализа (для описания ролей и ответственности участников), элементы риск-ориентированного управления проектами (по стандартам ISO 31000:2018), а также методы функционального и причинно-следственного анализа конфликтных ситуаций.

1. Теоретические основы и классификация конфликтов интересов на стадии проектирования (сокращенная версия).

Конфликт интересов на этапе проектирования строительного проекта – это ситуация, когда личная или корпоративная заинтересованность участников влияет на объективность технических, финансовых и административных решений [1]. Все решения на этой стадии определяют будущие затраты и характеристики объекта, а возникающие разногласия могут иметь долгосрочные последствия [2].

Часто такие конфликты возникают из-за различий в опыте и информированности участников. Проектировщики, как правило, стремятся сэкономить на проектировании, тогда как инвесторы часто заботятся о будущих эксплуатационных расходах [3].

Для управления рисками конфликты интересов классифицируют:

- по участникам,
- по этапам [4].

Указанная классификация позволяет переходить от ситуативного управления конфликтами к формализации набора конфликтных зон, которые подлежат системному учету при организации проектирования [5].

2. Анализ типовой системы управления строительным проектом на стадии проектирования.

В строительных и проектных компаниях система управления обычно состоит из слабо

связанных элементов – структур, договоров, процедур контроля бюджета, сроков и качества. Однако конфликту интересов как источнику проектных рисков уделяется мало внимания. Часто возникают проблемы с нечеткими зонами ответственности и отсутствием закрепления задач за конкретными людьми, сотрудники преследуют личные цели в ущерб проекту, нет ясных процедур предотвращения конфликтов интересов. Основные риски связаны с выбором проектных решений, подбором подрядчиков, балансом стоимости, качества и сроков, а также с распределением рисков при изменениях. Стандарты ограничиваются ТЗ, планированием и контролем стоимости, а управление конфликтами обычно зависит от опыта исполнителей, что мешает масштабируемости управленческих решений.

3. Методика интеграции системного управления конфликтами интересов на этапе проектирования.

Для внедрения риск-менеджмента в процессы проектирования строительных объектов предложен поэтапный методический подход.

I. Идентификация конфликтных зон.

Анализ проектных и бизнес-процессов (от постановки задач до согласования документации). Для каждой зоны определяется круг акторов, их цели и противоречия – формируется каталог типовых конфликтов.

II. Оценка и ранжирование рисков.

Для каждого конфликта определяются характеристики: вероятность развития, тяжесть последствий (ущербы по срокам, стоимости, качеству) [9].

III. Разработка организационно-управленческих решений:

- уточняются функции и ответственность;
- внедряются публичные механизмы декларирования и урегулирования потенциальных конфликтов [10].

IV. Интеграция новых процессов в общую систему управления проектом.

Регламенты, рабочие инструкции, инструменты цифрового взаимодействия, обучение персонала [11].

Современные инструменты информационного моделирования (ТИМ/*BIM*) становятся неотъемлемой составляющей процесса управления рисками, в том числе рисками, связанными с конфликтами интересов [12].

По результатам внедрения ТИМ/*BIM* фиксируется снижение ошибок согласования, сокращение числа нефиксируемых мелких изменений, ведущих к эскалации конфликтов, эффективное архивирование проектных решений и истории изменений [13].

4. Структурная модель системы управления рисками конфликтов интересов.

Разработанная модель включает три взаимосвязанных блока:

- 1) организационный блок;
- 2) функциональный блок;
- 3) информационный блок [14].

Разработана процессная схема, объединяющая:

- фиксацию критических точек на проектном графике;
- проведение регулярных аудитов конфликтных зон;
- использование цифровых коммуникационных медиаторов (*BIM*-платформ) для верификации всех проектных решений и изменений [15].

Интеграция данной модели с текущими корпоративными стандартами позволяет повысить устойчивость проектов к рискам конфликтов интересов, уменьшить объем нерезультативных согласований, обеспечить равный доступ к информации и ответственность всех сторон [16].

5. Практические рекомендации по внедрению.

Для внедрения предложенного подхода рекомендуется сначала изучить существующую систему управления и регламенты [17]. Затем разработать политику по управлению конфликтами интересов, интегрировав ее с корпоративной этикой [18]. Далее нужно организовать процедуры выявления, эскалации и урегулирования конфликтов, а также включить типовые риски в систему проектного контроля. Важно применять цифровые инструменты (BIM/ТИМ, ЭДО) для прозрачной фиксации решений и отказов. Необходимо обучить персонал основам конфликтологии и управлению рисками и регулярно анализировать эффективность этих мер для оперативной корректировки политики.

Проблема конфликтов интересов на стадии проектирования остается одним из ключевых вызовов современного управления строительством. Проведенный анализ подтвердил, что существующая практика преимущественно носит реактивный характер, а управление конфликтами часто замыкается на административных ресурсах и индивидуальных компетенциях участников.

Литература

1. Бенклян, С. Руководство по информационному моделированию (BIM) для заказчиков на примере промышленных объектов. Версия 1.0 / С. Бенклян, Т. Кисель, М. Король, Н. Новкович. – М. : Конкуратор, 2023.
2. Король, М.Г. BIM в России все еще для раннего большинства / М.Г. Король // Информационно-аналитический журнал РУБЕЖ. – 2022. – № 11.
3. Талапов, В.В. Основы BIM. Введение в информационное моделирование зданий / В.В. Талапов. – Саратов : Профобразование, 2021.
4. Филп, Д. BIM – 7 шагов к совершенству / Д. Филп // Информационно-аналитический журнал РУБЕЖ. – 2021. – № 7.
5. BS ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines : 2nd Addition.
6. Yang Zou. BIM-based Risk Management: Challenges and Opportunities / Yang Zou, Arto Kiviniemi, Stephen W. Jones.
7. Veerasak Likhitrungsilp. Implementing BIM Uses for Managing Risk in Design-Build Projects / Veerasak Likhitrungsilp, Mervyn Jan S. Malvar, Tantri N. Handayani.
8. Верещагин, В.В. Управление рисками в условиях применения технологий информационного моделирования строительных объектов: особенности и возможности / В.В. Верещагин, Т.Ю. Шемякина // Проблемы анализа риска. – 2020. – № 3.
9. Королькова, Е.М. Риск-менеджмент: управление проектными рисками : учеб. пособие / Е.М. Королькова. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2023.
10. Кострикин, П.Н. Ипотечное кредитование в России / П.Н. Кострикин. – М. : Макс Пресс, 2013.
11. Круи, М. Основы риск-менеджмента / М. Круи, Д. Гэлаи, В.Б. Минасян, Р. Марк. – М. : Юрайт, 2024.
12. Лазарова, Л.Б. Ипотечное жилищное кредитование и страхование : учеб. пособие для магистров / Л.Б. Лазарова. – М. : Прометей, 2019.
13. Малашихина, Н.Н. Риск-менеджмент : учеб. пособие / Н.Н. Малашихина, О.С. Белокрылова. – Ростов н/Д. : Феникс, 2024.
14. Костяева, Е.В. Трансформация механизма обеспечения финансовой безопасности страховых организаций в условиях внедрения риск-ориентированного подхода / Е.В. Костяева, Н.И. Аксенова // Экономическая безопасность. – 2022. – Т. 5. – № 2. –

С. 655–672. – DOI: 10.18334/ecsec.5.2.114420. – EDN RQKWLW.

15. Наместникова, А.Н. Особенности производства и формирования затрат в организациях строительной отрасли / А.Н. Наместникова // Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. – 2021. – № 4(39). – С. 41–47. – DOI: 10.21777/2587-554X-2021-4-41-47.

16. Бродунов, А.Н. Проблема учета операционного риска в модели ценообразования капитальных активов / А.Н. Бродунов // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. – 2019. – № 1(28). – С. 29–38. – DOI: 10.21777/2587-554X-2019-1-29-38.

17. Журавлев, П.А. Ресурсообеспечение инвестиционно-строительной деятельности как основа обоснования эффективности инвестиционных программ / П.А. Журавлев, А.М. Марукян // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 1. – С. 59–66. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.59-66. – EDN HBZGHY.

18. Попов, А.Н. Риск ориентированный подход в разработке и реализации национальных и региональных проектов / А.Н. Попов // Global and Regional Research. – 2021. – Т. 3. – № 4. – С. 114–120. – EDN GZUPTP.

References

1. Benklyan, S. Rukovodstvo po informatsionnomu modelirovaniyu (BIM) dlya zakazchikov na primere promyshlennykh obektov. Versiya 1.0 / S. Benklyan, T. Kisel, M. Korol, N. Novkovich. – М. : Konkurator, 2023.

2. Korol, M.G. BIM v Rossii vse eshche dlya rannego bolshinstva / M.G. Korol // Informatsionno-analiticheskij zhurnal RUBEZH. – 2022. – № 11.

3. Talapov, V.V. Osnovy BIM. Vvedenie v informatsionnoe modelirovanie zdaniy / V.V. Talapov. – Saratov : Profobrazovanie, 2021.

4. Filp, D. BIM – 7 shagov k sovershenstvu / D. Filp // Informatsionno-analiticheskij zhurnal RUBEZH. – 2021. – № 7.

8. Vereshchagin, V.V. Upravlenie riskami v usloviyakh primeneniya tekhnologij informatsionnogo modelirovaniya stroitelnykh obektov: osobennosti i vozmozhnosti / V.V. Vereshchagin, T.YU. SHemyakina // Problemy analiza riska. – 2020. – № 3.

9. Korolkova, E.M. Risk-menedzhment: upravlenie proektnymi riskami : ucheb. posobie / E.M. Korolkova. – Tambov : Izd-vo TGTU, 2023.

10. Kostrikin, P.N. Ipotechnoe kreditovanie v Rossii / P.N. Kostrikin. – М. : Maks Press, 2013.

11. Krui, M. Osnovy risk-menedzhmenta / M. Krui, D. Gelai, V.B. Minasyan, R. Mark. – М. : YUrajt, 2024.

12. Lazarova, L.B. Ipotechnoe zhilishchnoe kreditovanie i strakhovanie : ucheb. posobie dlya magistrrov / L.B. Lazarova. – М. : Prometej, 2019.

13. Malashikhina, N.N. Risk-menedzhment : ucheb. posobie / N.N. Malashikhina, O.S. Belokrylova. – Rostov n/D. : Feniks, 2024.

14. Kostyaeva, E.V. Transformatsiya mekhanizma obespecheniya finansovoj bezopasnosti strakhovykh organizatsij v usloviyakh vnedreniya risk-orientirovannogo podkhoda / E.V. Kostyaeva, N.I. Aksenova // Ekonomicheskaya bezopasnost. – 2022. – Т. 5. – № 2. – С. 655–672. – DOI: 10.18334/ecsec.5.2.114420. – EDN RQKWLW.

15. Namestnikova, A.N. Osobennosti proizvodstva i formirovaniya zatrat v organizatsiyakh stroitelnoj otrasli / A.N. Namestnikova // Vestnik Moskovskogo universiteta imeni S.YU. Vitte. Seriya 1: Ekonomika i upravlenie. – 2021. – № 4(39). – С. 41–47. – DOI: 10.21777/2587-554X-

2021-4-41-47.

16. Brodunov, A.N. Problema ucheta operatsionnogo riska v modeli tsenoobrazovaniya kapitalnykh aktivov / A.N. Brodunov // Vestnik Moskovskogo universiteta im. S.YU. Vitte. Seriya 1: Ekonomika i upravlenie. – 2019. – № 1(28). – S. 29–38. – DOI: 10.21777/2587-554X-2019-1-29-38.

17. ZHuravlev, P.A. Resursoobespechenie investitsionno-stroitelnoj deyatelnosti kak osnova obosnovaniya effektivnosti investitsionnykh programm / P.A. ZHuravlev, A.M. Marukyan // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2021. – № 1. – S. 59–66. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.59-66. – EDN HBZGHY.

18. Popov, A.N. Risk orientirovannyj podkhod v razrabotke i realizatsii natsionalnykh i regionalnykh proektov / A.N. Popov // Global and Regional Research. – 2021. – T. 3. – № 4. – S. 114–120. – EDN GZUPTP.

Improvement of the Construction Project Management System in Order to Reduce Risks, Arising from Conflicts of Interest at the Design Stage

V.A. Ioshkin, Ya.V. Shesterikova

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

Key words and phrases: construction project; design; conflict of interest; risk management; project management system; organizational and managerial decisions; BIM.

Abstract. In the context of the growing scale and complexity of modern construction projects, the problem of conflicts of interest at the design stage is becoming particularly relevant, which affects strategic decisions, timing and cost of implementation. The purpose of this study is to improve the management of a construction project by integrating risk-based methods to reduce and prevent conflicts of interest at the design stage. To achieve this goal, the following tasks were identified: to analyze the causes and classify conflicts of interest between the main participants (investor, developer, customer, designer, operator, government agencies) in the design process; to analyze a typical construction project management system and identify deficiencies in conflict management; to develop a methodology for integrating risk management and system management procedures conflicts of interest; to create a structured conflict of interest risk management model and provide practical recommendations for its implementation. In the course of the work, it was hypothesized that the introduction of formalized methods for managing the risks of conflicts of interest at the design stage (including their identification, classification and digital verification) can increase the transparency of processes, reduce the frequency and consequences of conflicts, thereby increasing the efficiency and sustainability of construction projects. The following research methods were used: system and process approaches; structural-functional and causal analysis; risk management methods according to ISO 31000:2018; tools for functional analysis of conflict situations; analysis of the effectiveness of the introduction of digital tools (TIM/BIM, EDI).

© В.А. Иошкин, Я.В. Шестерикова, 2026

УДК 005.41

Принципы управления изменениями в организации при переходе к экономике замкнутого цикла

Н.И. Мухаметханова

*ЧОУ ВО «Казанский инновационный университет
имени В.Г. Тимирязова»,
г. Казань (Россия)*

Ключевые слова и фразы: классификация; принципы; устойчивое развитие; управление изменениями; экономика замкнутого цикла.

Аннотация. Целью исследования является формирование классификации принципов управления изменениями в организации для обеспечения устойчивого развития при переходе к экономике замкнутого цикла (**ЭЗЦ**). Основные задачи заключаются в анализе концепций управления организацией; формировании классификации принципов управления изменениями в организации для обеспечения устойчивого развития при переходе к экономике замкнутого цикла; разработке системы интеграции принципов в виде карты взаимосвязей, объединяющих и систематизирующих принципы управления изменениями. Гипотеза исследования предполагает, что основным фактором формирования принципов управления изменениями в организации при переходе к ЭЗЦ является человеческий фактор, учет всех заинтересованных сторон и снижение сопротивления персонала. Соблюдение основных сформированных принципов управления изменениями способствует снижению сопротивления сотрудников к внедрению изменений и обеспечивает быстрый и успешный переход организации к ЭЗЦ. В работе использовались аналитические методы исследования, а также методы классификации и моделирования.

В статье проанализированы принципы существующих концепций управления. На основании данного анализа определен ключевой фактор успешного и быстрого перехода организации к ЭЗЦ – человеческий фактор. Также в результате исследования сформирована классификация принципов управления изменениями в организации, создана система интеграции принципов в виде карты взаимосвязей, объединяющих и систематизирующих принци-

пы управления изменениями.

Переход организаций к новой модели экономики замкнутого цикла (**ЭЗЦ**) обусловлен рядом объективных причин, связанных с ужесточением законодательства в области охраны окружающей среды, принципами ресурсосбережения, большим объемом образующихся отходов, *ESG*-концепцией, экологической повесткой. Быстрое и эффективное внедрение инструментов ЭЗЦ требует модернизации системы управления в организации, соответственно необходимо внедрение инструментов управления изменениями, базирующихся на учете и анализе внешних и внутренних факторов. В организации, внедряющей бизнес-модель ЭЗЦ, будет целесообразно создать постоянно действующую комиссию по внедрению и управлению изменениями, в которую будут входить представители структурных подразделений, участвующих в модернизации основных процессов в организации и системы ее управления. Стратегически важным аспектом управления изменениями в организации является соблюдение основных принципов, что позволит соответствовать стратегическим целям управления изменениями, минимизировать риски, обеспечить системный подход к внедрению изменений, повысить управляемость изменений, обеспечить экономическую целесообразность внедрения новой бизнес-модели и снизить сопротивление персонала через вовлечение сотрудников в управление изменениями.

Для формирования основных принципов управления изменениями в организации при переходе к ЭЗЦ необходимо проанализировать основные концепции управления, среди которых концепция корпоративной социальной ответственности, концепция ответственного управления, концепция заинтересованных лиц и концепция инклюзивного управления (рис. 1). Исследование основных концепций подтверждает значимость ключевого фактора, влияющего на эффективность управления изменениями – человека, и, соответственно, классификация принципов ориентирована на интеграцию человеческих факторов в процесс управления.

Наиболее актуальной концепцией, внедряемой в российских организациях, на сегодняшний день можно считать концепцию корпоративной социальной ответственности (**КСО**), представляющую собой осуществление интересов организации путем предоставления социального развития сотрудникам и активного участия организации в развитии социума на основе принципов ответственности, прозрачности, учета интересов всех заинтересованных сторон, соблюдения законодательства, устойчивого развития и добровольности, которые формируют основу для устойчивого и ответственного развития компании.

Важным фактором для организаций продолжает оставаться обеспечение их устойчивого развития, в контексте которого ЭЗЦ является неотъемлемым его инструментом. В отличие от концепции КСО, модель ответственного управления учитывает долгосрочные интересы всех заинтересованных сторон: государства, сотрудников, клиентов, партнеров, окружающей среды и будущих поколений, что и обеспечивает долгосрочную устойчивость организации, т.к. компании, учитывающие интересы стейкхолдеров, оказываются более устойчивыми в период кризиса, вызывают больше доверия и имеют лучшую репутацию. В данной концепции ключевую роль играет принцип долгосрочной ценности и устойчивости, который обеспечивает создание финансовой стабильности и системной устойчивости для акционеров в долгосрочной перспективе. Данная концепция предполагает извлечение ценности из максимизации полезности ресурсов, продления жизненного цикла продуктов и создания новых бизнес-моделей (аренда, сервис, повторное использование). При изменении системы управления целесообразным становится учет взаимосвязи принципов

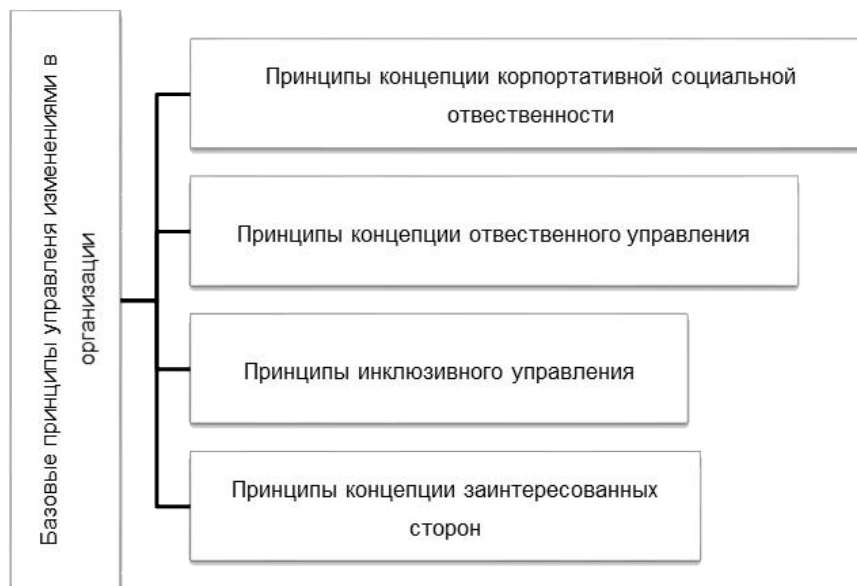


Рис. 1. Принципы управления изменения в организации

данной концепции, где результатом становится создание долгосрочной ценности для всех внешних и внутренних потребителей.

Высокую актуальность приобретает также концепция инклюзивного управления, которая представляет собой стратегию и подход, направленные на создание равных возможностей и условий участия для всех членов команды, независимо от их индивидуальных особенностей, способностей и потребностей [3]. Это проявляется как во включении представителей структурных подразделений в постоянно действующую комиссию по управлению изменениями, так и в обучении в области экологии, повышении мотивации сотрудников к реализации экологических и социальных мероприятий различных направлений для достижения быстрого и эффективного перехода организаций к ЭЗЦ. Кроме того, очень важен диалог с внешними потребителями. Целесообразно развивать проекты с поставщиками по выработке требований к материалам (пригодность для вторичной переработки, ремонта), упаковке, логистике возвратных потоков. Клиенты могут быть интегрированы в совместное обсуждение ремонтпригодности продукции, ее переработки или повторного использования. Кроме того, инклюзивное управление помогает выполнить государственные требования по минимизации воздействия на окружающую среду, повышению экологической безопасности, ресурсосбережению с меньшими издержками и большей эффективностью через совместные проекты по раздельному сбору отходов, созданию инфраструктуры и конструктивному диалогу по разработке норм в области расширенной ответственности производителя, стандартов для вторичных материалов.

Инклюзивное управление в данном контексте – это практический инструмент для создания долгосрочной ценности не только экономической, но и социальной, что полностью соответствует интегральной цели ESG-трансформации.

Анализируя различные концепции управления, можно выделить наиболее значимые принципы, относящиеся к процессу внедрения изменений в организации, и разработать классификацию принципов управления изменениями в организации при переходе к ЭЗЦ следующим образом.

1. Партнерское взаимодействие всех заинтересованных сторон в процессе внедре-

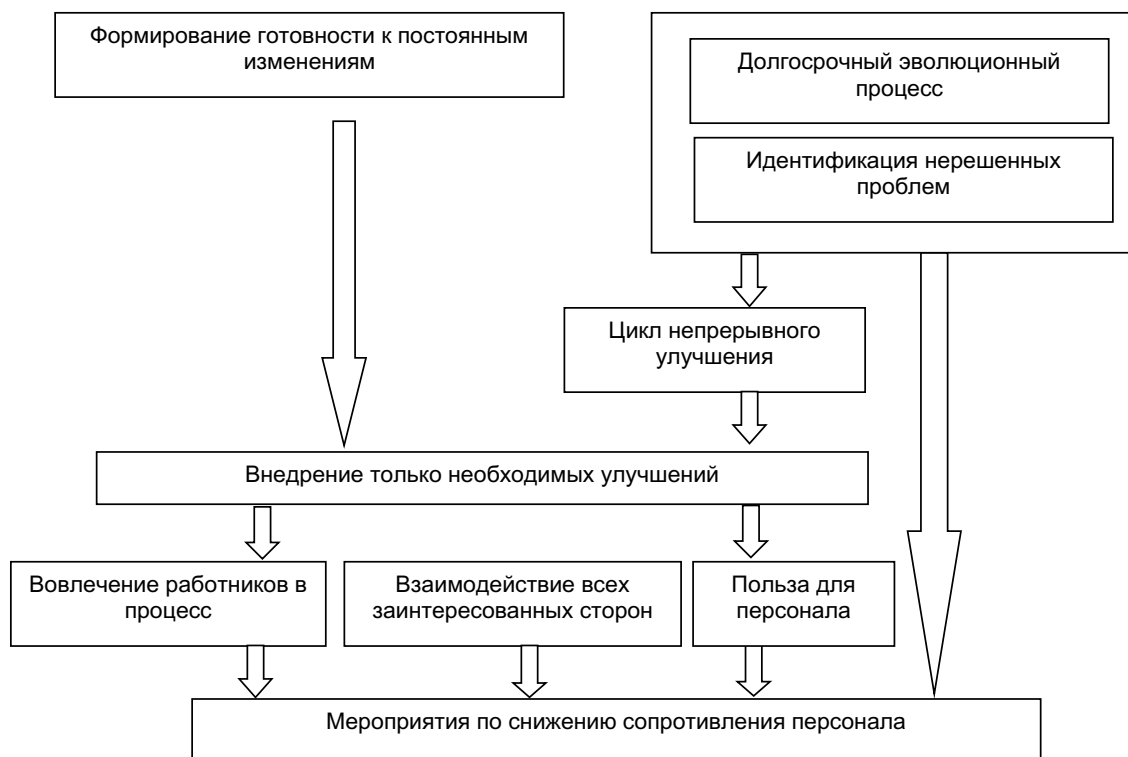


Рис. 2. Система интеграции принципов управления изменениями

ния изменений в организации.

2. Вовлечение персонала в процесс осуществления перемен с целью снижения сопротивления работников к изменениям и повышения мотивации к внедрению инноваций.

3. Готовность персонала к постоянным изменениям, овладению новыми навыками.

4. Польза для персонала от проводимых изменений.

5. Восприятие процесса изменений в организации как долгосрочного, эволюционного процесса, требующего вложения финансовых и человеческих ресурсов с целью достижения долгосрочной ценности.

6. Идентификация рисков, которые не удалось минимизировать в процессе изменений.

Кроме того, рекомендуется сформировать дополнительный принцип интеграции изменений, включающий формирование или корректировку стратегии управления, модернизацию инфраструктуры, информационного обеспечения и комплексное управление персоналом, где также ключевым звеном становится учет и взаимовыгодное сотрудничество со всеми заинтересованными сторонами.

На основании представленной группы принципов управления изменениями предлагается к использованию система интеграции принципов в виде карты взаимосвязей, объединяющих и систематизирующих принципы с целью снижения сопротивления персонала к изменениям, а также эффективного и безболезненного перехода организаций к ЭЗЦ, а соответственно, и обеспечения устойчивого развития организации (рис. 2).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что интеграция вышеобозначенных концептов может быть выражена совокупностью принципов управления организационными изменениями при переходе к ЭЗЦ.

Концепция управления изменениями в организации при переходе к ЭЗЦ включает

смену парадигмы деятельности организации, осознание перехода от линейной к циклической модели экономики: сильное лидерство, внедрение циклических бизнес-моделей, масштабное обучение персонала, формирование мотивации к внедрению изменений, работа с внешними и внутренними факторами, сотрудничество со всеми заинтересованными сторонами. Это позволило сформировать базовые принципы управления изменениями в организации при переходе к ЭЗЦ, к числу которых отнесены вовлеченность и готовность сотрудников к постоянным изменениям, овладению новыми навыками, снижение сопротивления персонала [1].

Литература

1. Антонова, И.И. О процессе управления изменениями на предприятии при переходе к экономике замкнутого цикла / И.И. Антонова, Н.И. Мухаметханова // Экономика и управление. – 2025. – Т. 31. – № 3. – С. 291–301. – DOI: 10.35854/1998-1627-2025-3-291-301. – EDN EUXWIS.
2. Антонова, И.И. К оценке эффективности менеджмента устойчивого развития организаций / И.И. Антонова, В.А. Смирнов // Компетентность. – 2024. – № 2. – С. 46–49. – DOI: 10.24412/1993-8780-2024-2-46-49. – EDN DTXRIF.
3. Антонова, И.И. Циркулярная экономика. Обеспечение устойчивого развития и конкурентоспособности региона / И.И. Антонова, Л.А. Кормишкина, Т.А. Салимова. – М. : ИНФРА-М, 2023. – 270 с. – EDN HQCVOM.
4. Божко, Л.М. Принципы управления организационными изменениями в экономике трансформаций / Л.М. Божко // Промышленная политика в условиях вызовов глобальной трансформации: теория и практика перехода к новому этапу индустриального развития (НИО-2) : сборник материалов VIII Санкт-Петербургского международного экономического конгресса (СПЭК-2023), Санкт-Петербург, 31 марта 2023 года. – М. : Институт нового индустриального развития им. С.Ю. Витте, 2023. – С. 203–209. – EDN OUNLDP.

References

1. Antonova, I.I. O protsesse upravleniya izmeneniyami na predpriyatii pri perekhode k ekonomike zamknutogo tsikla / I.I. Antonova, N.I. Mukhametkhanova // Ekonomika i upravlenie. – 2025. – T. 31. – № 3. – S. 291–301. – DOI: 10.35854/1998-1627-2025-3-291-301. – EDN EUXWIS.
2. Antonova, I.I. K otsenke effektivnosti menedzhmenta ustojchivogo razvitiya organizatsij / I.I. Antonova, V.A. Smirnov // Kompetentnost. – 2024. – № 2. – S. 46–49. – DOI: 10.24412/1993-8780-2024-2-46-49. – EDN DTXRIF.
3. Antonova, I.I. TSirkulyarnaya ekonomika. Obespechenie ustojchivogo razvitiya i konkurentosposobnosti regiona / I.I. Antonova, L.A. Kormishkina, T.A. Salimova. – M. : INFRA-M, 2023. – 270 s. – EDN HQCVOM.
4. Bozhko, L.M. Printsipy upravleniya organizatsionnymi izmeneniyami v ekonomike transformatsij / L.M. Bozhko // Promyshlennaya politika v usloviyakh vyzovov globalnoj transformatsii: teoriya i praktika perekhoda k novomu etapu industrialnogo razvitiya (NIO-2) : sbornik materialov VIII Sankt-Peterburgskogo mezhdunarodnogo ekonomicheskogo kongressa (SPEK-2023), Sankt-Peterburg, 31 marta 2023 goda. – M. : Institut novogo industrialnogo razvitiya im. S.YU. Vitte, 2023. – S. 203–209. – EDN OUNLDP.

Principles of Management of Organization in Circular Economy

N.I. Mukhametkhanova

*Kazan Innovative University named after V.G. Timiryasov,
Kazan (Russia)*

Key words and phrases: sustainable development; circular economy; changes management; principles; classification.

Abstract. The purpose of the study is to form a classification of the principles of change management in the organization to ensure sustainable development in the transition to a circular economy. The main tasks are to analyze the concepts of organization management, form a classification of the principles of change management in the organization to ensure sustainable development in the transition to a circular economy, develop a system for integrating principles in the form of a map of relationships that unite and systematize the principles of change management. The hypothesis of the study suggests that the main factor in the formation of the principles of change management in the organization during the transition to the CE is the human factor and consideration of all stakeholders, and the decrease in compliance with the basic principles of change management helps reduce the resistance of employees to implement changes and ensures a quick and successful transition of the organization to the CE. The work used analytical research methods, as well as classification and modeling methods.

The circular economy, being a tool for ensuring sustainable development of the organization and a global trend by the global trend, requires structural and organizational changes in the organization's management system. The article analyzes the principles of existing management concepts. Based on this analysis, the key factor in the successful and rapid transition of the organization to the CE is the human factor. Also, as a result of the study, a classification of the principles of change management in the organization was formed, a system of integrating principles in the form of a map of relationships combining and systematizing the principles of change management.

© Н.И. Мухаметханова, 2026

УДК 69.003.13

Совершенствование процесса реализации строительных проектов при ограниченных ресурсах методом критической цепи

А.О. Хубаев, Р.В. Алейник

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

Ключевые слова и фразы: буфер подстраховки; диаграмма Ганта; закон Паркинсона; критический путь; метод критической цепи; студенческий синдром; теория ограничений систем.

Аннотация. В условиях современных реалий и острой конкурентной борьбы искусство управления проектами вынуждает руководителей внедрять передовые технологии управления. Компаниям приходится постоянно повышать требования к ключевым показателям эффективности проектов, а именно стремиться к максимальному соответствию полученного результата заданным параметрам в установленный срок и в рамках запланированного бюджета. Основные проблемы, возникающие в процессе реализации проектов, – вариативность процессов, нехватка людей, перегрузка, проблемы с подрядчиками, студенческий синдром, закон Паркинсона. Попытки ужесточить процессы приводят к большей бюрократии и перегрузке системы. Ключом к решению данной проблемы стало применение теории ограничения системы, инструментом реализации данного метода стал метод критической цепи (**МКЦ**). Результатом внедрения МКЦ стало существенное повышение основных показателей эффективности реализации проектов с 30 до 86 %.

Введение

Современная практика реализации инвестиционно-строительных проектов развивается в условиях нарастающих вызовов, включая обострение рыночной конкуренции, ужесточение временных лимитов, бюджетную ограниченность и кадровый дефицит. Производственная деятельность осложняется участием многочисленных контрагентов, формирующих сложные организационно-коммуникационные связи. Согласно аналитическим исследованиям, порядка 30 % проектов прекращаются на стадии активной реализации, что влечет безвозвратную утрату временных, материальных и трудовых ресурсов. Зна-

чительная доля успешно завершённых объектов демонстрирует превышение первоначально утверждённых сроков и сметной стоимости при неполном достижении целевых показателей. Фиксируемые отклонения нередко достигают 100 %, формируя глобальную систему финансовых потерь, исчисляемых миллиардами долларов. Показательным примером служит подготовка к XXII Олимпийским играм в Сочи, где отмечалась значительная вероятность срыва графика ввода объектов при параллельном существенном перерасходе бюджетных ассигнований. Аналогичные проблемы идентифицируются в различных отраслях и географических контекстах, что свидетельствует об универсальной природе управленческой проблемы. Традиционные методики повышения эффективности часто приводят к негативным последствиям: разрастанию бюрократического аппарата, увеличению документооборота при минимальном росте производительности. Сложившаяся ситуация актуализирует необходимость поиска инновационных подходов, преодолевающих консерватизм классической парадигмы управления проектами.

Наработанный комплекс проблем требует принципиально новых управленческих решений. Одним из таких инструментов, демонстрирующих результативность в условиях ресурсной ограниченности и операционной неопределённости, выступает метод критической цепи (**МКЦ**), рассматриваемый в рамках данного исследования применительно к строительной отрасли. Метод критической цепи, концептуализированный в 1990-х годах, осуществил переворот в проектном менеджменте, исключив ключевой недостаток традиционных подходов. Классическая методология основывается на идеализированной модели, предполагающей, что достаточно разработать детализированный сетевой график и обеспечить его реализацию.

Теоретико-методологические основания метода критической цепи

Метод критической цепи (англ. *Critical Chain Project Management, CCPM*) представляет собой методологию планирования и управления проектами, интегрирующую принципы теории ограничений систем (**ТОС**) и, в дополнение к традиционным техникам (например, *PERT*), акцентирующую учет ресурсных зависимостей, рисков и факторов неопределённости. Базовыми инструментами МКЦ выступают буферы, создаваемые для минимизации проектных рисков и повышения устойчивости календарного графика. В их структуре выделяются:

- проектный буфер: локализуется в конце критической цепи для защиты общего хронометража проекта;
- питающие буферы: размещаются в точках конвергенции некритических цепей с критической для защиты последней от потенциальных задержек;
- ресурсные буферы: применяются для гарантирования доступности ключевых ресурсов в требуемые временные периоды.

Визуализация статуса проекта осуществляется посредством диаграммы Ганта «трендов проникновения в буферы» (рис. 1), позволяющей менеджеру в режиме реального времени оценивать уровень риска и оперативно инициировать корректирующие мероприятия. Дополнительной отличительной характеристикой метода является построение графика «от конечного срока» (от установленного дедлайна), а не от начала, что формирует психологическую установку команды на своевременное завершение работ.

Метод разработан Элияху Голдраттом, основателем теории ограничений систем. Первоначально ТОС апробировалась в промышленном производстве, где ее целеполаганием было увеличение скорости генерации доходов, сокращение объема иммобилизованного

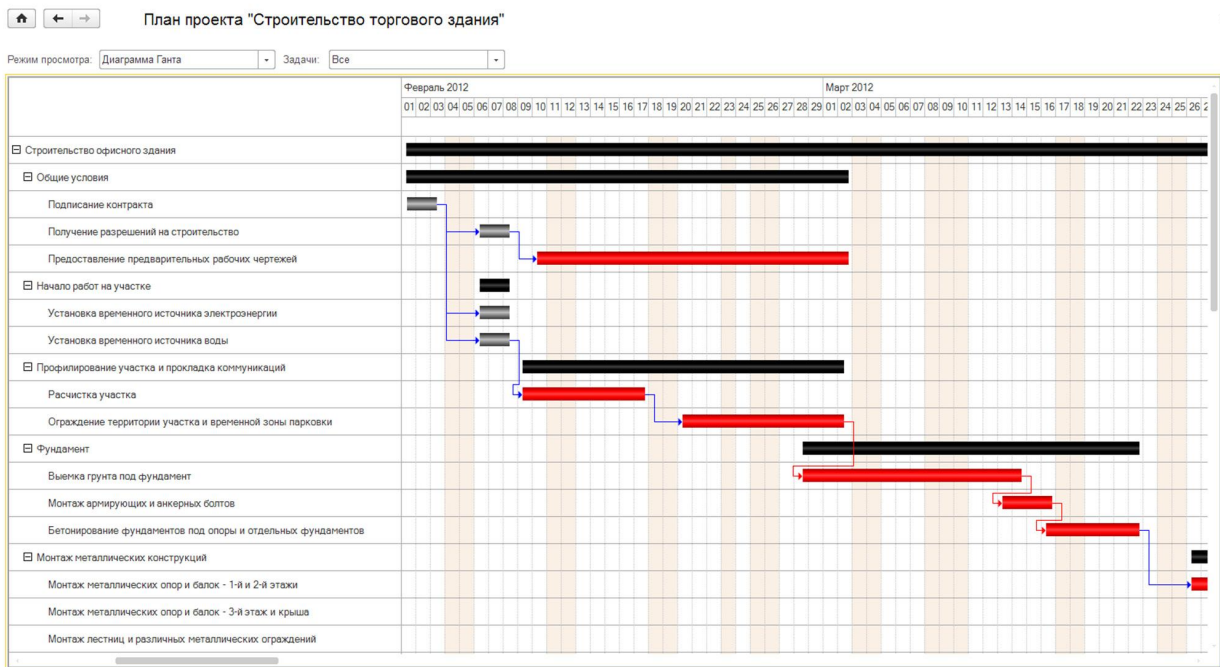


Рис. 1. Диаграмма Ганта «трендов проникновения в буферы»



Рис. 2. Пять фокусирующих шагов теории ограничений систем

капитала и оптимизация операционных издержек. Последовательная реализация пяти шагов фокусировки ТОС (рис. 2) позволяет идентифицировать и управлять системными ограничениями.

Шаг 1. Идентификация системного ограничения.

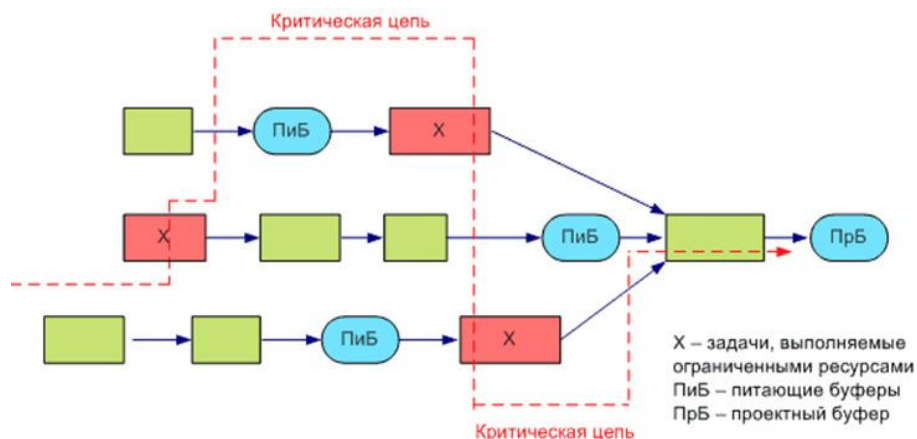


Рис. 3. ТОС в сфере управления проектами

Шаг 2. Принятие решения о максимально эффективной эксплуатации данного ограничения.

Шаг 3. Субординация остальных элементов системы принятому решению.

Шаг 4. Нарращивание пропускной способности ограничения.

Шаг 5. В случае элиминации ограничения на предыдущем шаге – возврат к шагу 1 для предотвращения управленческой инерции.

Данный алгоритм был успешно адаптирован для сферы управления проектами, где в качестве системного ограничения выступает критическая цепь (рис. 3).

Сравнительный анализ МКЦ и метода критического пути

Фундаментальная дивергенция между двумя методами заключается в подходе к учету неопределенности и ресурсных лимитов.

Метод критического пути (МКП) рассматривает исключительно технологические зависимости между операциями. Неопределенность учитывается имплицитно, путем инкорпорирования резервов времени в продолжительность каждой отдельной задачи. При этом игнорируется конкуренция за общие ресурсы, что в практической плоскости часто провоцирует «ресурсные конфликты» и необходимость перепланирования.

Метод критической цепи эксплицитно учитывает как технологические, так и ресурсные зависимости. Резервы времени («буферы подстраховки») эвакуируются из индивидуальных задач и агрегируются в консолидированные буферы проекта. Это позволяет сформировать более сжатый и реалистичный график, защищенный от стохастических колебаний на системном уровне. Таким образом, критическая цепь определяется как наиболее протяженная последовательность задач, учитывающая как технологические связи, так и ресурсную доступность. При отсутствии в проекте дефицита ресурсов критическая цепь совпадает с критическим путем (рис. 3).

На основе поведенческой экономики и психологических факторов в проектном управлении Э. Голдратт и его последователи, в частности Л. Лич, обосновали необходимость МКЦ, апеллируя к ряду устойчивых поведенческих паттернов, которые системно определяют проблемы процесса реализации проектов.

Студенческий синдром: тенденция к прокрастинации начала работ по задаче до критического момента, несмотря на наличие временного резерва. Это приводит к тому, что

весь запас времени расходуется до старта активной фазы и любая незапланированная проблема ведет к срыву сроков.

Закон Паркинсона: работа расширяется, чтобы заполнить все отведенное на нее время. Если на задачу выделено 10 дней, она с высокой вероятностью займет 10 дней, даже если могла бы быть выполнена за 7. Более того, досрочное завершение задачи часто камуфлируется, а высвободившийся временной ресурс расходуется на избыточное «совершенствование» результата.

Деконцентрация вследствие многозадачности: при параллельной работе над несколькими задачами из-за постоянного переключения когнитивного контекста совокупная длительность их выполнения существенно возрастает. Л. Лич иллюстрирует это примером: три задачи, каждая из которых в режиме фокусировки требует 1 неделю, при параллельном выполнении могут растянуться на 3 недели каждая.

Кумулятивный эффект этих факторов приводит к полному исчерпанию любых, даже самых значительных, резервов времени задолго до финализации проекта. МКЦ нивелирует эти паттерны через агрегацию буферов, что делает «студенческий синдром» несущественным, и пропагандой принципа «выполняй одну задачу последовательно», что минимизирует потери от многозадачности.

Преимущества и ограничения МКЦ

Преимущества метода.

1. Выровненная нагрузка ресурсов по времени: в отличие от метода критического пути, вы не скованы жесткой последовательностью задач или строгим планированием.

2. За одну единицу времени выполняется одна задача: можно рассматривать как плюс (нет опасности наложения заданий), так и минус, потому что к исполнителю предъявляются повышенные требования к умению быстро переключаться между задачами и цепочками задач.

3. Легко обнаружить возникающие задержки и угрозы срыва сроков окончания проекта: благодаря буферам (буферы проекта, ресурсов и времени и питающий буфер) менеджер проекта способен «защитить» дату окончания проекта от вариаций задач.

4. Фокус ресурсов на критически важных задачах: позволяет устранить конкуренцию за ресурсы в рамках проекта.

Недостатки и операционные ограничения метода.

1. Увеличение длительности проекта: объединение буферов может генерировать иллюзию более длительного цикла по сравнению с изначально оптимистичным графиком, составленным по МКП. Однако на практике данные свидетельствуют, что МКЦ чаще приводит к сокращению актуального времени реализации.

2. Повышенные требования к компетенциям менеджера: успешная имплементация МКЦ требует глубокого понимания не только техники расчета, но и философских оснований ТОС. Недостаточная подготовка может привести к формальной адаптации метода без получения ожидаемого результата.

3. Организационная комплексность: метод требует трансформации укоренившейся культуры многозадачности и перехода к парадигме выделенной проектной команды. Это может быть труднореализуемо в организациях с матричной структурой, где ресурсы распределены между множеством проектов. Как отмечает эксперт ТОС Оued Коуэн, метод наиболее эффективен в рамках крупных проектов или в отраслях с проектной организацией труда.

4. Необходимость секторальной адаптации для строительства: в связи с наличием жестких технологических последовательностей в строительстве прямое применение «канонического» МКЦ может быть сопряжено с трудностями. Это требует креативной адаптации метода с учетом отраслевой специфики и более применительно к крупным проектам.

Анализ прецедента внедрения МКЦ в строительной отрасли

Опыт японской компании *Juntos*, специализирующейся на проектировании и возведении мостовых сооружений для государственного сектора, релевантно демонстрирует эффективность МКЦ. Столкнувшись с редуциацией государственного финансирования и эскалацией конкурентной борьбы, руководство компании в 2007 г. инициировало внедрение методологии теории ограничений для управления проектами. Достигнутые результаты: рост показателя своевременной сдачи проектов с 30 % до 86 %, что свидетельствует о радикальном повышении управляемости и прогнозируемости; сокращение операционного цикла проектов более чем на 20 %, что позволило компании увеличить портфель заказов; редуциация затрат на материалы и оборудование более чем на 20 % благодаря оптимизации логистических цепочек и минимизации простоев; интенсификация коммуникации с заказчиками вследствие повышения прозрачности и предсказуемости процессов. Успех *Juntos* является верифицированным доказательством того, что МКЦ может быть успешно адаптирован для строительной отрасли и генерировать значительные операционные и финансовые преимущества.

Заключение

Международный опыт апробации методологии критической цепи и ее теоретического фундамента – теории ограничений систем – подтверждает ее высокую эффективность в контексте нестабильности и ресурсной скудности. Индикативным является тот факт, что компании, внедрившие ТОС, не только успешно преодолели мировой экономической кризис 2008–2009 годов, но и во многих кейсах продемонстрировали рост, в то время как их конкуренты фиксировали регресс показателей. Для строительной отрасли, исторически подверженной проблемам хронометражных срывов, бюджетных превышений и ресурсных конфликтов, метод критической цепи предлагает системный и верифицированный подход к повышению производительности. Он позволяет трансмутировать управление из реакции на инциденты в проактивный менеджмент рисков и потенциалов.

Несмотря на существующие барьеры, связанные с необходимостью адаптации метода и развития управленческих компетенций, потенциальные выгоды от его внедрения существенно экстраполируют затраты. Таким образом, оптимизация процессов управления строительными проектами на основе методологии критической цепи репрезентирует одно из наиболее перспективных направлений для достижения плановых показателей в условиях ресурсных ограничений.

Литература

1. Голдратт, Э.М. Цель. Процесс непрерывного совершенствования / Э.М. Голдратт, Дж. Кокс; пер. с англ. Е. Федурко. – Минск : Попурри, 2014. – 400 с.
2. Детмер, У. Теория ограничений Голдратта: Системный подход к непрерывному совершенствованию : 2-е изд. / У. Детмер; пер. с англ. У. Саламатова. – М. : Альпина Бизнес

Букс, 2008. – 444 с.

3. Голдратт, Э.М. Критическая цепь / Э.М. Голдратт; пер. с англ. Е. Федурко. – Минск : Попурри, 2013. – 240 с.

4. Лич, Л. Вовремя и в рамках бюджета: Управление проектами по методу критической цепи : 2-е изд. / Л. Лич; пер. с англ. У. Саламатова. – М. : Альпина Паблишер, 2014. – 352 с.

5. Голдратт-Ашлаг, Э. Правила потока для управления проектами по Голдратту / Э. Голдратт-Ашлаг; пер. с англ. А. Брызгалова. – М. : Альпина ПРО, 2025. – 160 с.

6. Болотин, С.А. Адаптация метода критической цепи при поточной организации работ / С.А. Болотин, М.А. Котовская // Недвижимость: экономика, управление. – 2014. – № 3-4. – С. 38–43.

7. Котовская, М.А. Особенности теории ограничений систем Голдратта и метода критической цепи в области календарного планирования строительных проектов / М.А. Котовская // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – С. 234.

8. Погодин, Д.А. Основы технологического моделирования в строительстве / Д.А. Погодин, А.В. Ищенко, Т.Х. Бидов [и др.]. – М. : АСВ, 2022. – 134 с.

9. Коуэн, О. Основы Теории Ограничений / О. Коуэн, Е. Федурко. – Таллин : tocExpert, 2017. – 354 с.

10. Бакланова, Ю.О. Внедрение метода критической цепи в организации / Ю.О. Бакланова, Н.М. Моисеева // Современные технологии управления. – 2012. – № 5(17) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://sovman.ru/article/1701>.

References

1. Goldratt, E.M. Tsel. Protsess nepreryvnogo sovershenstvovaniya / E.M. Goldratt, J. Koks; per. s angl. E. Fedurko. – Minsk : Popurri, 2014. – 400 s.

2. Detmer, U. Teoriya ogranichenij Goldratta: Sistemnyj podkhod k nepreryvnomu sovershenstvovaniyu : 2-e izd. / U. Detmer; per. s angl. U. Salamatova. – M. : Alpina Biznes Buks, 2008. – 444 s.

3. Goldratt, E.M. Kriticheskaya tsep / E.M. Goldratt; per. s angl. E. Fedurko. – Minsk : Popurri, 2013. – 240 s.

4. Lich, L. Vovremya i v ramkakh byudzheta: Upravlenie proektami po metodu kriticheskoy tsepi : 2-e izd. / L. Lich; per. s angl. U. Salamatova. – M. : Alpina Publisher, 2014. – 352 s.

5. Goldratt-Ashlag, E. Pravila potoka dlya upravleniya proektami po Goldrattu / E. Goldratt-Ashlag; per. s angl. A. Bryzgalova. – M. : Alpina PRO, 2025. – 160 s.

6. Bolotin, S.A. Adaptatsiya metoda kriticheskoy tsepi pri potochnoj organizatsii rabot / S.A. Bolotin, M.A. Kotovskaya // Nedvizhimost: ekonomika, upravlenie. – 2014. – № 3-4. – S. 38–43.

7. Kotovskaya, M.A. Osobennosti teorii ogranichenij sistem Goldratta i metoda kriticheskoy tsepi v oblasti kalendarnogo planirovaniya stroitelnykh proektov / M.A. Kotovskaya // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. – № 4. – S. 234.

8. Pogodin, D.A. Osnovy tekhnologicheskogo modelirovaniya v stroitelstve / D.A. Pogodin, A.V. Ishchenko, T.KH. Bidov [i dr.]. – M. : ASV, 2022. – 134 s.

9. Kouen, O. Osnovy Teorii Ogranichenij / O. Kouen, E. Fedurko. – Tallin : tocExpert, 2017. – 354 s.

10. Baklanova, YU.O. Vnedrenie metoda kriticheskoy tsepi v organizatsii / YU.O. Baklanova, N.M. Moiseeva // Sovremennye tekhnologii upravleniya. – 2012. – № 5(17) [Electronic

resource]. – Access mode : <https://sovman.ru/article/1701>.

Improving the Process of Implementing Construction Projects with Limited Resources by the Critical Chain Method

R.V. Aleynik, A.O. Khubaev

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

Key words and phrases: systems constraint theory; critical chain method; critical path; student syndrome; Parkinson's law; safety buffer; Gantt chart.

Abstract. In the conditions of modern realities and fierce competition, the art of project management forces managers to introduce advanced management technologies. Companies have to constantly increase the requirements for key performance indicators of projects, namely, to strive for the maximum compliance of the result with the specified parameters, on time and within the planned budget. The main problems that arise in the process of project implementation are process variability, lack of people, overload, problems with contractors, student syndrome, Parkinson's law. Attempts to tighten processes lead to more bureaucracy and overload of the system. The key to solving this problem was the use of system constraint theory, the tools for implementing this method was the critical chain method. The implementation of the critical chain method resulted in a significant increase in the main performance indicators of project implementation from 30 to 86 %.

© А.О. Хубаев, Р.В. Алейник, 2026

List of Authors

- 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
- Фокин В.М.** – доктор технических наук, профессор кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: leha.chebotaryow2016@yandex.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: leha.chebotaryow2016@yandex.ru
- Чеботарев А.А.** – студент Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: leha.chebotaryow2016@yandex.ru
- Chebotarev A.A.** – Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: leha.chebotaryow2016@yandex.ru
- Карпузов В.И.** – студент Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: v-karapuzov@list.ru
- Karapuzov V.I.** – Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: v-karapuzov@list.ru
- Ермилова Н.Ю.** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры инженерной графики, стандартизации и метрологии Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: n.y.ermilova@yandex.ru
- Ermilova N.Yu.** – Candidate of Science (Pedagogy), Associate Professor, Department of Engineering Graphics, Standardization and Metrology, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: n.y.ermilova@yandex.ru
- Галанов В.В.** – магистрант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: valeriy.galanov.72@mail.ru
- Galanov V.V.** – Master's Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: valeriy.galanov.72@mail.ru
- Кирпичева Е.М.** – магистрант Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань (Россия), e-mail: katerina7145@mail.ru
- Kirpicheva E.M.** – Master's Student, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan (Russia), e-mail: katerina7145@mail.ru
- Медведева Г.А.** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, газоснабжения и вентиляции Казанского государственного архитектурно-строительного универ-

ситета, г. Казань (Россия), e-mail: medvedevaga79@mail.ru

Medvedeva G.A. – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Heat Power Engineering, Gas Supply and Ventilation, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan (Russia), e-mail: medvedevaga79@mail.ru

Субботин Я.А. – магистрант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: yaroslav.subbotin1412@yandex.ru

Subbotin Ya.A. – Master's Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: yaroslav.subbotin1412@yandex.ru

Обиднов И.А. – магистрант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: obidnov.ilya@bk.ru

Obidnov I.A. – Master's Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: obidnov.ilya@bk.ru

Жупанов А.И. – магистрант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: Alex.jypanov@gmail.com

Zhupanov A.I. – Master's Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: Alex.jypanov@gmail.com

Ковылин А.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: kovylin.andrei@mail.ru

Kovylin A.V. – 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: kovylin.andrei@mail.ru

Тертишников И.В. – кандидат технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: ivann.bel@list.ru

Tertishnikov I.V. – Candidate of Science (Engineering), Professor, Department of Life Safety in Construction and Urban Management, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: ivann.bel@list.ru

Беляков И.А. – аспирант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: ivann.bel@list.ru

Belyakov I.A. – Postgraduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: ivann.bel@list.ru

Симаков В.С. – аспирант Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград (Россия), e-mail: ivann.bel@list.ru

Simakov V.S. – Postgraduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia), e-mail: ivann.bel@list.ru

Сулейманова Л.А. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства Белгородского государственного тех-

нологического университета имени В.Г. Шухова, г. Белгород (Россия), e-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

Suleimanova L.A. – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Construction and Urban Management, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod (Russia), e-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

Погорелова И.А. – кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова, г. Белгород (Россия), e-mail: innapogorelova@yandex.ru

Pogorelova I.A. – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Construction and Urban Management, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod (Russia), e-mail: innapogorelova@yandex.ru

Богачева М.А. – аспирант Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова, г. Белгород (Россия), e-mail: marisha_shugaeva@mail.ru

Bogacheva M.A. – Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod (Russia), e-mail: marisha_shugaeva@mail.ru

Бурый А.С. – независимый исследователь, г. Москва (Россия), e-mail: OLKozlova2017@mail.ru

Buryi A.S. – Independent Researcher, Moscow (Russia), e-mail: OLKozlova2017@mail.ru

Козлова О.Л. – кандидат экономических наук, доцент, директор Краснознаменского городского колледжа, г. Краснознаменск (Россия), e-mail: OLKozlova2017@mail.ru

Kozlova O.L. – Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Director, Krasnoznamensk City College, Krasnoznamensk (Russia), e-mail: OLKozlova2017@mail.ru

Космынина Т.А. – магистрант Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина, г. Москва (Россия), e-mail: sky1010sky@yandex.ru

Kosmyrnina T.A. – Master's Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow (Russia), e-mail: sky1010sky@yandex.ru

Остах С.В. – кандидат технических наук, доцент, руководитель учебно-научного комплекса физико-химических основ защиты окружающей среды Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва (Россия), e-mail: ostah2009@yandex.ru

Ostakh S.V. – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Educational and Scientific Complex of Physical and Chemical Foundations of Environmental Protection, A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow (Russia), e-mail: ostah2009@yandex.ru

Берталь Хаула – аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж (Россия), e-mail: khaoulabertal@yandex.ru

Bertal Khaoula – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh (Russia),

e-mail: khaoulabertal@yandex.ru

Капустин П.В. – кандидат архитектуры, доцент, заведующий кафедрой теории и практики архитектурного проектирования Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж (Россия), e-mail: pekad@rambler.ru

Капустин P.V. – Candidate of Science (Architecture), Associate Professor, Head of the Department of Theory and Practice of Architectural Design, Voronezh State Technical University, Voronezh (Russia), e-mail: pekad@rambler.ru

Иошкин В.А. – студент Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва (Россия), e-mail: me@ioshkin.ru

Ioshkin V.A. – Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow (Russia), e-mail: me@ioshkin.ru

Шестерикова Я.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и организации строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва (Россия), e-mail: shesterikova.jana@yandex.ru

Ya.V. Shesterikova – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Construction Technology and Organization, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow (Russia), e-mail: shesterikova.jana@yandex.ru

Мухаметханова Н.И. – старший преподаватель кафедры цифровой экономики и управления качеством Казанского инновационного университета имени В.Г. Тимирязова, г. Казань (Россия), e-mail: muhamethanova@ieml.ru

Mukhametkhanova N.I. – Senior Lecturer, Department of Digital Economics and Quality Management, Kazan Innovative University named after V.G. Timiryasov, Kazan (Russia), e-mail: muhamethanova@ieml.ru

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 for Structures, Technologies and Organization of Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow (Russia), e-mail: alan_khubaev@mail.ru

Алейник Р.В. – студент Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва (Россия), e-mail: r.aleynik@mail.ru

Aleinik R.V. – Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow (Russia), e-mail: r.aleynik@mail.ru

COMPONENTS OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PROGRESS
№ 1(115) 2026
SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

Manuscript approved for print 20.01.26

Format 60.84/8

Conventional printed sheets 10.93

Published pages 5.65

200 printed copies

16+

NTF RIM LLC