

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Адрес издателя, редакции и типографии:
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,
ПГУАС

Тел/факс 8412 929501

E-mail: regas@pguas.ru

fmatem@pguas.ru

www.rais.pguas.ru

Главная редакция:

Б.М. Гришин (главный редактор)

Е.В. Королев (заместитель
главного редактора)

И.А. Гарькина (ответственный
секретарь)

Редактор М.А. Сухова

Корректор Н.В. Кучина

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка

Н.А. Сазонова

Перевод Е.Г. Стешина

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору
за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.

Подписной индекс:

36946 в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов
несут ответственность за достоверность
приведенных сведений, точность данных
по цитируемой литературе и за исполь-
зование в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.

Редакция может опубликовать статьи
в порядке обсуждения, не разделяя точку
зрения автора.

Подписано к печати 14.09.2026.

Формат 60х84 1/8.

Уч.-изд.л. 26,125. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 116.

Дата выхода в свет 21.09.2026.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 2500 руб.

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО
3(68)/2026**

Содержание

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5**

Дергунова Е.С., Гончарова М.А.
**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
БИОМИНЕРАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
СТОЙКОСТИ БЕТОНА В АГРЕССИВНЫХ
СРЕДАХ..... 5**

Логанина В.И., Учаева Т.В., Зайцева М.В.
**РАЗРАБОТКА КАРТЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ
КАК ИНСТРУМЕНТА МИНИМИЗАЦИИ
ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ПРИ ДЕФЕКТАХ
ШТУКАТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ..... 13**

Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Токарев К.А.
**ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНОГО ГИПСА
ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ 21**

**Володин В.В., Низина Т.А.,
Коротин А.И., Матякубов Х.**
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНО-
АКТИВНЫМИ ДОБАВКАМИ И ГЛИНИТОМ..... 28**

Романенко И.И., Петровнина И.Н.
**ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ
КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО
НА СТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ В АГРЕССИВНЫХ
ВОДНЫХ РАСТВОРАХ 37**

Черкасов В.Д., Тюрякин М.А.
**САМОКЛЕЯЩИЙСЯ
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ 44**

Алфимова Н.И.
**ОЦЕНКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
И МОРФОСТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ
ЦИТРОГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ 50**

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ,
ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ..... 65**

Бакушев С.В., Баронин С.А.
**РАСЧЁТ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ
УПРУГИХ ИЗГИБАЕМЫХ БАЛОК
ИЗ УСЛОВИЯ ЖЁСТКОСТИ..... 65**

© Авторы публикаций, 2026

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2026

© ПГУАС, 2026

Комаров В.А., Болдырева О.В., Болдырев Е.С. ОПОРНЫЕ ЗОНЫ РИГЕЛЕЙ С ПОДРЕЗКОЙ ИЗ ФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОНА МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСОВ: ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ.....	73	Осипова Н.Н., Культяев С.Г. ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БУТАНА ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ	146
Гребнев П.А., Монич Д.В., Бобылев В.Н., Барчуков С.В., Березин Н.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УДАРНОГО ШУМА КОНСТРУКЦИЯМИ ПОЛОВ	81	Пономарева И.К. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КЛИМАТИЗАЦИИ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА УБРАНСТВА ПРАВОСЛАВНЫХ СООРУЖЕНИЙ	154
Королева Т.И., Мыскин С.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НАРУЖНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ	89	АРХИТЕКТУРА.....	160
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ	97	Лапшина Е.Г., Косаева А.В. ФОРМИРОВАНИЕ И ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА СУРСКОГО КРАЯ: ФОРТИФИКАЦИОННЫЕ СООРУЖЕНИЯ	160
Баженов В.И., Примин О.Г. МАТРИЦА ВЫБОРА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД: АДАПТАЦИЯ К РОССИЙСКИМ УСЛОВИЯМ	97	Гарькина И.А., Гарькин И.Н., Веселов В.В. МЕТОДОЛОГИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ЗДАНИЙ-ПАМЯТНИКОВ ПОД СОВРЕМЕННЫЕ УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ	169
Варенцов В.К., Кузина В.В., Кошев А.Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИОНОВ ЦЕРИЯ КАК ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРООКИСЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ОБЕЗВРЕЖИВАНИИ СТОЧНЫХ ВОД	110	Бекетова Т.С. ОРНАМЕНТАЛЬНЫЙ ДЕКОР В ПАНЕЛЬНОЙ ЗАСТРОЙКЕ УЛАН-УДЭ (СОВЕТСКИЙ ПЕРИОД)	177
Леонтьев В.А. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ: БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД ..	117	Девятникова Л.А., Агеева П.М. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МАСТЕРСКИХ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА	184
Малыгина О.А., Соколов В.И. ВЛИЯНИЕ РЕАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ НА КАЧЕСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ	124	Алам Эль Дин Сабрина Хассан, Викторова О.Л., Бабаков С.А. ТИПОЛОГИЯ И АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ОБЪЕКТОВ	192
Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Жукова В.П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В ПЛАСТИНЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ	133	Королева Л.А., Мику Н.В. АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗДАНИЙ РАДИОДОМОВ В СССР И ЗА РУБЕЖОМ, ПОСТРОЕННЫХ В 1930-1980-е гг.	203

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Grebnev P.A., Monich D.V., V.N. Bobylev, Barchukov S.V., Berezin N.S. EXPERIMENTAL STUDIES OF IMPACT NOISE INSULATION BY FLOOR STRUCTURES.....	81
Dergunova E.S., Goncharova M.A. APPLICATION OF BIOMINERALIZATION TECHNOLOGY TO INCREASE CONCRETE RESISTANCE IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS	5	Koroleva T.I., Myskin S.M. STUDYING TEMPERATURE FIELDS OF AN EXTERNAL ENCLOSING STRUCTURE USING COMPUTER-BASED SOFTWARE SYSTEMS	89
Loganina V.I., Uchaeva T.V., Zaytseva M.V. DEVELOPMENT OF A RISK ASSESSMENT MAP AS A TOOL FOR MINIMIZING ECONOMIC DAMAGE DUE TO DEFECTS IN PLASTER COATINGS	13	ENGINEERING SYSTEMS	97
Vilkova N.G., Mishina S.I., Tokarev K.A. CHANGES IN THE PROPERTIES OF BUILDING GYPSUM UNDER ULTRASONIC EXPOSURE	21	Bazhenov V.I., Primin O.G. MACHINE LEARNING ALGORITHM SELECTION MATRIX FOR BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT: ADAPTATION TO RUSSIAN CONDITIONS	97
Volodin V.V., Nizina T.A., Korotin A.I., Matyakubov H. EXPERIMENTAL-STATISTICAL MODELING THE PROPERTIES OF FINE-GRAINED CONCRETES MODIFIED BY SURFACE-ACTIVE ADDITIVES AND GLYNITE	28	Varentsov V.K., Kuzina V.V., Koshev A.N. DETERMINING CERIUM ION CONCENTRATIONS AS PROCESS PARAMETERS OF THE ELECTROOXIDATION OF ORGANIC COMPOUNDS DURING WASTEWATER TREATMENT	110
Romanenko I.I., Petrovnina I.N. THE EFFECT OF COMPOSITE BINDER FILLERS ON CONCRETE RESISTANCE IN AGGRESSIVE AQUEOUS SOLUTIONS.....	37	Leontev V.A. USING A BAYESIAN MODEL TO ASSESS THE RELIABILITY OF HEAT SUPPLY SCHEMES IN POPULATED AREAS	117
Cherkasov V.D., Tyuryakin M.A. SELF-ADHESIVE VIBRATION-ABSORBING MATERIAL	44	Malygina O.A., Sokolov V.I. THE INFLUENCE OF LINKS REAL PROPERTIES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR AIR HEATING ON REGULATION QUALITY	124
Alfimova N.I. EVALUATION OF PHYSICOCHEMICAL AND MORPHOSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF CITROGYPSUM BINDERS	50	Pavlov M.V., Karpov D.F., Zhukova V.P. DETERMINATION OF THE OPTIMAL FLOW VELOCITY OF HEAT TRANSFER FLUIDS IN A PLATE HEAT EXCHANGER.....	133
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	65	Osipova N.N., Kultiaev S.G. PRODUCING A BUTANE-BASED GAS-AIR MIXTURE FOR GAS SUPPLY SYSTEMS	146
Bakushev S.V., Baronin S.A. CALCULATION OF MULTILAYER INHOMOGENEOUS ELASTIC BEAMS FROM STIFFNESS CONDITION	65	Ponomareva I.K. THE EVALUATION MODEL OF DEVELOPED TECHNICAL CLIMATE CONTROL SOLUTIONS TO EXTEND THE LIFE CYCLE OF ORTHODOX STRUCTURES.....	154
Komarov V.A., Boldyreva O.V., Boldyrev E.S. SUPPORT ZONES OF FIBER-REINFORCED CONCRETE BEAM BAR WITH UNDERCUTTING OF MULTI-STOREY FRAMEWORKS. FEATURES OF DEFORMATION, CRACKING, AND DESTRUCTION	73		

ARCHITECTURE.....	160
Lapshina E.G., Kosaeva A.V. FORMATION AND HISTORICAL DEVELOPMENT OF URBAN DEVELOPMENT OF THE SURSKY REGION: FORTIFICATION STRUCTURES	160
Garkina I.A., Garkin I.N., Veselov V.V. A METHODOLOGY FOR ADAPTATION OF LEGALLY-ISSUED BUILDINGS FOR MODERN HEALTHCARE FACILITIES	169
Beketova T.S. ORNAMENTAL DECORATION IN THE PANEL BUILDING OF ULAN-UDE (SOVIET PERIOD)	177
Devyatnikova L.A., Ageeva P.M. FUNCTIONAL MODERNIZATION OF PRODUCTION WORKSHOPS IN THE CITY OF PETROZAVODSK	184
Alam El Din Sabrina Hassan, Viktorova O.L., Babakov S.A. TYPOLOGY AND ARCHITECTURAL- SPATIAL ORGANIZATION OF SCIENTIFIC FACILITIES.....	192
Koroleva L.A., Miku N.V. ARCHITECTURAL, PLANNING AND STRUCTURAL FEATURES OF RADIO HOUSE BUILDINGS IN THE USSR AND ABROAD, BUILT IN THE 1930-1980s.....	203

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.32

DOI 10.54734/20722958_2026_3_5

Липецкий государственный технический университет

Россия, 398055 г. Липецк, ул. Московская, 30,
тел.: +7(4742) 328206

Дергунова Елена Сергеевна,
кандидат химических наук,
доцент кафедры «Химия»
E-mail: dergunova14@yandex.ru

Гончарова Маргарита Александровна,
доктор технический наук, профессор,
зав. кафедрой строительного
материаловедения и дорожных технологий
E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Lipetsk State Technical University

Russia, 398055, Lipetsk, 30, Moskovskaya St.,
tel.: +7(4742) 328206

Dergunova Elena Sergeevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Chemistry»
E-mail: dergunova14@yandex.ru

Goncharova Margarita Alexandrovna,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Building Materials Science and
Road Technologies»
E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Данная работа была реализована в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БИОМИНЕРАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ БЕТОНА В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Е.С. Дергунова, М.А. Гончарова

Приведены данные по исследованию стойкости бетона, модифицированного биодобавками на основе уреазных микроорганизмов *Bacillus lentus*, в агрессивных жидких средах щелочей и кислот. Определены уреазная активность, способность микроорганизмов *Bacillus lentus* стимулировать образование кальцита в порах бетона в течение периода времени, а также срок хранения биодобавки на основе микроорганизмов. Коррозионную стойкость образцов бетона оценивали в соответствии с нормативными документами путем погружения образцов в 5 % растворы коррозионных агентов на срок до 112 дней после набора проектной прочности. Установлено, что данная технология биоминерализации способна повысить стойкость бетона в неблагоприятных условиях более чем на 40 %.

Ключевые слова: портландцемент, уреазные микроорганизмы, бетон, прочность, кальцит, химическая стойкость

APPLICATION OF BIOMINERALIZATION TECHNOLOGY TO INCREASE CONCRETE RESISTANCE IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

E.S. Dergunova, M.A. Goncharova

The article presents data on the study of the resistance of concrete modified with bioadditives based on urease microorganisms *Bacillus lentus* in aggressive liquid environments of alkalis and

acids. The article determines the urease activity, the ability of *Bacillus lentus* microorganisms to stimulate the formation of calcite in concrete pores over a period of time, as well as the shelf life of the bioadditive based on microorganisms. The corrosion resistance of concrete samples has been evaluated in accordance with regulatory documents by immersing the samples in 5 % solutions of corrosion agents for up to 112 days after reaching the design strength. It has been established that this biomineralization technology can increase the durability of concrete in adverse conditions by more than 40 %.

Keywords: Portland cement, urease microorganisms, concrete, strength, calcite, chemical resistance

Введение. Строительная отрасль в настоящее время претерпевает радикальные изменения в сторону экологичности, что обусловлено острой необходимостью снизить воздействие на окружающую среду и повысить энергоэффективность. За последние несколько лет появилась новая природоподобная технология, в которой для улучшения структурно-механических свойств бетона используются микроорганизмы, способные устранять внутренние дефекты цементных матриц. Эта технология известна как биоминерализация [1-5]. По сравнению с другими физическими и химическими методами восстановления бетона биоминерализация является более экологичной и простой в применении. Этот метод успешно применяется в различных областях, в том числе для укрепления песчаных колонн [6], для устранения трещин в бетоне [7-12] и др. Биоминерализация представляет собой развивающуюся технологию, способствующую гидратации цемента и повышающую раннюю прочность на сжатие материалов на основе цемента.

Цель данной работы – исследование стойкости бетона, модифицированного биодобавками на основе микроорганизмов *Bacillus lentus*, в агрессивных жидких средах щелочей и кислот.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить уреазную активность и способность микроорганизмов *Bacillus lentus* стимулировать образование кальцита в порах бетона;
- сформировать смеси цементных композитов на основе портландцемента с биодобавкой и оценить прочность на сжатие образцов модифицированного бетона;
- исследовать стойкость модифицированных образцов бетона к агрессивным воздействиям кислот и щелочей.

1. Материалы и методы. В работе использовали портландцемент марки ЦЕМ I 32,5 Н (ГОСТ 31108-2003); полифракционный песок вольский (ГОСТ 6139-2020) в качестве мелкого заполнителя; щебень фракции 10-20 (ГОСТ 8267-93) в качестве крупного заполнителя. В качестве биодобавки были использованы микроорганизмы *Bacillus lentus*. Оценку активности нативных и иммобилизованных микроорганизмов выполняли с помощью спектрофотометра «Shimadzu». Оценку физико-механических свойств цементных образцов осуществляли согласно ГОСТ ГОСТ 10180 – 2012. Для контроля образования кальцитной фазы в бетоне применяли сканирующую электронную микроскопию и РФА. Микрофотографии свежеразломанных образцов были сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3LMU в комплекте с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа с безазотным детектором ULTIM MAX 40.

2. Результаты и обсуждение.

2.1. Оценка уреазной активности и способности микроорганизмов *Bacillus lentus* стимулировать образование кальцита. Присутствие бактерий в цементных материалах может повлиять на осаждение кальцита за счёт выработки ферментов уреазы, которые повышают pH и концентрацию карбонатов в системе в результате гидролиза мочевины до углекислого газа [13]. Следовательно, в первую очередь для использования микроорганизмов *Bacillus lentus* в целях улучшения физико-механических свойств цементных композитов необходимо произвести оценку уреазной активности бактерий.

Предварительно микроорганизмы *Bacillus lentus* иммобилизовали с применением геля полимера на основе стирола со специальной питательной средой, позволяющей

бактериям выделять только фермент уреазу. Полученную массу измельчали до размеров 3-4 мм и хранили при температуре не более 25° С и влажности не более 60 %.

Оценку уреазной активности проводили в зависимости от температуры и pH среды (рис. 1).

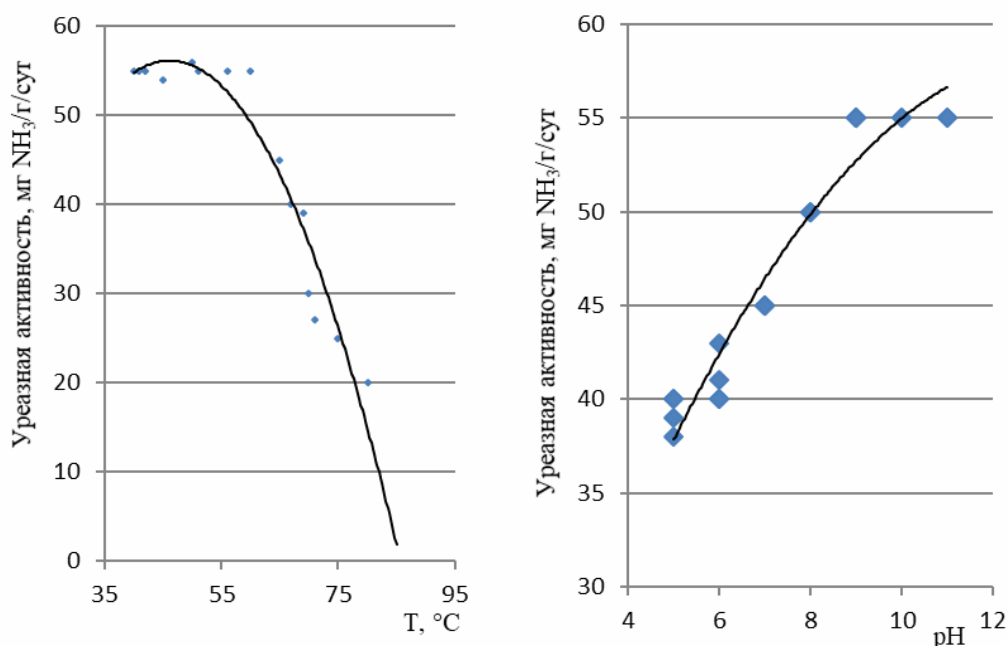


Рис. 1. Зависимость уреазной активности *Bacillus lentus* от температуры (а) и pH среды (б)

Установлено, что микроорганизмы *Bacillus lentus* проявляют уреазную активность в достаточно широком интервале температур (от 30 до 65 °С). Также при оценке влияния pH на уреазную активность микроорганизмов необходимо отметить высокие значения pH 8-9,5, при которых жизнедеятельность бактерий не прекращается, т.к. бактерии этого вида толерантны к щелочи.

Важным моментом при использовании биодобавок является срок хранения иммобилизованной формы. Оценка максимального срока хранения биодобавки на основе *Bacillus lentus* проводили также по уреазной активности (рис. 2).

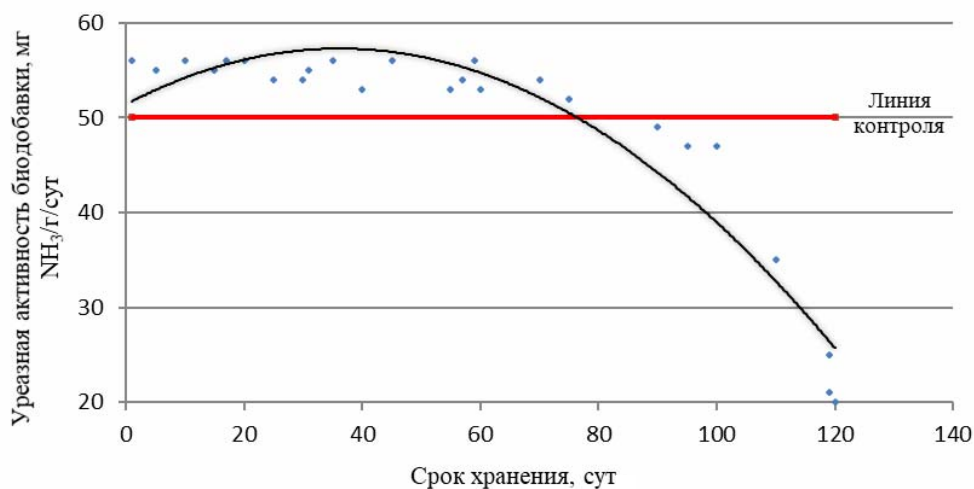


Рис. 2. Зависимость уреазной активности от времени хранения биодобавки на основе *Bacillus lentus*

Установлено, что уреазная активность иммобилизованных микроорганизмов, полученных с применением геля полимера полистирола, способна сохранять высокие значения (до 55 мкг $\text{NH}_3/\text{г}/\text{сут}$) в течение длительного срока хранения (до 75 суток).

Было проведено исследование способности микроорганизмов *Bacillus lentus* стимулировать образование карбоната кальция в цементном композите. Прочностные характеристики бетона в основном зависят от фазы кальций – кремнезем-гидрат (C–S–H), присутствующей в затвердевшем бетоне [8-10]. На фазу кальций – кремнезем-гидрат (C–S–H) влияют различные факторы: размер и форма частиц, распределение частиц и структура пор. Улучшение свойств бетона за счёт добавления *Bacillus lentus* может быть связано с выпадением микробного кальцита в осадок. На снимках, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа и представленных на рис. 3, видно, что в бетоне с микроорганизмами *Bacillus lentus* внутри пор бетона образовалась мелкая сетка с биоминералами в форме палочек на поверхности пор.

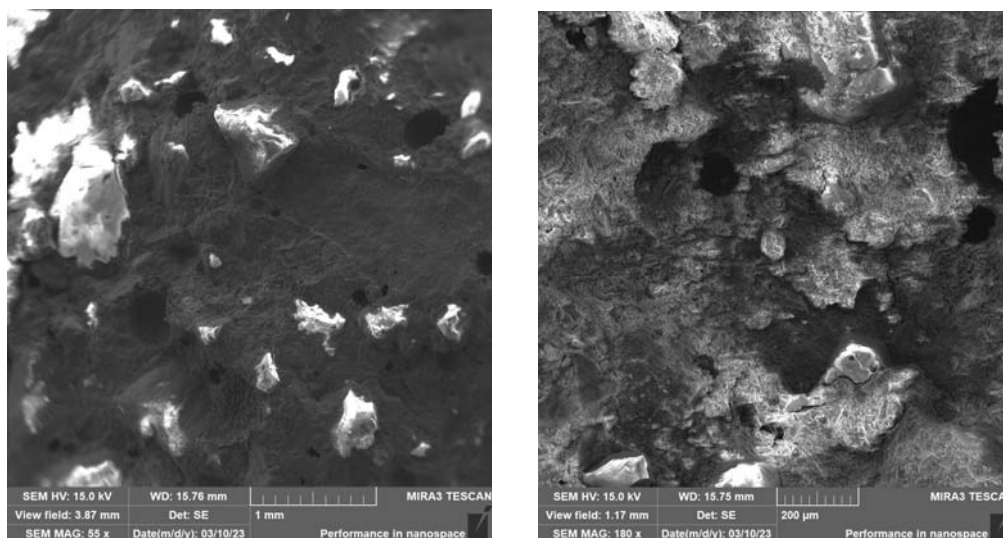


Рис. 3. Микрофотографии разлома бетонного композита для оценки формирования кальцита в порах бетона

Эти сетки представляют собой кальцинированные нити, образовавшиеся в результате метаболической активности бактерий. Сформировавшиеся таким образом биоминеральные пробки заполняют поры и трещины в бетоне с течением времени и тем самым снижают водопоглощение и пористость. Наличие кальцита также подтверждали с применением энергодисперсионного рентгеновского аппарата. Анализ содержания карбоната кальция в образцах проводили на порошкообразных образцах после 28, 56, 112 дней твердения бетона (см. таблицу).

Содержание карбоната кальция в образцах бетона после 28, 56, 112 дней твердения ($n=6$, $P=0,95$)

Возраст бетона, сут	28	56	112	180
Содержание CaCO_3 , %	$1,50 \pm 0,01$	$1,65 \pm 0,01$	$1,85 \pm 0,01$	$1,95 \pm 0,01$

2.2. Формирование смесей цементных композитов с биодобавкой на основе микроорганизмов *Bacillus lentus* и оценка прочности на сжатие образцов модифицированного бетона. Формирование бетонных смесей проводили по соотношению компонентов – цемент: песок: щебень=1:2:4. Водоцементное отношение варьировали от 0,30 до 0,60. Содержание биодобавки на основе микроорганизмов *Bacillus lentus* – 5 % от массы цемента. Компоненты тщательно перемешивали в бетономешалке, одновременно при добавлении воды затворения засыпали биодобавку. Смесь перемешивали не менее 20 минут, затем формировали образцы-призмы с размером поперечного сечения 150×150 и оставляли твердеть в нормально-влажностных условиях до

достижения проектного возраста 28 суток. Прочность на сжатие для каждого образца была рассчитана путём определения соотношения между пиковой нагрузкой на сжатие и площадью поперечного сечения образца, испытанного в соответствии с нормативным документом. Также были выбраны значения контролируемого возраста для определения прочности бетона – 56, 112 и 180 суток. Зависимость предела прочности от возраста бетона представлена на рис. 4.

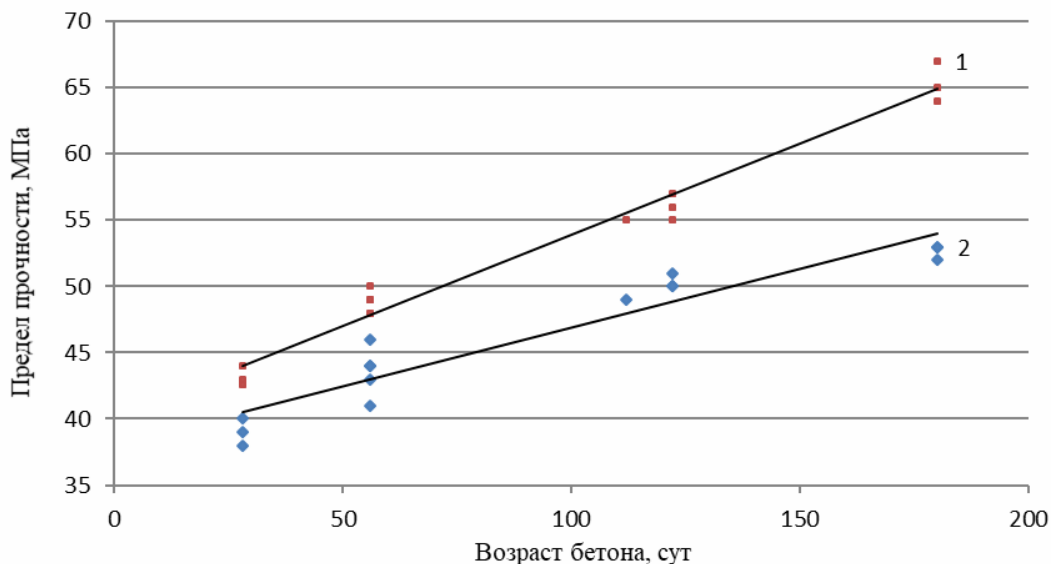


Рис. 4. Зависимость предела прочности от возраста бетона:

1 – образец бетона, модифицированного биодобавкой; 2 – контрольный образец

Как видно из рис. 4, применение биодобавки способствует увеличению предела прочности более чем на 10-20 % по сравнению с контрольными образцами. Повышение прочности бетона на сжатие на 28-й день в присутствии бактериальной культуры можно объяснить биоминерализацией кальцита на поверхности и в порах бетонной матрицы. Осаждение кальцита, приводящее к уплотнению матрицы, способствует повышению прочности на сжатие.

2.3. Исследование стойкости модифицированных бетонов к агрессивным воздействиям. Устойчивость бетонных конструкций, особенно железобетонных, к воздействию агрессивных сред очень важна для их эксплуатационных характеристик и срока службы. Поэтому вопрос о способности модифицированного бетона сопротивляться действию ряда химических агентов внешней коррозии является актуальным. В качестве таких агентов были выбраны гидроксид натрия, уксусная и фосфорная кислоты с концентрацией 5 %.

Коррозионную стойкость образцов бетона оценивали в соответствии с нормативными документами путем погружения образцов в 5 % растворы коррозионных агентов на срок до 112 дней после набора проектной прочности. Кислотные и щелочной растворы заменяли каждые 14 дней, чтобы концентрация и pH растворов были относительно постоянными на протяжении всего испытания. Стойкость биоминерализованных образцов бетона оценивалась по потере прочности на сжатие. Зависимость прочности на сжатие образцов бетона от времени экспозиции в агрессивных средах представлена на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что модифицированный бетон сильнее теряет в прочности в 5 %-х растворах кислот по сравнению с 5 %-м раствором гидроксида натрия независимо от наличия бактерий в образцах, т.к. кислотное воздействие в водной среде на бетон происходит за счёт растворения и вымывания части гидроксида кальция из цементной матрицы.

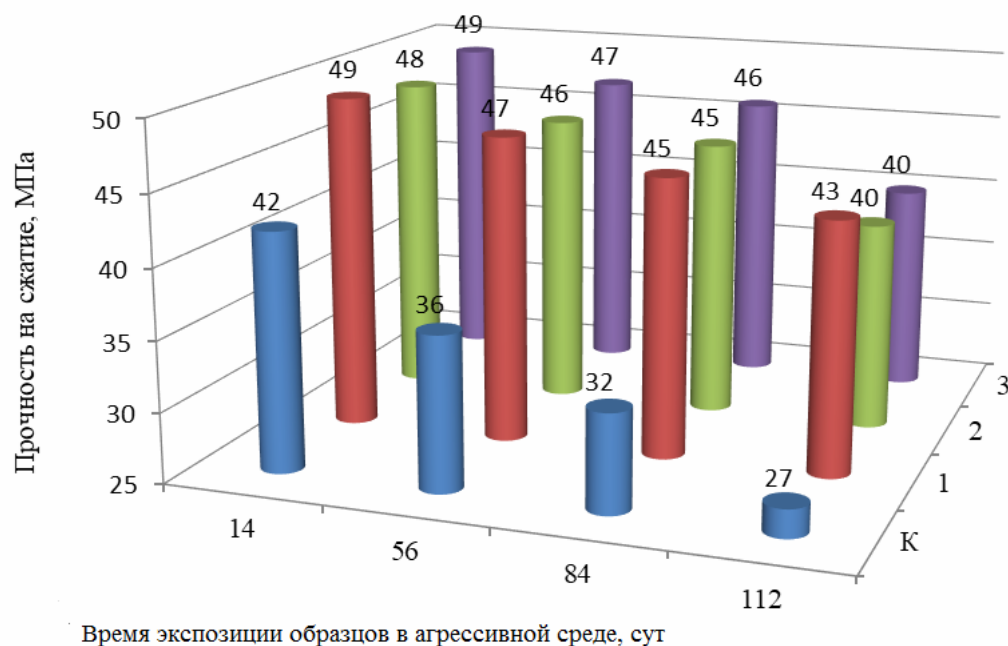


Рис. 5. Зависимость прочности на сжатие образцов бетона от времени экспозиции в агрессивных средах (К – контрольный образец без биодобавки; 1 – гидроксид натрия; 2 – фосфорная и 3 – уксусная кислоты)

Однако модифицированные образцы продемонстрировали сохранение прочности на сжатие (более чем на 40 %) в течение длительного срока контакта с агрессивными средами по сравнению с контрольным образцом. Данный эффект можно объяснить заполнением пор биомассой бактерий и образованием кальцита в матрице бетона, который снижает проницаемость бетона и тормозит действие агрессивных агентов среды.

Выводы.

1. Технология биоминерализации применена для повышения стойкости бетона в агрессивных средах. При формировании биодобавок для бетона использовали микроорганизмы *Bacillus lentus*, способные стимулировать образование кальцита в порах бетона и обладающие высокой уреазной активностью (не менее 54-56 мг $\text{NH}_3/\text{г}/\text{сут}$).

2. Установлено, что использование биодобавки способствует увеличению предела прочности модифицированных образцов более чем на 10-20 % по сравнению с контрольными образцами.

3. Модифицированные образцы продемонстрировали сохранение прочности на сжатие (более чем на 40 %) в течение длительного срока экспозиции в агрессивных средах по сравнению с контрольными образцами. Биодобавки на основе микроорганизмов *Bacillus lentus* дают возможность эксплуатировать биоминерализованный бетон в агрессивных средах, т.к. бактерии стимулируют образование кальцита в матрице бетона, который снижает проницаемость бетона и тормозит действие кислот и щелочей.

Список литературы

1. Application of bacterial biomass in biocementation process to enhance the mechanical and durability properties of concrete / M.P. Smitha, D. Suji, M. Shanthi, A. Adesina // Cleaner Materials. – 2022. – Vol. 3. – 100050. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100050>.
2. Junwale, R. Application of biomineralisation for enhancement of interfacial properties of rice husk ash blended concrete / R. Junwale, M. Latkar // Advances in Cement

Research. – 2024. – Vol. 37, Is. 4. – P. 240-252. – URL: <https://doi.org/10.1680/jadcr.23.00190>.

3. Bhutange, S.P. A review on the potential challenges in the application of biocementation in cement-based materials, possible solutions and way forward / S.P. Bhutange, M.V. Latkar, S. Muhammad // *Materials Today Communications*. – 2024. – Vol. 38. – 107986. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107986>.

4. Charpe, A.U. Biocementation: an eco-friendly approach to strengthen concrete / A.U. Charpe, M.V. Latkar, T. Chakrabarti // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*. – 2018. – Vol. 172, Is. 8. – P. 438–449. – URL: <https://doi.org/10.1680/jensu.18.00019>.

5. Verma, N. Revolutionizing concrete: Unveiling bio-concrete's advantages and challenges in self-healing through microbial-induced calcium carbonate precipitation / N. Verma, J.S. Eswari, C. Mahapatra // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2025. – Vol. 45. – e01465. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01465>.

6. Li, Y. Field erosion protection of tidal beach: Comparison and synergy between sulfide aluminum cementing materials and biomineralization materials / Y. Li, P. Yue, Y. Zhu [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2024. – Vol. 21. – e04092. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04092>.

7. Kliková, K. Exploiting *Bacillus pseudofirmus* and *Bacillus cohnii* to promote CaCO_3 and Aft phase formation for stabilizing waste concrete fines/ K. Kliková, P. Holeček, D. Koňáková [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2025. – Vol. 155. – 105839. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105839>.

8. Potential of Fungi for Concrete Repair / C. Martuscelli, C. Soares, A. Camões, N. Lima // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 46. – P. 180–185. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.027>.

9. Joshi, S. Influence of nutrient components of media on structural properties of concrete during biocementation / S. Joshi, S. Goyal, M.S. Reddy // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 158. – P. 601–613. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.055>.

10. Charpe, A.U. Effect of biocementation using soil bacteria to augment the mechanical properties of cementitious materials / A.U. Charpe, M.V. Latkar // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 21, Part 2. – P. 1218–1222. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.072>.

11. Mengistu, D. M. Isolation and characterization of calcite precipitating bacteria from soda lakes that have the capability to produce biocement for self-healing concretes / D.M. Mengistu, A.N. Mamo, M.T. Gameda // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 408. – 133510. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133510>.

12. Statistical and experimental investigation on self-healing of microcracks in cement mortar by encapsulation of calcite precipitating bacteria into expanded perlite / P.R.K. Soda, E.K. Chakravarthi, A. Mogal, K.M. Mini // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 342, Part A. – 127985. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127985>.

13. Гончарова, М.А. Особенности применения процесса биоминерализации для улучшения структурно-прочностных свойств бетона / М.А. Гончарова, Е.С. Дергунова // *Строительные материалы*. – 2023. – № 1–2. – С. 25–31. – URL: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31>.

References

1. Application of bacterial biomass in biocementation process to enhance the mechanical and durability properties of concrete / M.P. Smitha, D. Suji, M. Shanthi, A. Adesina // *Cleaner Materials*. – 2022. – Vol. 3. – 100050. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100050>.

2. Junwale, R. Application of biomineralisation for enhancement of interfacial properties of rice husk ash blended concrete / R. Junwale, M. Latkar // *Advances in Cement*

Research. – 2024. – Vol. 37, Is. 4. – P. 240-252. – URL: <https://doi.org/10.1680/jadcr.23.00190>.

3. Bhutange, S.P. A review on the potential challenges in the application of biocementation in cement-based materials, possible solutions and way forward / S.P. Bhutange, M.V. Latkar, S. Muhammad // *Materials Today Communications*. – 2024. – Vol. 38. – 107986. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107986>.

4. Charpe, A.U. Biocementation: an eco-friendly approach to strengthen concrete / A.U. Charpe, M.V. Latkar, T. Chakrabarti // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*. – 2018. – Vol. 172, Is. 8. – P. 438–449. – URL: <https://doi.org/10.1680/jensu.18.00019>.

5. Verma, N., Revolutionizing concrete: Unveiling bio-concrete's advantages and challenges in self-healing through microbial-induced calcium carbonate precipitation / N. Verma, J.S. Eswari, C. Mahapatra // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2025. – Vol. 45. – e01465. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01465>.

6. Li, Y. Field erosion protection of tidal beach: Comparison and synergy between sulfide aluminum cementing materials and biomineralization materials / Y. Li, P. Yue, Y. Zhu [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2024. – Vol. 21. – e04092. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04092>.

7. Kliková, K. Exploiting *Bacillus pseudofirmus* and *Bacillus cohnii* to promote CaCO_3 and Aft phase formation for stabilizing waste concrete fines/ K. Kliková, P. Holeček, D. Koňáková [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2025. – Vol. 155. – 105839. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105839>.

8. Potential of Fungi for Concrete Repair / C. Martuscelli, C. Soares, A. Camões, N. Lima // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 46. – P. 180–185. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.027>.

9. Joshi, S. Influence of nutrient components of media on structural properties of concrete during biocementation / S. Joshi, S. Goyal, M.S. Reddy // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 158. – P. 601–613. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.055>.

10. Charpe, A.U. Effect of biocementation using soil bacteria to augment the mechanical properties of cementitious materials / A.U. Charpe, M.V. Latkar // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 21, Part 2. – P. 1218–1222. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.072>.

11. Mengistu, D.M. Isolation and characterization of calcite precipitating bacteria from soda lakes that have the capability to produce biocement for self-healing concretes / D.M. Mengistu, A.N. Mamo, M.T. Gameda // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 408. – 133510. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133510>.

12. Statistical and experimental investigation on self-healing of microcracks in cement mortar by encapsulation of calcite precipitating bacteria into expanded perlite / P.R.K. Soda, E.K. Chakravarthi, A. Mogal, K.M. Mini // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 342, Part A. – 127985. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127985>.

13. Goncharova, M.A. Features of the application of the bio-mineralization process to improve the structural and strength properties of concrete / M.A. Goncharova, E.S. Dergunova // *Construction Materials*. – 2023. – No. 1–2. – P. 25–31. – URL: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-25-31>.

УДК 699.8:338.4

DOI 10.54734/20722958_2026_3_13

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление качеством»
E-mail: loganin@mai.ru

*Финансовый университет при
Правительстве Российской Федерации*

Россия, 440028, г. Пенза, ул. Калинина, д.33б,
тел.: (8412) 35-37-10

Учаева Татьяна Владимировна,
кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Экономика и финансы»
E-mail: uchaevatv@mail.ru.

*Российский экономический университет
им. В.Г. Плеханова*

Россия, 115054, г. Москва,
Стремянный переулок, д.36
тел.: (8495) 958-27-43

Зайцева Мария Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: zajc@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Quality
Management»
E-mail: loganin@mai.ru

*Financial University under the Government of
the Russian Federation*

Russia, 440028, Penza, 33b, Kalinina St.,
tel.: (8412) 35-37-10

Uchaeva Tatyana Vladimirovna,
Candidate of Economic Sciences, Associate
Professor of the Department «Economics and
Finance»
E-mail: uchaevatv@mail.ru

*Russian University of Economics
named after V.G. Plehanov*

Russia, 115054, Moscow, 36,
Stremyanny Lane,
tel.: (8495) 958-27-43

Zaytseva Maria Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: zajc@yandex.ru

РАЗРАБОТКА КАРТЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ КАК ИНСТРУМЕНТА МИНИМИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ПРИ ДЕФЕКТАХ ШТУКАТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Логанина, Т.В. Учаева, М.В. Зайцева

Приведены сведения о дефектах штукатурных покрытий. Определены причины образования дефектов. Рассмотрен риск-менеджмент процесса оштукатуривания, что позволило оценить потенциальные угрозы, их вероятность и влияние на конечный продукт. Составлена карта оценки рисков, возникающих при оштукатуривании поверхности фасадов зданий. При разработке карты риск-менеджмента процесса оштукатуривания была применена пятибалльная шкала показателей вероятности «О» и тяжести последствий «S» риска по каждой из причин. Путем перемножения «О» и «S» найдено приоритетное число риска «R». Определены мероприятия по снижению или устранению риска.

Ключевые слова: дефекты штукатурных покрытий, вероятность реализации риска, карта оценки рисков, экономическая оценка ущерба риска

DEVELOPMENT OF A RISK ASSESSMENT MAP AS A TOOL FOR MINIMIZING ECONOMIC DAMAGE DUE TO DEFECTS IN PLASTER COATINGS

V.I. Loganina, T.V. Uchaeva, M.V. Zaytseva

The article provides information about defects in plaster coatings. The causes of defects formation have been determined. The risk management of the plastering process is considered, which

makes it possible to assess potential threats, their probability and impact on the final product. A risk assessment map has been compiled for plastering the surface of building facades. When developing a risk management map of the plastering process, a five-point scale of indicators of the probability of «O» and severity of the consequences of «S» risk has been used for each of the reasons. By multiplying «O» and «S», the priority number of risk «R» has been determined. Measures for reducing or eliminating the risk have been identified.

Keywords: plaster coating defects, risk probability, risk assessment map, economic assessment of risk damage

Для повышения декоративной выразительности зданий применяют декоративные штукатурки. Достоинствами декоративной штукатурки являются ремонтпригодность, возможность придания поверхности различного цвета и фактуры, эстетическая привлекательность. Штукатурка не только выполняет декоративные функции, но и обеспечивает защиту здания от внешнего воздействия.

В процессе эксплуатации под воздействием внешних агрессивных факторов снижаются декоративные и защитные функции штукатурных покрытий. В соответствии с требованиями ВСН 58-88 (р) минимальная продолжительность эффективной эксплуатации наружной отделки до капитального ремонта составляет: для штукатурки, выполненной сложным раствором по кирпичу, – не менее 30 лет, для терразитовой штукатурки – не менее 50 лет. Наличие дефектов на поверхности штукатурки создает риски, связанные с сокращением установленного нормами срока службы не только штукатурки, но и всей стены как несущей и ограждающей конструкции.

В работе [1] отмечается, что причины образования дефектов можно классифицировать как:

- организационно-технологические;
- эксплуатационные;
- конструктивные;
- рецептурные.

Влияние группы организационно-технологических факторов на качество готового штукатурного покрытия обусловлено непосредственно соблюдением технологии и организации производства работ [2, 3]. Результатами воздействия эксплуатационных факторов являются образование трещин, в том числе динамически развивающихся, появление высолов, неравномерной окраски, мокрых пятен на фасаде.

К эксплуатационным факторам можно отнести:

1. Осадочные деформации грунтов.
2. Динамические и вибрационные воздействия при забивке свай, от движущегося транспорта.
3. Влияние дымовых газов и продуктов сгорания различного происхождения, содержащих серную или сернистую кислоту и другие опасные соединения.
4. Воздействие ветра и содержащихся в воздухе и атмосферных осадках химических реагентов, а также УФ-излучение.
5. Несвоевременный ремонт водоотводящих поясков.

Конструктивные факторы связаны с особенностями проектирования стеновых конструкций.

Рецептурные факторы определяют основные физико-технические свойства штукатурных растворов и напрямую влияют на качество и долговечность штукатурных покрытий фасадов зданий. Регулируя свойства материалов, в определенной степени можно нивелировать влияние как технологических, так и эксплуатационных и конструктивных факторов.

Основные дефекты штукатурки: трещины, вспучивания, дутики, отслаивание, высолы, пятнистость, ржавчина, неровность поверхности, кривизна стен, углов.

Рассмотрим риск-менеджмент процесса оштукатуривания, что позволит оценить потенциальные угрозы, их вероятность и влияние на конечный продукт [4-6]. Для этого была составлена карта оценки риска. Карта оценки рисков помогает выявлять источники брака, классифицировать их и разрабатывать меры по снижению или устранению рисков [7-10]. Для разработки карты риск-менеджмента процесса оштукатуривания

турирования применяли пятибалльную шкалу показателей вероятности «О» и тяжести последствий «S» риска по каждой из причин. Путем перемножения «О» и «S» определяли приоритетное число риска «R». Результаты анализа и расчетов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Приоритетное число риска

Приоритетное число риска $R = O \times S$	Категория риска
1-4	Низкий уровень риска
5-8	Умеренный уровень риска
9-15	Высокий уровень риска
16-25	Очень высокий уровень риска

В табл.2 представлена карта риска процесса оштукатуривания наружных стен зданий.

Т а б л и ц а 2

Риски, возникающие при оштукатуривании поверхности фасадов зданий,
причины их появления

№ п/п	Риск	Причина появления риска
1	2	3
R1	Грубая поверхность, испещренная бороздами, полосами, спиралями	Наличие чрезмерно крупных зерен песка в накрывочном слое; неправильные приемы затирки
R2	Дутики	Использование для приготовления растворов смесей извести, содержащей незагасившиеся частицы
R3	Отлупы и вспучивание штукатурки	Оштукатуривание велось по сырым поверхностям или штукатурный слой после нанесения чрезмерно увлажнялся
R4	Появление осадочных трещин	1. Применялись жирные растворные смеси 2. Плохое перемешивание раствора 3. Быстрое высыхание слоя штукатурки 4. Несоблюдение толщины наносимых слоев 5. Отсутствие армирующей сетки в местах сопряжений 6. Отсутствие ухода за твердеющей штукатуркой 7. Осадочные деформации грунта
R5	Появление глубоких трещин и разрушение штукатурки	Нанесение за один прием толстого слоя медленно схватывающейся растворной смеси; растворная смесь нанесена на несхватившийся предшествующий слой грунта
R6	Расслаивание штукатурного слоя	Нанесение накрывочного слоя велось после длительного перерыва, а грунт не был очищен от пыли и не смочен водой
R7	Недостаточная прочность	В растворе находится недостаточное количество вяжущих веществ, использовались некачественные материалы, в том числе сильно загрязненный песок
R8	Высолы	Отсутствие гидроизоляции или нарушение технологии гидроизоляционных работ, вынос солей из строительных конструкций или штукатурного состава поднимающейся влагой, оштукатуривание проводилось в условиях недостаточного тепла и сырости

1	2	3
R9	Появление плесени	Сырость стен вследствие промерзания
R10	Отслоения штукатурного слоя от основания стен	1. Неправильная подготовка основания под штукатурку 2. Несовместимость основания и штукатурки по прочности 3. Нарушение технологии производства работ в зимнее время 4. Нанесение накрывочного слоя на пересушенные ранее нанесенные слои раствора, на загрязненную поверхность; 5. Не полное проникновение нанесенного штукатурного раствора (первого штукатурного слоя – обрызга) через ячейки штукатурной сетки, т.е. выявлены участки, не имеющие контакта с оштукатуриваемой поверхностью 6. В составе штукатурки имеется большой процент песка 7. Низкая подвижность штукатурного раствора (слишком густой, либо подсохший раствор) и отсутствие зазора между сеткой и стеной 8. Растворная смесь нанесена на чрезмерно сухую поверхность 9. Последующие слои растворной смеси нанесены на более слабые предыдущие
R11	Осыпание и шелушение штукатурки после затирки	В растворе для накрывки содержится слишком много песка или затирку выполняли поздно, когда раствор уже почти затвердел
R12	Ржавые пятна	Из штукатурного слоя не были извлечены металлические маяки; подтекают металлические трубы коммуникаций, расположенные в стене
R13	Нарушение геометрии	Отсутствие маяков, непрофессионализм или нарушения технологии

В табл. 3 приведена карта риска процесса оштукатуривания наружных стен зданий с указанием оценки вероятности появления и значимости последствий риска.

Т а б л и ц а 3

Карта оценки рисков в области качества

№ п/п	Риск	Q – оценка вероятности появления данного вида риска	S – оценка значимости последствий	Число риска R
1	2	3	4	5
R1	Грубая поверхность, испещренная бороздами, полосами, спиралями	3	2	6
R2	Дутики	2	4	8
R3	Отлупы и вспучивание штукатурки	3	4	12
R4	Появление усадочных трещин	2	1	2
R5	Появление глубоких трещин и разрушение штукатурки	4	4	16
R6	Расслаивание штукатурного слоя	2	3	6
R7	Недостаточная прочность	3	3	9

1	2	3	4	5
R8	Высолы	2	3	6
R9	Появление плесени	2	3	6
R10	Отслоения штукатурного слоя от основания стен	2	5	10
R11	Осыпание и шелушение штукатурки после затирки	2	2	4
R12	Ржавые пятна	2	3	6
R13	Нарушение геометрии	2	2	4

Анализ данных, приведенных в табл. 2, 3, показывает, что наибольшее значение риска характерно для таких дефектов, как недостаточная прочность штукатурного слоя, отслоения штукатурного слоя от основания стен, отлупы и вспучивание штукатурки. Значения риска R составляют соответственно от 9 до 16 (см. табл. 3).

Зависимость вероятности риска от возможной величины ущерба изображена графически на рис. 1.

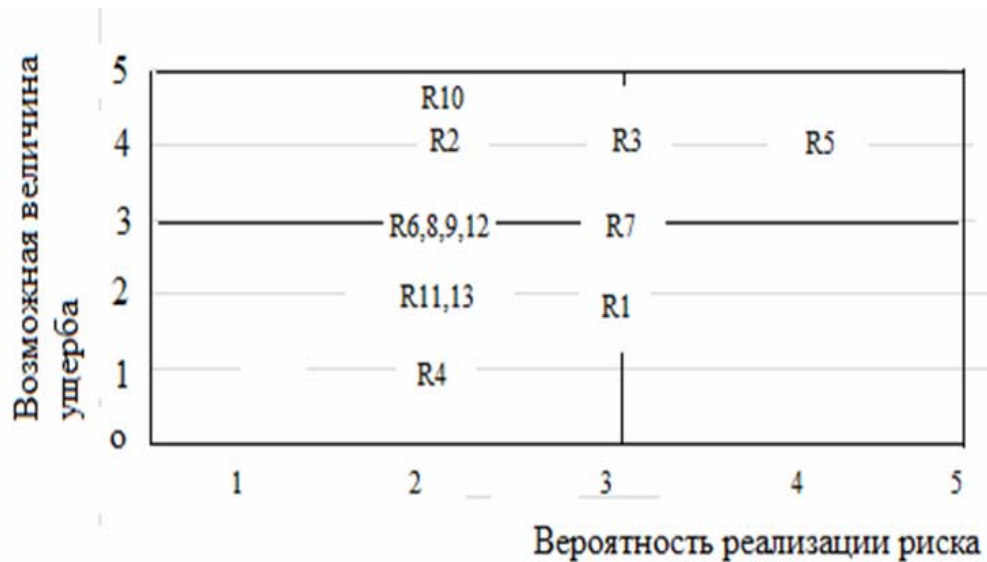


Рис. 1. Зависимость вероятности риска от возможной величины ущерба

Рисунок разбивается делением на четыре поля. Если риск попадает в поле с большей величиной ущерба и большей вероятностью риска, то со стороны руководства и службы качества рекомендуется обратить особое внимание на данный риск. Если риск попадает в поле с меньшей величиной ущерба и меньшей вероятностью, то этот риск не требует дополнительного внимания. В поле с меньшей величиной ущерба для предприятия попадают риски с номерами R1, R4, R11, R13, R6, R8, R9, R12.

На рис. 2 дан перечень мероприятий по снижению или устранению риска.

Был выполнен расчет риска как ожидаемого ущерба по дефекту «недостаточная прочность штукатурного слоя». Локальный сметный расчет произведен в ценах 2026 года (Пензенская область) в соответствии с ГЭСН 46-02-009-01. Результаты расчета показали, что дополнительные затраты, связанные с исправлением дефекта «недостаточная прочность», составляют 78 677,66 руб. на 100 м².

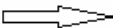
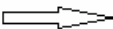
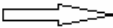
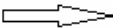
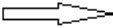
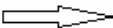
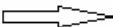
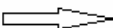
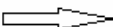
R1		Применение для накрывочного слоя раствора, приготовленного из процеженной извести и просеянного мелкозернистого песка; поцеживание накрывочного раствора. Для исправления перетереть штукатурку в поврежденных местах.
R2		Сбить штукатурку и выполнить ее вновь, применяя хорошо загашенную известь (тесто, просеянное через сито с отверстиями 0,5×0,5 мм).
R3		Сбить штукатурку, тщательно высушить основание и вновь оштукатурить.
R4		Трещины расшить, огрунтовать ПВА-дисперсией и заделать растворной смесью, тщательно затерев поверхность. Устранение сквозняков при оштукатуривании. Для исправления перетереть штукатурку в поврежденных местах.
R5		Сбить штукатурку, вновь оштукатурить с соблюдением технологии производства работ.
R6		Снять накрывочный слой, очистить и смочить грунт, вновь нанести накрывку.
R7		Сбить штукатурку и заменить более прочным раствором.
R8		На фасадах устроить защитные покрытия из кровельной стали (карнизов, сливов, поясков и т. п.), а также гидроизоляцию в случае поступления влаги по кладке, заделать течь в кровле и водосточных трубах. Для исправления отбить штукатурку. При необходимости срубить верхний слой кладки, оштукатурить отбитые места; улучшить вентиляцию помещения. Для устранения солевых образований следует: – соскоблить и смыть высолы водой, используя мягкие щетки; – просушить; – очищенное место обработать антисептиками, после чего нанести гидрофобизаторы для защиты от влаги.
R9		Поэтапное удаление и смывание водой пораженного участка, сушка стены и обработка антисептиком.
R10		Сбить отслоившиеся участки штукатурки, очистить основание от пыли, вновь оштукатурить с соблюдением технологии производства работ. Сетку следует крепить к поверхности так, чтобы над ней образовался слой штукатурного раствора не менее 20...25 мм. Перед нанесением обрызга поверхность смачивают водой.
R11		Оптимизировать состав для затирки. Соблюдать сроки выполнения штукатурных работ.
R12		Для замены подтекающих труб штробят стену, после чего оштукатуривать повреждения заново.
R13		Шлифовка (локальная): используется при небольших буграх. Применяется шлифмашина или терка для удаления выступающих частей. Шпаклевание (наращивание): применяется, если есть впадины. Поверхность грунтуется, затем выравнивается штукатурной смесью (для глубоких) или шпаклевкой (для мелких). Перештукатуривание (полное/частичное): если отклонение критично, участок штукатурки простукивают, удаляют, очищают поверхность, грунтуют и наносят новый слой по маякам.

Рис. 2. Перечень мероприятий по снижению или устранению риска

Выводы.

1. Оценены риски образования дефектов при оштукатуривании фасадов зданий. Установлено, что наибольшее значение риска характерно для таких дефектов, как недостаточная прочность штукатурного слоя, отслоения штукатурного слоя от основания стен, отлупы и вспучивание штукатурки.

2. В целях снижения потерь от брака предложено на предприятии применять карту оценки рисков в области качества.

Список литературы

1. Медяник, Ю.В. Классификация и анализ дефектов и повреждений штукатурных покрытий фасадов зданий / Ю.В. Медяник // Известия КГАСУ. – 2018. – № 2 (44). – С.231–238.
2. Василик, П.Г. Штукатурка для ликвидации трещин в фасадах зданий / П.Г. Василик, И.В. Голубев // Сухие строительные смеси. – 2014. – № 5. – С. 28–31.
3. Тишкин, Д.Д. К вопросу о повышении долговечности штукатурных фасадов зданий / Д.Д. Тишкин, К.И. Барболин // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 6 (65). – С. 135–139.
4. ГОСТ Р 51901.4-2005 (МЭК 62198:2001). Менеджмент риска. Руководство по применению при проектировании. – Москва : Стандартинформ, 2005.
5. ГОСТ Р 51901.14-2005 (МЭК 61078:1991). Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности. – Москва : Стандартинформ, 2005.
6. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – Москва : Стандартинформ, 2018.
7. Uchaeva, T.V. Analysis of the risk at the finishing of the building products and construction of paint compositions / T.V. Uchaeva, V.I. Loganina // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – P.213–216.
8. Mutlu, N. Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods” / N. Mutlu, S. Altuntas // International journal of industrial ergonomics. – 2019. – Vol. 72. – P. 222–240.
9. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем / Л.Н. Александровская, И.З. Аронов [и др.]. – Москва : Логос, 2001.
10. Логанина, В.И., Статистическая оценка риска причинения вреда при несоответствии качества лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, Т.В. Учаева // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, вып. 11. – С. 1449–1455.

References

1. Medyanik, Yu.V. Classification and analysis of defects and damages of plaster coatings of building facade / Yu.V. Medyanik // Izvestiya KGASU. – 2018. – No. 2 (44). – P.231–238.
2. Vasilik, P.G. Plaster for the elimination of cracks in building facades / P.G. Vasilik, I.V. Golubev // Dry building mixes. – 2014. – No. 5. – P. 28–31.
3. Tishkin, D.D. On the issue of increasing the durability of plaster facades of buildings / D.D. Tishkin, K.I. Barbolin // Bulletin of Civil Engineers. – 2017. – No. 6 (65). – P. 135–139.
4. GOST R 51901.4-2005 (IEC 62198:2001). Risk management. Guidelines for use in design. – Moscow : Standartinform, 2005.
5. GOST R 51901.14-2005 (IEC 61078:1991). Risk management. The reliability block diagram method. – Moscow : Standartinform, 2005.
6. GOST R ISO 31000-2019. Risk management. Principles and guidelines. – Moscow : Standartinform, 2018.
7. Uchaeva, T.V. Analysis of the risk at the finishing of the building products and construction of paint compositions / T.V. Uchaeva, V.I. Loganina // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – P.213–216.

8. Mutlu, N. Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods” / N. Mutlu, S. Altuntas // International journal of industrial ergonomics. – 2019. – Vol. 72. – P. 222–240.
9. Statistical methods of security analysis of complex technical systems / L.N. Alexandrovskaya, I.Z. Aronov [et al.]. – Moscow : Logos, 2001.
10. Loganina, V.I., Statistical assessment of the risk of harm caused by non-compliance with the quality of paint and varnish coatings / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva // Bulletin of MGSU. – 2019. – Vol. 14, issue 11. – P. 1449–1455.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2026_3_21

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Вилкова Наталья Георгиевна,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Физика и химия»
E-mail: ngvilkova@mail.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, д.40,
тел. (8412) 368209; факс (8412) 368400

Мишина Светлана Ивановна,
кандидат химических наук,
доцент кафедры «Химия»
E-mail: elancv@mail.ru

Токарев Кирилл Александрович,
магистрант кафедры «Химия и методика
обучения химии»
E-mail: kirilltokarev375@gmail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Vilkova Natalya Georgievna,
Doctor of Chemical Sciences, Professor of the
Department «Physics and Chemistry»
E-mail: ngvilkova@mail.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40 Krasnaya St.,
tel. (8412) 368209; fax (8412) 368400

Mishina Svetlana Ivanovna,
Candidate of Chemical Sciences, Associate
Professor of the Department «Chemistry»
E-mail: elancv@mail.ru

Tokarev Kirill Aleksandrovich,
Master's student of the Department
«Chemistry and Methodology Teaching
Chemistry»
E-mail: kirilltokarev375@gmail.com

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНОГО ГИПСА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, К.А. Токарев

Исследовано влияние ультразвуковой обработки суспензии строительного гипса, содержащей гидрофобизирующие добавки (мылонафт и ВКЖ-94), на физико-химические свойства получаемого материала. Показано, что ультразвуковое воздействие приводит к диспергированию частиц вяжущего, увеличению удельной поверхности и формированию более плотной мелкозернистой структуры. Методами калориметрии и измерения краевого угла смачивания установлено, что введение добавок снижает тепловой эффект гидратации и изменяет смачиваемость поверхности. Наибольшее снижение теплового эффекта зафиксировано для композиции с мылонафтом. Ультразвуковая обработка дополнительно замедляет капиллярное водопоглощение. Полученные результаты подтверждают возможность направленного регулирования прочности гипсовых материалов за счёт комбинации химических добавок и волновых воздействий.

Ключевые слова: строительный гипс, ультразвуковая обработка, гидрофобизация, краевой угол смачивания, дисперсность

CHANGES IN THE PROPERTIES OF BUILDING GYPSUM UNDER ULTRASONIC EXPOSURE

N.G. Vilkova, S.I. Mishina, K.A. Tokarev

The effect of ultrasonic treatment of a gypsum suspension containing water-repellent additives (soap naphtha and VKZh-94) on the physicochemical properties of the resulting material has been investigated. It has been shown that ultrasonic treatment leads to dispersion of binder particles, increases the specific surface area, and forms a denser fine-grained structure. Calorimetry and contact angle measurements has revealed that the addition of additives reduces the thermal effect of hydration and alters surface wettability. The greatest reduction in the thermal effect has been observed for the composition containing soap naphtha. Ultrasonic treatment additionally slows capillary water absorption. The results confirm the possibility of directed regulation of the gypsum materials strength through a combination of chemical additives and wave action.

Keywords: construction gypsum, ultrasonic treatment, hydrophobization, contact angle, dispersion

Введение. Одним из вероятных способов изменения свойств материала (прочности, плотности и др.) является применение ультразвуковых воздействий на суспензию вяжущего вещества с целью получения строительного материала с меняющимися свойствами твердой поверхности и объемной фазы.

В настоящее время ультразвук представляет широкий спектр научных, технологических, медицинских и других областей знаний благодаря низкой стоимости, простым процедурам эксплуатации и возможностям исследования молекулярного взаимодействия. Волновые технологии стали применяться при производстве строительных материалов в основном не только как метод контроля прочности твердеющих систем, но и как способ получения строительных материалов с улучшенными свойствами [1-4]. Ультразвук является механической волной, взаимодействующей с веществом. Многообразие областей его применения можно разбить условно на три направления. Первое связано с получением информации посредством ультразвуковых волн, второе – с активным воздействием на вещество и третье – с обработкой и передачей сигналов [1, 5]. В зависимости от конкретного направления используется ультразвук определенного частотного диапазона. При воздействии на вещество ультразвуковых полей используют ультразвуковые колебания частотой от 10^4 до 10^5 Гц, причем выбор частоты определяется особенностями конкретного процесса. При обработке ультразвуком исходного маточного раствора происходит возрастание диффузионных процессов, что определяет формирование кристаллических новообразований для дальнейшего получения прочного образца, который будет терять способность не только смачиваться водой, но и одновременно ее капиллярно всасывать [1].

Таким образом, при активации раствора, содержащего вяжущее вещество и воду, ультразвуковыми воздействиями можно не только повысить прочность материала, но и при наличии в растворе гидрофобизатора можно изменить водопроницаемость формируемого при последующем затвердевании образца [6]. За счет образования мелкозернистой структуры получаемые образцы вяжущего вещества, возможно, будут обладать меньшей пористостью по сравнению с образцами, изготовленными без использования ультразвука.

Целью работы являлось исследование свойств строительного гипса, полученного из раствора затворения, содержащего гидрофобизатор, при ультразвуковом воздействии.

Методы исследования. В данной работе волновой метод активации растворов заключался в следующем: в дистиллированную воду вводилось гипсовое вяжущее, полученную суспензию подвергали ультразвуковому воздействию. В результате происходило диспергирование частиц гипса, что приводило к увеличению удельной поверхности системы, а также формированию мелкодисперсной фракции, которая определяла способность приготовленных образцов повышать прочность. Для исследования ультразвукового воздействия на суспензию гипса с различной концентрацией ПАВ использовали ячейку, представленную на рис. 1. Ячейка состояла из стеклянного стакана объемом 500 мл, ультразвукового устройства и магнитной мешалки. Постоянно осуществляли перемешивание раствора с помощью магнитной мешалки. Действие ультразвука на суспензию вели в течение 16 минут.

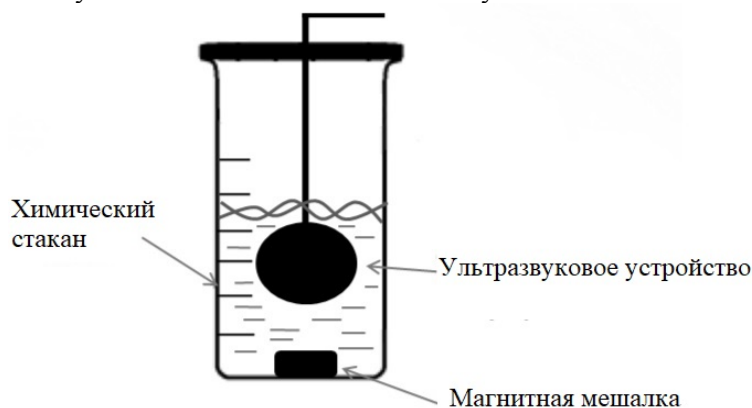


Рис. 1. Ячейка для исследования

Степень смачиваемости поверхности гипса определялась посредством метода сидячей капли на горизонтальной поверхности. В основе лежат измерения геометрических параметров капли или пузырька (определение краевого угла в суспензии): высоты, диаметра, радиуса капли или пузырька.

В табл. 1 показано, что отклонение значения краевого угла на твердом образце гипса, полученное методом сидячей капли, отличается от гистерезисного на 2,2-5,0 %, поскольку гистерезисный угол учитывает влияние шероховатости и неоднородности поверхности исследуемого образца.

Т а б л и ц а 1

Сравнение гистерезисного краевого угла и краевого угла, полученного методом сидячей капли на твердом образце состава 0,88 % гипса и 3 % мылонафта

Содержание мылонафта на 0,88 % гипса	Гистерезисный краевой угол			Краевой угол на твердом образце	
	θ_1	θ_2	$\bar{\theta}$	θ_i	$\bar{\theta}$
3 %	85,0	83,0	84,0	83,97	82,17
	85,0	88,0	86,5	78,57	
	86,0	87,0	86,5	83,97	

Определение теплового эффекта химической реакции гидратации гипса проводили калориметрическим методом [7].

Результаты и их обсуждение. С целью изучения термокинетики гидратации гипса в присутствии гидрофобизирующих добавок было определено их влияние на величину теплового эффекта реакции гидратации мономинерального полуводного гипса. В частности, представлены результаты измерений интенсивности тепловыделений в виде термокинетических кривых гидратации чистого гипса (рис. 2) и в присутствии гидрофобно-пластифицирующих добавок: мылонафта и ВКЖ-94. Сравнивая термокинетические кривые процессов гидратации, можно обнаружить различия в интенсивности тепловыделения, поскольку механизм действия гидрофобно-пластифицирующих добавок связан с адсорбцией полярных групп ПАВ (карбоксильные группы мылонафта), которая влияет на замедление начальной скорости образования и роста зародышей, кристаллизации новообразований.

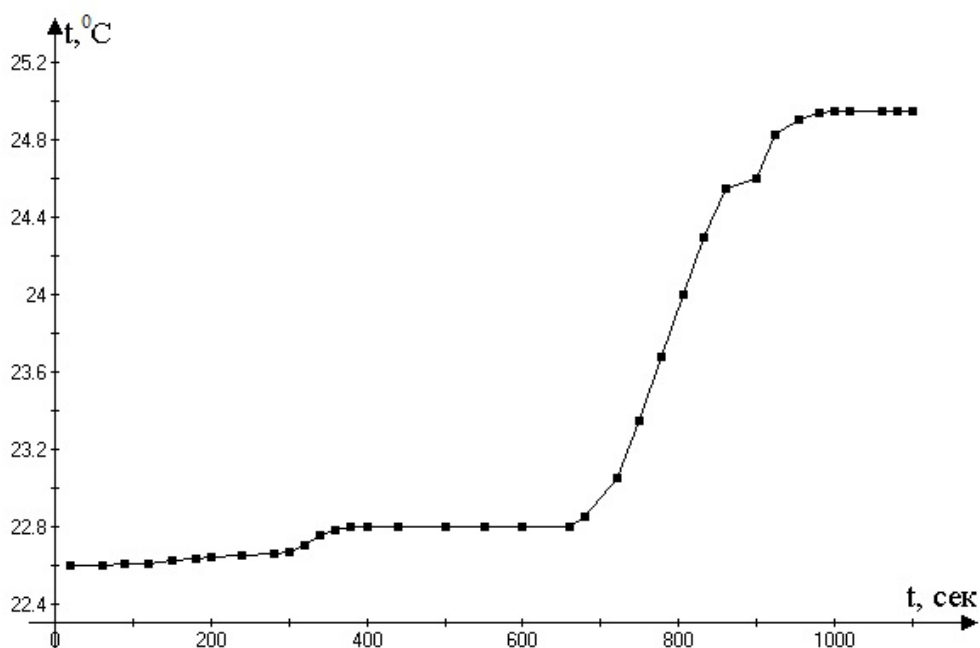


Рис. 2. Термокинетическая кривая реакции гидратации строительного гипса при его массовом содержании в растворе 2,44 %

Тепловые эффекты, измеренные при добавлении определенного количества гипса к растворам мылонафта и ВКЖ-94 (при массовом содержании ПАВ 5 %), были равны 3,47 и 11,27 кДж соответственно и были ниже определенных для чистого строительного гипса (табл. 2). Отметим, что тепловой эффект реакции гидратации чистого гипса (массовое содержание в водном растворе 2,44 %) и гипса с добавкой ВКЖ незначительно отличались друг от друга и были равны 12,35 и 11,27 кДж соответственно. Тепловой эффект гидратации гипса в растворе мылонафта был значительно меньше и составлял 3,47 кДж.

Т а б л и ц а 2

Изменение теплового эффекта реакции гидратации гипса
в зависимости от состава суспензии

Состав	ΔH_{298}^0 , кДж/моль
5 % мылонафта + 2,44 % гипса	-3,47
5 % ВКЖ-94 + 2,44 % гипса	-11,27
2,44 % гипса	-12,35

Возможной причиной является различная сила взаимодействия ПАВ-гидрофобизатора с твердой поверхностью. Данное предположение подтверждают опыты по вымачиванию образцов гипса в воде и наблюдение за поступлением ионов кальция в раствор методом титрования и изменением электропроводности раствора. Содержание кальция Ca^{2+} в растворе, полученном вымачиванием твердого образца состава: гипс + 3 % мылонафта в 100 мл дистиллированной воды и состава: гипс с массовым содержанием ВКЖ-94, равным 10 %, было равно $(47,41 \pm 0,042)$ мг/л и $(65,83 \pm 0,043)$ мг/л соответственно.

Поведение жидкости на самих твердых поверхностях было различным: полное растекание и быстрое всасывание при малых концентрациях мылонафта (от 0,05 до 3 %) и формирование равновесного краевого угла при концентрации 3 % [8]. Отметим, что в строительном производстве оптимальным считается добавление 0,05-0,15 % гидрофобизаторов в бетонные растворы и 2-5 % в штукатурные.

В работах [9, 10] показано влияние размера пор и пористости субстрата, а также поверхностного натяжения и вязкости жидкости на проявление ее свойств по отношению к твердой поверхности. Отметим, что поведение жидкости изменяется при различной морфологии пор (изотропная открытопористая структура, анизотропная структура, массив столбов и т. д.) и даже при сходной пористости или размере пор [11]. То есть гидрофобность поверхности обусловлена не только химической природой поверхности, но и микрорельефом, поскольку шероховатость вследствие гистерезиса может привести к значительному понижению смачиваемости поверхности.

Таким образом, изменение водопоглощающей способности гипса от гидрофильной поверхности, характеризующейся сильным водопоглощением, до гидрофобной при различной концентрации ПАВ можно объяснить меняющейся при кристаллизации структурой получаемого твердого материала (различной морфологией образованных пор, их средним диаметром и др.). Необходимо отметить, что вещества-гидрофобизаторы могут оказывать негативное влияние на такие свойства материала на стадии его изготовления, как прочность и период твердения. В этом случае волновые воздействия на раствор затворения различного химического состава позволяют обеспечить создание материалов с регулируемыми физико-химическими свойствами.

Как известно, увеличение дисперсности и удельной поверхности частиц минеральных вяжущих способствует переходу строительных материалов в более высокую категорию. Ультразвуковая обработка способствует созданию центров кристаллизации и, как следствие, активации процесса роста кристаллов, в результате образуются прочные кристаллизационные образования, заменяющие непрочные коагуляционные связи, меняется пористость вещества.

Вероятно, что волновое влияние на суспензию ПАВ + гипс также может привести в дальнейшем к формированию материала с упорядоченной и более плотной

структурой. В частности, было изучено движение чистой воды по образцам гипса, содержащим мылонафт, приготовленным с применением ультразвуковой технологии и без нее. Высота поднятия столба жидкости в течение 50 минут по образцу состава: гипс + мылонафт 3 % равнялась 6,8 см. При формировании образца с использованием ультразвуковой обработки исходного раствора затворения максимальная высота подъема жидкости составляла 6,1 см к 50-й минуте.

Кроме того, была изучена водопроницаемость твердых образцов гипса с различным массовым содержанием ПАВ, полученных в условиях ультразвуковой обработки соответствующей суспензии гипса и без нее.

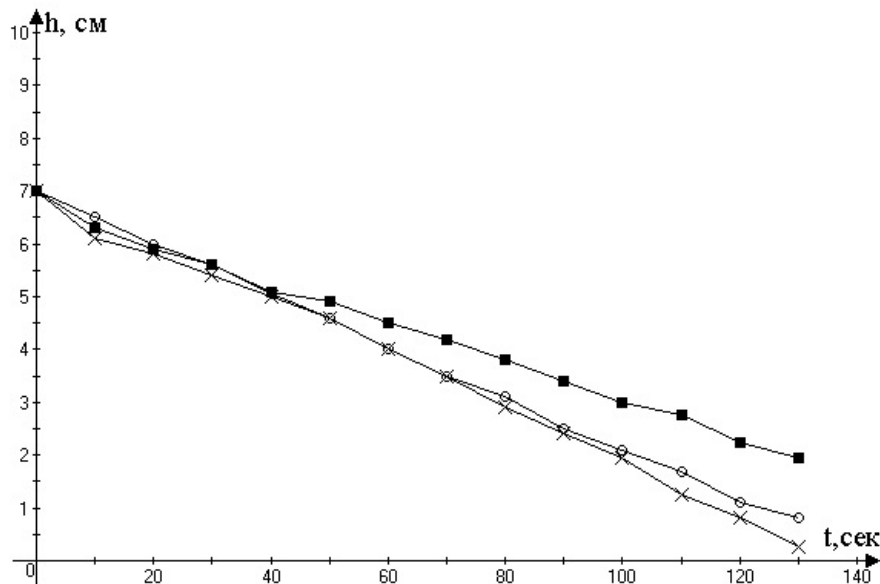


Рис. 3. Зависимость высоты столба жидкости в капилляре от времени для твердого образца состава:

■ – гипс + мылонафт 3 % + УЗ; ○ – гипс + мылонафт 3 %; х – гипс

Медленное изменение высоты столба жидкости в капилляре наблюдали на образце состава: гипс + мылонафт 3 % + УЗ. Высота жидкости в капилляре, установленном на поверхности такого материала, ко второй минуте составила 2,5 см (рис. 3, зависимость ■). Образцы составов: гипс (рис. 3, зависимость х) и гипс + мылонафт 3 % (рис. 3, зависимость о) отличались большей водопроницаемостью. Так, высота жидкости в капилляре, установленном на исследуемых образцах, ко второй минуте составляла соответственно 0,7 и 1,2 см. Необходимо отметить, что краевой угол на поверхности образцов состава: гипс + мылонафт 3 % равнялся $82,17^\circ$, что снижало водопоглощаемость по сравнению с гипсом в 1,7 раза. Однако эффективность метода повышалась при обработке суспензии ультразвуком (см. рис.3, зависимость ■). Данную зависимость наблюдали также на образцах следующих составов: гипс + ВКЖ-94 10 % + УЗ (1), гипс + 10 % ВКЖ-94 (2), гипс (3). В случае образца 1 высота жидкости в капилляре, установленном на его поверхности, ко второй минуте составила 3,8 см, на образцах 2 и 3 – 2,0 и 0,7 см соответственно. Причиной изменения свойств материала при волновом воздействии является изменение дисперсности частиц в растворе затворения.

Для наглядной демонстрации диспергирования частиц гипса в суспензии, обработанной ультразвуком, на рис. 4 представлено изменение фракционного состава суспензии гипса, содержащей 3 % мылонафта.

Полученные данные подтверждают влияние волновых воздействий на образование более плотной структуры образцов. Вероятно, происходит также формирование материалов с иной (в сравнении с гидрофобизованным в объемной фазе гипсом) капиллярно-пористой структурой, что является в дальнейшем причиной различного состояния капли на поверхности твердого образца: полное растекание, всасывание или формирование динамического краевого угла. Плотнупакованная структура твердых

образцов, полученная благодаря ультразвуковому воздействию, замедляет процесс водопоглощения и соответственно предотвращает быстрое разрушение материала во влажной среде.

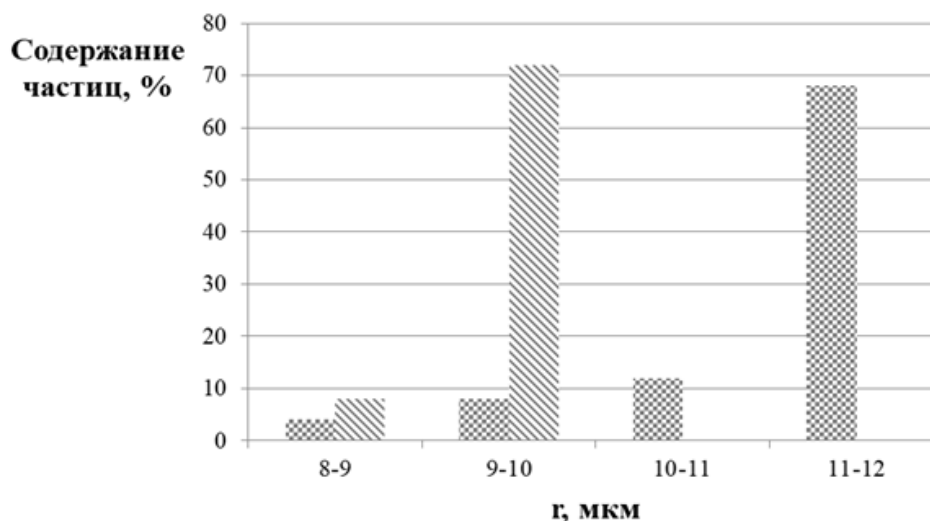


Рис. 4. Фракционный состав суспензии гипса, содержащей 3 % мылонафта:

— исходная суспензия; — после обработки ультразвуком

Выводы. Установлено, что ультразвуковая обработка суспензии строительного гипса с добавками мылонафта и ВКЖ-94 способствует диспергированию частиц вяжущего и формированию более плотной структуры материала. Присутствие гидрофобизаторов снижает тепловой эффект гидратации, причём для мылонафта это снижение наиболее значительно (до 3,47 кДж/моль). Введение 3 % мылонафта увеличивает краевой угол смачивания до 82,17°, что уменьшает водопоглощение образцов. Дополнительное ультразвуковое воздействие замедляет капиллярный подъём воды: через 2 минуты высота жидкости в капилляре для образца с мылонафтом и УЗ составила 2,5 см против один 1,2 см для образца без УЗ. Таким образом, сочетание гидрофобизации и ультразвуковой активации позволяет целенаправленно изменять капиллярно-пористую структуру и водопроницаемость гипсовых материалов.

Список литературы

1. Фокин, Г.А. Ультразвук в строительстве / Г.А. Фокин, А.С. Гуськов, Н.Г. Вилкова. – Пенза : ПГУАС, 2017. – 317 с.
2. Romanova, Y.N. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions / Y.N. Romanova, T.A. Maryutina, N.S. Musina, B.Y. Spivakov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 209. – 109977.
3. Lyashenko, D.A. Modification of fine-grained concrete with carbon nanotubes / D.A. Lyashenko, V.A. Perfilov // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2024. – V. 9, № 2. – P. 91–99.
4. Rios, J.D. Influence of Graphene Oxide Concentration and Ultrasonication Energy on Fracture Behavior of Nano-Reinforced Cement Pastes / J.D. Rios, C. Leiva, A. Martinez de la Concha, M.P. Ariza // Crystals. – 2024. – Vol. 14 (8). – P. 707.
5. Шахов, С.А. Влияние механоакустической активации волластонита на структуру и прочность цементного камня / С.А. Шахов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. – № 4(70). – С. 8–18.
6. Кайс, Х.А. Гипсоцементно-пущолановый бетон с гидрофобизирующими добавками / Х.А. Кайс, Н.Н. Морозова, Р.К. Низамов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 4(70). – С. 19–32.
7. Ушеров-Маршак, А.В. Калориметрия цемента и бетона / А.В. Ушеров-Маршак. – Харьков : Изд-во «Факт», 2002. – 183 с.

8. Вилкова, Н.Г. Краевой угол смачивания как критерий гидрофобизации поверхности гипса / Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 77–84.
9. Chen, X. The separation of chalcopyrite and chalcocite from pyrite in cleaner flotation after regrinding / X. Chen, Y. Peng, D. Bradshaw // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 58. – P. 64–72.
10. Cheng, X. Pulp potential and its implications to sulfide flotation / X. Cheng, I. Wasaki // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 1992. – Vol. 11. – P. 187–210.
11. Bacri, L. Droplet suction on porous media / L. Bacri, F. Brochard-Wyart // The European Physical Journal E. – 2000. – Vol. 3, № 1. – P. 87–97.

References

1. Fokin, G.A. Ultrasonic in construction / G.A. Fokin, A.S. Guskov, N.G. Vilkova. – Penza : PGUAS, 2017. – 317 p.
2. Romanova, Y.N. Application of ultrasonic treatment for demulsification of stable water-in-oil emulsions / Y.N. Romanova, T.A. Maryutina, N.S. Musina, B.Y. Spivakov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 209. – P. 109977.
3. Lyashenko, D.A. Modification of fine-grained concrete with carbon nanotubes / D.A. Lyashenko, V.A. Perfilov // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2024. – Vol. 9, № 2. – P. 91–99.
4. Rios, J.D. Influence of Graphene Oxide Concentration and Ultrasonication Energy on Fracture Behavior of Nano-Reinforced Cement Pastes / J.D. Rios, C. Leiva, A. Martinez de la Concha, M.P. Ariza // Crystals. – 2024. – Vol. 14 (8). – P. 707.
5. Shakhov, S.A. Effect of mechanoacoustic activation of wollastonite on the structure and strength of cement stone / S.A. Shakhov // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2024. – N 4 (70). – P. 8–18.
6. Kais, Kh.A. Gypsum-cement-pozzolanic concrete with water-repellent additives / Kh.A. Kais, N.N. Morozova, R.K. Nizamov // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2024. – N 4 (70). – P. 19–32.
7. Usharov-Marshak, A.V. Calorimetry of cement and concrete / A.V. Usharov-Marshak. – Kharkiv : Fact Publishing House, 2002. – 183 p.
8. Vilkova, N.G. Contact angle as a criterion for surface hydrophobization of gypsum / N.G. Vilkova, S.I. Mishina // Regional Architecture and Engineering. – 2025. – № 2 (63). – P. 77–84.
9. Chen, X. The separation of chalcopyrite and chalcocite from pyrite in cleaner flotation after regrinding / X. Chen, Y. Peng, D. Bradshaw // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 58. – P. 64–72.
10. Cheng, X. Pulp potential and its implications to sulfide flotation / X. Cheng, I. Wasaki // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 1992. – Vol. 11. – P. 187–210.
11. Bacri, L. Droplet suction on porous media / L. Bacri, F. Brochard-Wyart // The European Physical Journal E. – 2000. – Vol. 3, № 1. – P. 87–97.

УДК 691.32:666.971.16

DOI 10.54734/20722958_2026_3_28

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
имени Н.П. Огарёва*

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевистская, д. 68,
тел./факс: (8342) 48-25-64, 47-71-56

Володин Владимир Владимирович,
кандидат технических наук,
преподаватель кафедры «Здания,
сооружения и автомобильные дороги»
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

Низина Татьяна Анатольевна,
доктор технических наук, советник РААСН,
директор института архитектуры и
строительства, профессор кафедры
«Строительные конструкции»
E-mail: nizinata@yandex.ru

Коротин Александр Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Здания, сооружения
и автомобильные дороги»
E-mail: alkor260465@yandex.ru

Матякубов Хасан,
преподаватель кафедры «Здания,
сооружения и автомобильные дороги»
E-mail: abakan_94h@mail.ru

*National Research Ogarev Mordovia State
University*

Russia, 430005, Saransk,
68, Bolshhevistskaya St.,
tel./fax: +7(8342) 48-25-64, 47-71-56

Volodin Vladimir Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Lecturer at the
Department «Buildings, Structures and
Automobile Roads»
E-mail: volodinvv1994@gmail.com

Nizina Tatyana Anatolievna,
Doctor of Sciences, Adviser of the Russian
Academy of Architecture and Construction
Sciences, Director of the Institute of
Architecture and Construction, Professor of
the Department «Building Constructions»
E-mail: nizinata@yandex.ru

Korotin Aleksander Ivanovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of «Buildings,
Structures and Automobile Roads»
E-mail: alkor260465@yandex.ru

Matyakubov Hasan,
Lecturer at the Department of «Buildings,
Structures and Automobile Roads»
E-mail: abakan_94h@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ДОБАВКАМИ И ГЛИНИТОМ

В.В. Володин, Т.А. Низина, А.И. Коротин, Х. Матякубов

Приведены результаты экспериментально-статистического моделирования упруго-прочностных свойств мелкозернистых бетонов, модифицированных комплексными органоминеральными добавками. Органоминеральные добавки создавались на основе обожженной при 700°C глины Никитского месторождения, эфира поликарбоксилатов Синтефлоу МЕГА 52 и смесевой композиции на основе изопропаноламинов ESP800. Выявлены оптимальные концентрации эфира поликарбоксилата Синтефлоу МЕГА 52 и добавки ESP800, составляющие соответственно 0,2÷0,28 % и 0,16÷0,22 % от массы глиниста. Разработанные органоминеральные добавки позволяют обеспечить пределы прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, а также модуль упругости при сжатии на уровне бездобавочных бетонов при сокращении расхода цемента на 20 % по массе.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, органоминеральная добавка, обожженная глина, эфир поликарбоксилата, смесевые композиции на основе изопропаноламинов

EXPERIMENTAL-STATISTICAL MODELING THE PROPERTIES OF FINE-GRAINED CONCRETES MODIFIED BY SURFACE-ACTIVE ADDITIVES AND GLYNITE

V.V. Volodin, T.A. Nizina, A.I. Korotin, H. Matyakubov

The results of experimental-statistical modeling of elastic-strength properties of fine-grained concretes modified with complex organomineral additives are presented. Organomineral additives have been developed Nikitsky deposit clay fired at 700°C, polyether polycarboxylate Synteflow MEGA 52, and a blended composition based on isopropanolamines ESP800. Optimum concentrations of Synteflow MEGA 52 ether and ESP800 additive have been found to be $0,2\div0,28\%$ and $0,16\div0,22\%$, respectively, relative to the mass of the glynite. The developed organomineral additives compositions allow achieving compressive strength limit and tensile strength at bending, and also the modulus of elasticity in compression at the level of additive-free concretes while reducing cement consumption by 20 % weight.

Keywords: fine-grained concrete, organo-mineral additive, fired clay, polycarboxylate ether, isopropanolamine-based mixture compositions

В современных бетонных смесях высокие требования к качеству, долговечности и экономической эффективности достигаются применением строительной химии, включающей в себя широкий спектр добавок, каждая из которых выполняет определенную функцию. К строительной химии относятся пластификаторы, ускорители и замедлители схватывания, противоморозные и воздухововлекающие добавки, гидрофобизаторы и многое другое. Их использование позволяет регулировать свойства бетонов и растворов, адаптируя их производство к конкретным условиям работы и требованиям проекта.

Традиционными поставщиками химических добавок в России являлись зарубежные предприятия. Однако с середины 2010-х годов западные партнёры стали ограничивать поставки в РФ, что стало приводить к дефициту строительной химии на российском рынке и, как следствие, к повышению себестоимости производства бетонных смесей, бетонных и железобетонных конструкций и изделий. В связи с чем на территории России ряд предприятий стали организовывать производство химических добавок для бетонных смесей. Так, в 2012 году ГК «Синтез ОКА» запустила на территории Российской Федерации производство эфиров поликарбоксилатов. В 2019 году на производственных площадях ГК «Синтез ОКА» началось производство новых продуктов для строительной химии – триизопропаноламина (ТИПА) и диэтанализопропаноламина (ДЭИПА), позволяющих создавать новые эффективные рецептуры суперпластификаторов и интенсификаторов помола.

Весомый вклад в повышение стоимости изделий из бетона вносит рост стоимости цемента. В связи с огромной протяжённостью нашей страны стоимость цемента для конечного потребителя на 55 % определяется затратами на транспортировку цемента от производителя к потребителю, так как больше половины произведённого цемента перевозится в среднем на расстояние около 800 км [1].

Сложные экономические условия требуют от предприятий РФ проявления изобретательности и умения адаптироваться к быстро меняющимся условиям. Например, в современных бетонах вопрос сокращения расхода цемента решается в основном за счет введения в их состав активных минеральных добавок. Данные добавки позволяют получать бетон более высокого качества при пониженном расходе цемента [2-5]. Широко применяются в качестве минеральных добавок микрокремнезем, метакеолин, золы и шлаки [6-9]. Однако объёмы производства данных добавок не удовлетворяют возрастающим потребностям как в цементной, так и в бетонной промышленности, что требует получения минеральных добавок из доступного и широко распространённого сырья. Данным сырьём могут служить полиминеральные глины, запасы которых представлены практически в каждом регионе Российской Федерации. Эффективность применения термоактивированных полиминеральных глин (глинитов) в качестве активных минеральных добавок для цементных бетонов доказана многочисленными исследованиями [10-13].

Одним из перспективных направлений повышения качества бетонов является использование органоминеральных добавок (ОМД), которые представляют собой композиции на основе минеральных наполнителей и органических соединений. Органоминеральные добавки обладают уникальными свойствами, сочетая в себе преимущества как органических, так и минеральных компонентов, что позволяет улучшать физико-механические характеристики бетона [14]. Минеральная составляющая таких добавок целенаправленно модифицирует структуру бетона, увеличивая его плотность. Это структурное уплотнение является ключевым фактором, снижающим водопоглощение и повышающим стойкость материала к многократным циклам замораживания и оттаивания [15, 16]. Органоминеральные добавки создают синергетический эффект, который обеспечивает более высокие эксплуатационные свойства бетонов по сравнению с традиционными материалами.

Реализуемая в ходе исследований задача связана с оценкой влияния ОМД, получаемых на основе комплексов изопропаноламина, эфира поликарбоксилата и глиниста, на изменение упругопрочностных показателей мелкозернистых бетонов. Исследования проводились на мелкозернистом бетоне, состоящем из модифицированного вяжущего и песка в соотношении 1:3 по массе. Водовязущее отношение исследуемых составов подбиралось до обеспечения равноподвижных смесей, обладающих распылом из конуса ~130 мм. Модифицированное цементное вяжущее состояло из 80 % портландцемента (ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «ВолгаЦемент») и 20 % органоминеральной добавки.

Исследуемые ОМД изготавливались совместным помолом следующих компонентов:

- полиминеральной глины Никитского месторождения Республики Мордовия, измельченной до фракции не более 2,5 мм и обожженной при температуре 700 °С в течение 2 часов (далее по тексту МД);

- эфира поликарбоксилата Синтефлоу МЕГА 52 производства ООО «Синтез Ока – строительная химия» (далее по тексту СП);

- смесевой композиции на основе изопропаноламинов ESP800 производства ООО «Синтез Ока – строительная химия» (далее по тексту ESP800).

План экспериментального исследования и уровни варьируемых факторов представлены в табл. 1, 2; результаты – на рис. 1.

Т а б л и ц а 1

План экспериментального исследования

Факторы	Значения факторов в кодированных величинах в зависимости от номера состава																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Составы основного блока															Контрольные составы			
x_1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	Без ОМД	-1	0	1
x_2	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0	0	-1	1	0	0	0		-		
x_3	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0	0	0	0	-1	1	0				

Т а б л и ц а 2

Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Уровни варьирования в кодированных величинах	Варьируемые факторы		
	Длительность помола (x_1), ч	Доля СП (x_2), % от массы МД	Доля добавки ESP800 (x_3), % от массы МД
-1	2	0,15	0,1
0	3	0,25	0,175
+1	4	0,35	0,25

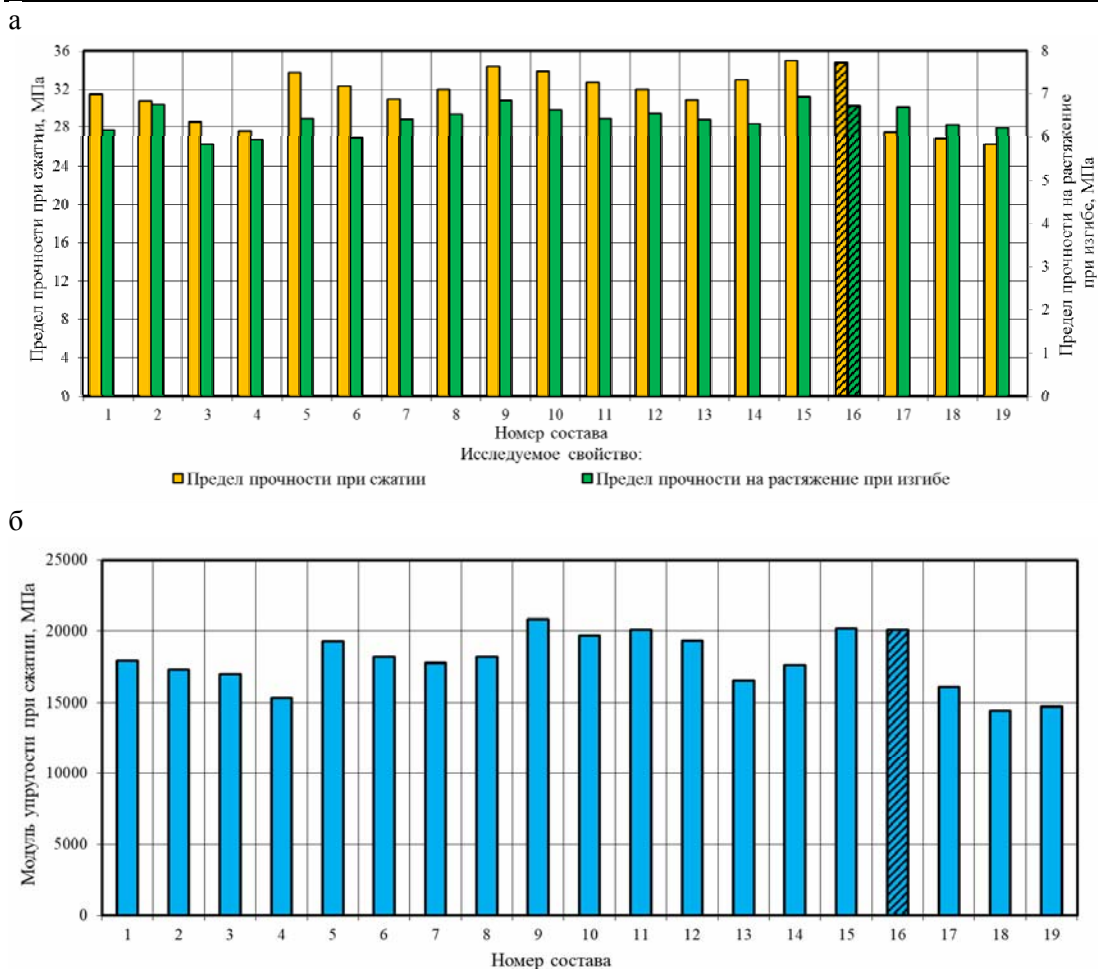


Рис. 1. Упругопрочностные характеристики
модифицированных мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток:
а – пределы прочности при сжатии и на растяжение при изгибе;
б – модуль упругости при сжатии

Анализ рис. 1 показал, что введение в состав вяжущего 20 % исследуемых ОМД позволяет регулировать упругопрочностные характеристики в достаточно широком диапазоне: $27,6 \div 35,0$, $5,8 \div 6,9$ и $15320 \div 20833$ МПа – соответственно для пределов прочности при сжатии, на растяжение при изгибе и модуля упругости при сжатии в возрасте 28 суток. При этом часть составов основного блока обладают показателями на уровне контрольного (№16) состава и значительно превосходят показатели составов №17-19, содержащих МД различной длительности помола без химических добавок. Учитывая тот факт, что применяемые поверхностно-активные добавки (СП и ESP800), помимо пластифицирующего эффекта, могут выступать в бетонной смеси в качестве интенсификаторов помола [17-19], дальнейший анализ полученных результатов производили с применением экспериментально-статистического моделирования. Были построены следующие графические зависимости: кривые изменения частоты появления событий в зависимости от уровней упругопрочностных характеристик модифицированных мелкозернистых бетонов (рис. 2); области допустимых значений изменения относительных (к составам №17-19) показателей свойств исследуемых бетонов (рис. 3-5); зоны пересечения областей допустимых значений изменения относительных (к составу №16) упругопрочностных характеристик модифицированных мелкозернистых бетонов (рис. 6).

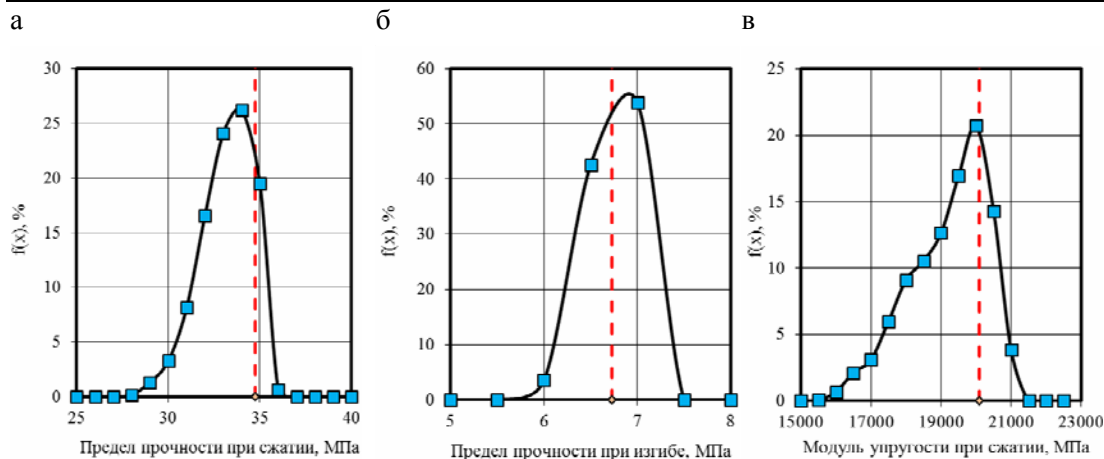


Рис. 2. Кривые изменения частоты появления событий в зависимости от уровней пределов прочности при сжатии (а) и на растяжение при изгибе (б), модуля упругости при сжатии (в) модифицированных мелкозернистых бетонов

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 2, показал, что наибольшая частота появления событий, равная 26,2, 53,8 и 20,7 %, зафиксирована на уровне 34,0, 7,0 и 20000 МПа соответственно для моделируемых значений пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, модуля упругости при сжатии. Введение в состав органоминеральной добавки СП и ESP800 приводит к повышению показателей предела прочности и модуля упругости при сжатии относительно обожженной глины (составы №17-19) соответственно на 2÷30 и 4÷40 % (см. рис. 3 и 5). При этом относительные показатели предела прочности на растяжение при изгибе варьируются от 90 до 111 % на всех исследуемых диапазонах варьируемых факторов (см. рис. 4).

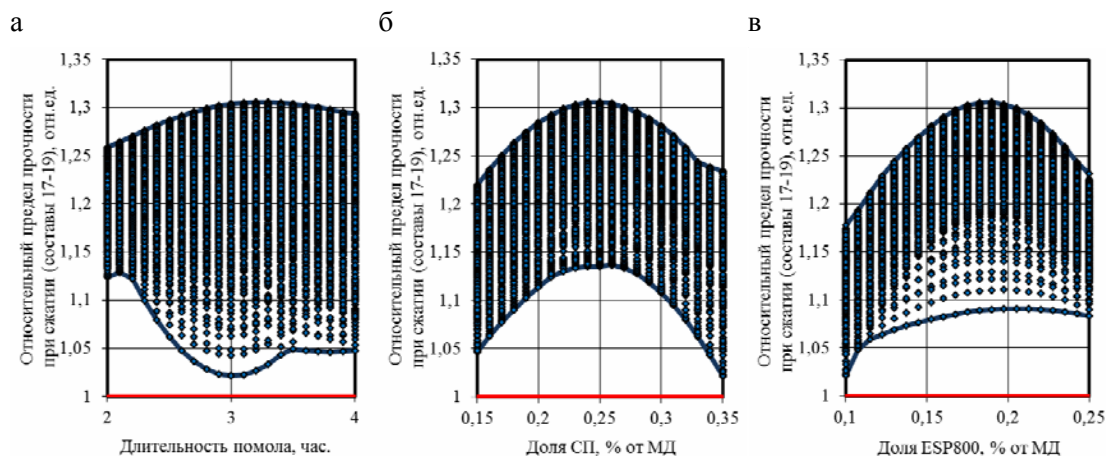


Рис. 3. Области допустимых значений изменения относительного (к составам № 17-19) предела прочности при сжатии модифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от варьируемых факторов:
а – длительность помола, ч; б – доля СП, % от МД; в – доля ESP800, % от МД

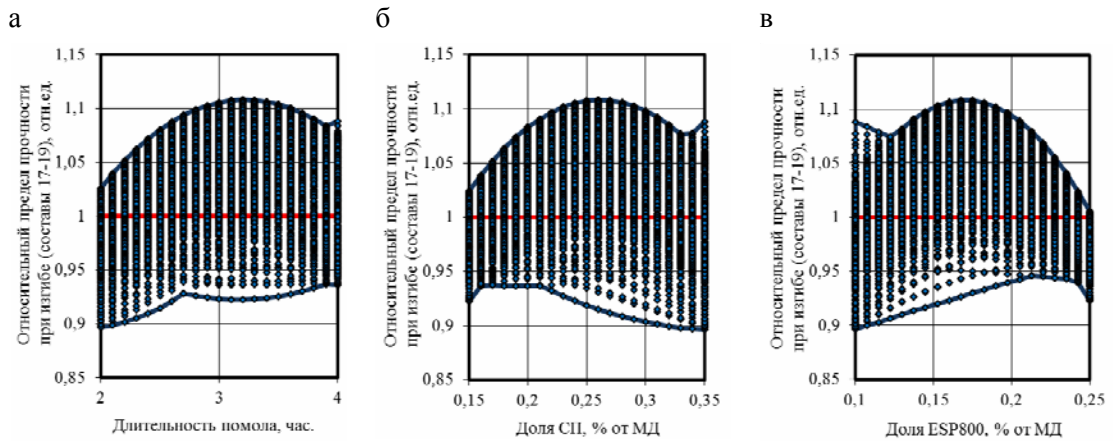


Рис. 4. Области допустимых значений изменения относительного (к составам №17-19) предела прочности на растяжение при изгибе модифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от варьируемых факторов:

а – длительность помола, ч; б – доля СП, % от МД; в – доля ESP800, % от МД

Объём допустимой области для трех исследуемых показателей (см. рис. 2), характеризуемый числом составов, превышающих показатели контрольного бездобавочного состава №16, равен соответственно для пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, модуля упругости при сжатии 3,7; 21,3 и 15,5 % от общего числа моделируемых значений.

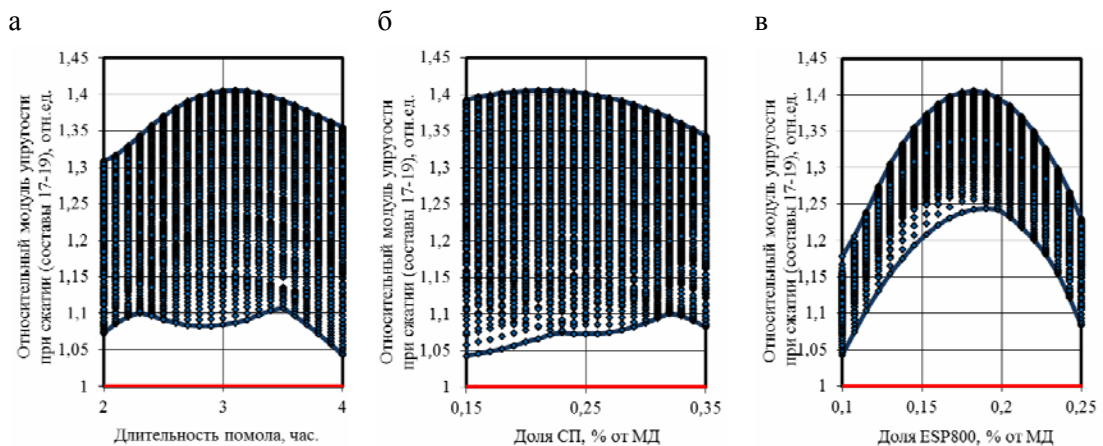


Рис. 5. Области допустимых значений изменения относительного (к составам №17-19) модуля упругости при сжатии модифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от варьируемых факторов:

а – длительность помола, ч.; б – доля СП, % от МД; в – доля ESP800, % от МД

Для определения оптимальных концентраций поверхностно-активных веществ в составе ОМД были построены зоны пересечения областей допустимых значений изменения относительных (к составу №16) характеристик модифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от варьируемых факторов (см. рис. 6) и рассчитан объём допустимых областей их упругопрочностных характеристик (табл. 3).

На основе анализа экспериментальных данных установлено (см. рис. 6, табл. 3), что для достижения упругопрочностных характеристик на уровне бездобавочного состава концентрация эфира поликарбоксилата Синтефлоу МЕГА 52 от массы МД должна составлять $0,2 \div 0,28$ %, добавки ESP800 – $0,16 \div 0,22$ % от массы глиниста. Оптимальная длительность помола находится в интервале от 2,3 до 3,4 часа. При этом объём допустимой области, рассчитанный для трех отдельно анализируемых показателей, при сравнении модельных составов с контрольным немодифицированным (№ 16) составляет 3,7, 21,3 и 15,5 % соответственно для пределов прочности

при сжатии и на растяжение при изгибе, модуля упругости при сжатии. Значительно более высокие показатели объема допустимой области, составляющие от 71,4 до 100 %, достигнуты при использовании в качестве контрольных составов №17-19.

Т а б л и ц а 3

Объем допустимых областей упругопрочностных характеристик модифицированных мелкозернистых бетонов

Исследуемые характеристики	Объем допустимой области, %			
	отдельно по критериям		обобщенно	
	вариант 1 (№16)	вариант 2 (№17-19)	вариант 1 (№16)	вариант 2 (№17-19)
Предел прочности при сжатии, МПа	3,7	100,0	2,6	71,4
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	21,3	71,4		
Модуль упругости при сжатии, МПа	15,5	100,0		

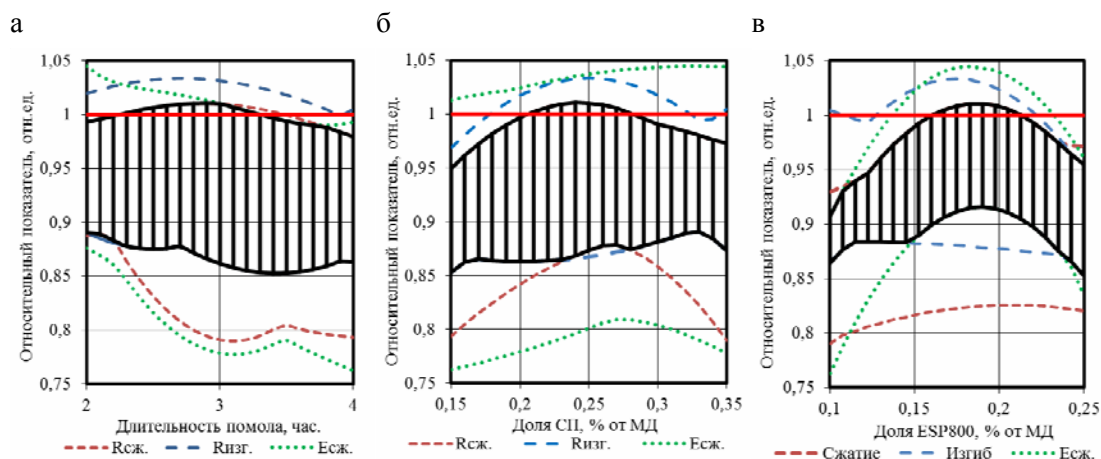


Рис. 6. Зоны пересечения областей допустимых значений изменения относительных (к составу №16) пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, модуля упругости при сжатии модифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от варьируемых факторов:

а – длительность помола, ч; б – доля СП, % от МД; в – доля ESP800, % от МД

ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты подтверждают целесообразность совместного применения в составе ОМД минеральной добавки на основе обожженной при 700°C глины Никитского месторождения, эфира поликарбоксилатов Синтефлоу МЕГА 52 и смесевой композиции на основе изопропаноламинов ESP800.

2. Разработанные составы ОМД позволяют обеспечивать комплекс упругопрочностных показателей на уровне бездобавочных бетонов при сокращении массового расхода цемента на 20 %.

Список литературы

1. Хозин, В.Г. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков, И.Р. Сибгатуллин. – Москва : Издательство АСВ, 2021. – 366 с.
2. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М.Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. – 2014. – №3. – С. 6–14.

3. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны: реальность и перспективы / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, И.А. Чилин. – DOI 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104 // Вестник НИЦ. Строительство. – 2024. – № 1(40). – С. 92–104.
4. Давидюк, А.Н. Бетон в строительстве – Новые вызовы и перспективы / А.Н. Давидюк // Вестник НИЦ. Строительство. – 2017. – №12. – С. 5–13.
5. Kalashnikov, V.I. Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, Y.S. Kusnetsov, V.M. Volodin, E.A. Belyakova // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 8(34). – P. 47–53.
6. Ушеров-Маршак, А.В. Бетоны нового поколения – бетоны с добавками / А.В. Ушеров-Маршак // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – №1. – С. 78–81.
7. Калашников, В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2016. – №1–2. – С. 96–103.
8. Каприелов, С.С. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, В.Г. Дондуков // Строительные материалы. – №11. – 2017. – С. 4–10.
9. Низина, Т.А. Оценка физико-химической эффективности минеральных добавок различного состава в цементных системах / Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин, В.В. Володин, С.В. Володин // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 5(14). – С. 41–47.
10. Schulze, S.E. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementations materials / S.E. Schulze, R. Pierkes, J. Rickert // Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. Beijing, China. – 2015. – 693 p.
11. Rakhimov, R.Z. Properties of Portland cement paste incorporated with loamy clay / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gaifullin, V.P. Morozov // Geosystem Engineering. – 2017. – Vol. 20, №6. – С. 318–325.
12. Fernandez, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite / R. Fernandez, F. Martizena, K.L. Scrivener // Cement and Concrete Reserch. – 2011. – № 41. – P. 113–122.
13. Низина, Т.А. Влияние термоактивированных глин и карбонатных пород на фазовый состав и свойства модифицированного цементного камня / Т.А. Низина, А.С. Балыков, В.В. Володин, В.М. Кяшкин, А.А. Ерофеева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 8(728). – С. 45–55.
14. Тараканов, О.В. Эффективность применения комплексных органоминеральных добавок в технологии бетонов/ О.В. Тараканов, В.И. Калашников, В.М. Журавлёв // Композиционные строительные материалы. Теория и практика. – 2016. – С. 88–94.
15. Манкевич, В.А. Исследование влияния активных минеральных добавок на процессы формирования состава и структуры продуктов гидратации цемента / В.А. Манкевичем, А.Т. Волоцко, А.А. Мечаем и Е.И. Барановской // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. – 2023. – С. 198–205.
16. Низина, Т.А. Анализ комплексного влияния модифицирующих добавок и дисперсного армирования на физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов / Т.А. Низина, А.С. Балыков // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №4. – С. 25–33.
17. Шахова, Л.Д. К вопросу о механизме действия интенсификаторов помола цемента / Л.Д. Шахова, Р.А. Котляров, Е.С. Черноситова // Цемент и его применение. – 2023. – № 1. – С. 104–111.
18. Ломеченко, Д.В. Влияние поверхностно-активных добавок на размоловоспособность цементного клинкера // Д.В. Ломеченко, Н.П. Кудеярова // Строительные материалы. – 2010. – № 8. – С. 58–59.
19. Schrabback, J.M. Polycarboxilate polimer – powered drinding efficiency / J.M. Schrabback // Global Cement Magazine. – 2009. – July – Avgust. – P. 14–16.

References

1. Khozin, V.G. "Carbonate" cements with low water demand / V.G. Khozin, O.V. Khokhryakov, I.R. Sibgatullin. – Moscow : ASV Publishing House, 2021. – 366 p.
2. Bazhenov, Yu.M. Design of Modern Concrete Structures: Defining Principles and Technological Platforms / Yu.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh // Construction Materials. – 2014. – № 3. – P. 6–14.
3. Kapriyev, S.S. Modified Concretes: Reality and Prospects / S.S. Kapriyev, A.V. Sheinfeld, I.A. Chilin. – DOI 10.37538/2224-9494-2024-1 (40)-92-104 // Bulletin of the Research Center Construction. – 2024. – № 1 (40). – P. 92–104.
4. Davidyuk, A.N. Concrete in Construction – New Challenges and Prospects / A.N. Davidyuk // Bulletin of the Research Center. Construction. – 2017. – № 12. – P. 5–13.
5. Kalashnikov, V.I. Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, Y.S. Kusnetsov, V.M. Volodin, E.A. Belyakova // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 8(34). – P. 47–53.
6. Usherov-Marshak, A.V. New generation concretes – concrete with additives / A.V. Usherov-Marshak // Concrete and reinforced concrete. Equipment. Materials. Technologies. – 2011. – № 1. – P. 78–81.
7. Kalashnikov, V.I. Evolution of composition development and change in concrete strength. Concrete of the present and the future / V.I. Kalashnikov // Construction materials. – 2016. – № 1-2. – P. 96–103.
8. Kapriyev, S.S. Cements and additives for the production of high-strength concrete / S.S. Kapriyev, A.V. Sheinfeld, V.G. Dondukov // Construction materials. – № 11. – 2017. – P. 4–10.
9. Nizina, T.A. Evaluation of the physicochemical efficiency of mineral additives of various compositions in cement systems / T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, V.V. Volodin, S.V. Volodin // Expert: theory and practice. – 2021. – № 5 (14). – P. 41–47.
10. Schulze, S.E. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementations materials / S.E. Schulze, R. Pierkes, J. Rickert // Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. Beijing, China. – 2015. – 693 p.
11. Rakhimov, R.Z. Properties of Portland cement paste incorporated with loamy clay / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gaifullin, V.P. Morozov // Geosystem Engineering. – 2017. – Vol. 20, №6. – P. 318–325.
12. Fernandez, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite / R. Fernandez, F. Martizena, K.L. Scrivener // Cement and Concrete Reserch. – 2011. – № 41. – P. 113–122.
13. Nizina, T.A. Influence of thermally activated clays and carbonate rocks on the phase composition and properties of modified cement stone / T.A. Nizina, A.S. Balykov, V.V. Volodin, V.M. Kyashkin, A.A. Erofeeva // News of higher educational institutions. Construction. – 2019. – № 8 (728). – P. 45–55.
14. Tarakanov, O.V. Efficiency of using complex organo-mineral additives in concrete technology / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov, V.M. Zhuravlev // Composite building materials. Theory and practice. – 2016. – P. 88–94.
15. Mankevich, V.A. Study of the influence of active mineral additives on the processes of formation of the composition and structure of cement hydration products / V.A. Mankevich, A.T. Volotsko, A.A. Mechaim and E.I. Baranovskaya // Modern methods and technologies for the creation and processing of materials. – 2023. – P. 198–205.
16. Nizina, T. A. Analysis of the complex influence of modifying additives and dispersed reinforcement on the physical and mechanical properties of fine-grained concrete / T.A. Nizina, A. S. Balykov // Regional architecture and construction. – 2015. – No. 4. – P. 25–33.
17. Shakhova, L. D. On the mechanism of action of cement grinding intensifiers / L.D. Shakhova, R. A. Kotlyarov, E. S. Chernositova // Cement and its application. – 2023. – № 1. – P. 104–111.
18. Lomechenko, D.V. Effect of surface-active additives on the grindability of cement clinker / D.V. Lomechenko, N.P. Kudayarova // Construction materials. – 2010. – № 8. – P. 58–59.
19. Schrabback, J.M. Polycarboxilate polimer – powered drinding efficiency / J.M. Schrabback // Global Cement Magazine. – 2009. – July – Avgust. – P. 14–16.

УДК 691.31

DOI 10.54734/20722958_2026_3_37

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Романенко Игорь Иванович,**
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Механизация и автоматизация
производства»
E-mail: miap@pguas.ru**Петровнина Ирина Николаевна,**
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Механизация и автоматизация
производства»
E-mail: irisha-vas@yandex.ru*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Romanenko Igor Ivanovich,**
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Mechanization and Automation
of Production»
E-mail: miap@pguas.ru**Petrovnina Irina Nikolaevna,**
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Mechanization and
Automation of Production»
E-mail: irisha-vas@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО НА СТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ В АГРЕССИВНЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

И.И. Романенко, И.Н. Петровнина

Исследовано влияние степени замены в композиционном вяжущем на основе молотого доменного граншлака (МГШ) на молотый лом бетона (МЛБ) и тонкоизмельченный бой керамического кирпича (ТМБКК). Дозировка тонкомолотых компонентов в шлакощелочном вяжущем варьировалась от 10 до 60 % от массы композиционного вяжущего. Результаты исследования показали, что при дозировках более 10 % как МЛБ, так и ТМБКК прочность бетонов на сжатие увеличивается на 14,4 % через 28 дней твердения в естественных условиях относительно контрольного состава. Такое улучшение было достигнуто при добавлении по 5 % как ТМБКК, так и МЛБ. Тонкомолотые компоненты в композиционном шлакощелочном вяжущем активно влияют на формирование пористости цементной матрицы в интервале 7-90 суток твердения. Применение тонкомолотых модификаторов позволило получить бетоны, обладающие высокой коррозионной стойкостью в 10 % водных растворах хлорида натрия и сульфата натрия.

Ключевые слова: composite, binder, slag, concrete and clay brick scrap, strength, porosity, resistance to aggressive solutions

THE EFFECT OF COMPOSITE BINDER FILLERS ON CONCRETE RESISTANCE IN AGGRESSIVE AQUEOUS SOLUTIONS

I.I. Romanenko, I.N. Petrovnina

The effect of the substitution rate of ground concrete scrap (GCR) and finely ground ceramic brick (FCC) in a composite binder based on ground blast furnace slag (GBS) has been studied. The proportion of finely ground components in the slag-alkali binder varied from 10 % to 60 % of the composite binder weight. The results showed that at proportions greater than 10 % of both GCR and FCC, the compressive strength of concrete increased by 14.4 % after 28 days of natural curing relative to the control composition. This improvement was achieved with the addition of 5 % of both FCC and MLB. Finely ground components in the composite slag-alkali binder actively influence the formation of porosity in the cement matrix during the 7-90 day curing period. The use of finely ground modifiers has resulted in concretes with high corrosion resistance in 10 % aqueous solutions of sodium chloride and sodium sulfate.

Keywords: binder, slag, concrete and clay brick scrap, strength, porosity, resistance to aggressive solutions

Введение. Современные исследования направлены на получение вяжущего, альтернативного портландцементу, и в первую очередь на широкое использование промышленных отходов различных производств [1,2] с высоким содержанием алюмосиликатов [3]. Применение шлаков, активированных щелочами [4], способствует получению бетонов с высокой прочностью и долговечностью.

При производстве бетона в качестве вяжущих веществ используются микрокремнезём, летучая зола и отходы металлургических производств [5, 6]. Эти продукты могут стать основой для получения экологичных материалов строительного назначения с меньшим выбросом углекислого газа по сравнению с портландцементом. В качестве активатора твердения бесцементных композиций широко используют вещества, содержащие щелочи. Они способствуют ускорению химической реакции гидратации в материалах с высоким содержанием алюмосиликатов, и эта область исследований находит отражение в различных научных работах [7...9].

Вторичное использование лома бетона и кирпича, полученного из обожжённой глины, является глобальной проблемой России [5]. Основная часть строительных отходов (лом бетона, кирпичный бой) попадает на свалки и в овраги, что усугубляет экологические и экономические проблемы. Крупнотоннажный потребитель промышленных отходов из лома бетона – это дорожное строительство. Но основная проблема заключается в переработке отходов строительного назначения – песка и пыли от дробления лома бетона, они не используются в производстве строительных материалов [7, 10].

Целью исследований являлось получение на основе бесцементного композиционного вяжущего бетонов с высокой коррозионной стойкостью в 10 % водных растворах солей NaCl и Na₂SO₄. Применяя композиционное вяжущее на основе молодого доменного шлака, наполненного молотым ломом бетона и обожжённой глиной (молотый бой керамического кирпича) в оптимальном соотношении, можно решить вопрос, связанный с улучшением экологической обстановки в регионе, получением бетонов с высокими эксплуатационными свойствами, снижением высолообразования на поверхности бетонов.

Материалы и методики проведения исследований. Использовали гранулированный доменный шлак (ГДШ) ПАО «Северсталь» влажностью 3 %, с удельной поверхностью $S_{уд} = 3\,850\text{ см}^2/\text{г}$. Химический состав исследуемых материалов представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Химический состав исследуемых материалов

Химические соединения	Химический состав		
	Молотый лом строительных материалов		Молотый доменный граншлак ПАО «Северсталь»
	Бетон на основе ПТЦ (МЛБ)	Керамический кирпич (ТМБКК)	МГШ
SiO ₂	19,53	20,2	37, 28
CaO	50,6	11,28	37, 41
MgO	2,06	0,37	12,3
Al ₂ O ₃	5,75	15,92	10,29
Na ₂ O	0,13	2,95	0,672
K ₂ O	0,73	–	0,53
TiO ₂	0,38	11,17	0,46
MnO	–	–	0,43
Модуль основности M_0	2,69	0,58	1,33

МЛБ получали в результате помола в мельнице лома и боя бетона, образующихся при сносе зданий. Бой глиняного кирпича измельчался в шаровой мельнице с целью получения наполнителя смесей – ТМБКК. Для исследований изготавливались шла-

копесчаные растворы. В качестве мелкого заполнителя применялся сурский речной песок с модулем крупности $M_{кр} = 1,8 - 2,1$.

Химический активатор твердения вяжущего приготавливали на основе водных растворов гидроксида натрия (ВРГН) и силиката натрия (СН). Смеси готовили в лабораторном смесителе. Составы смесей представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Составы исследуемых растворов и их свойства

№ п/п	Индекс	Расход ингредиентов растворной смеси						
		МГШ, г	ТМБКК, г/%	МЛБ, г/%	Песок, г	NaOH (ГН), г/% от вяжущего	Na ₂ SiO ₂ ×nH ₂ O (СН), г/% от вяжущего	Вода, г
1	К	1500	—	—	3384	54/3,6	189,75/12,5	600
2	МЛБ 10	1350	—	150/10	3420	54/3,6	189,75/12,5	600
3	МЛБ 20	1200	—	300/20	3455	54/3,6	189,75/12,5	600
4	МЛБ 40	900	—	600/40	3489	54/3,6	189,75/12,5	600
5	МЛБ 60	300	—	1200/60	3489	54/3,6	189,75/12,5	600
6	ККЛБ10	1350	75/5	75/5	3420	54/3,6	189,75/12,5	600
7	ККЛБ20	1200	150/10	150/10	3455	54/3,6	189,75/12,5	600
8	ККЛБ40	900	300/20	300/20	3489	54/3,6	189,75/12,5	600
9	ККЛБ60	300	600/30	600/30	3489	54/3,6	189,75/12,5	600

Формовались образцы балочек размером 40×40×160 мм и кубики с размером граней (70±2) мм. Отформованные образцы в формах закрывались полиэтиленовой пленкой. После распалубки через сутки после формовки образцы твердели в камере нормального твердения при температуре $T = (25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и влажности $W = (90 \pm 5) \%$. Испытания проводились на прочность при изгибе и сжатии. Физико-механические свойства растворов представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Физико-механические свойства растворов на шлакощелочном композиционном вяжущем. Твердение в камере нормального твердения

Возраст твердения, сут	Свойства образцов								
	К	МЛБ10	МЛБ20	МЛБ40	МЛБ60	ККЛБ10	ККЛБ20	ККЛБ40	ККЛБ60
Прочность на изгиб, МПа									
7 суток	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	2,8	2,6	2,2	1,8
14 суток	2,7	2,4	2,3	2,0	1,85	3,1	2,8	2,3	2,0
28 суток	2,9	2,6	2,4	2,2	1,9	3,3	2,86	2,6	2,4
Прочность на сжатие, МПа									
7 суток	35,0	30,5	25,5	21,3	15,8	40,0	39,8	33,5	30,4
14 суток	37,1	35,7	27,9	24,8	17,7	44,4	43,2	35,1	34,0
28 суток	40,9	37,6	30,0	26,4	19,2	46,8	44,5	38,6	35,8

Из результатов испытаний (см. табл. 3) видно, что на раннем этапе твердения ТМБК не оказывает существенного влияния на физико-механические свойства бетонов. Наибольшая прочность при отверждении в камере нормального твердения в возрасте 28 суток составила 2,9 МПа (контрольный состав на основе МГШ), а минимальная прочность на изгиб – 1,9 МПа (в смеси с МЛБ60 в возрасте 28 суток твердения). Добавление ТМБКК повысило прочность на изгиб по сравнению с образцами, изготовленными с использованием МГШ и МЛБ.

Прочность на сжатие у образцов с МЛБ на ранней стадии ниже, чем у контрольного образца (К). Через 28 дней образцы состава «К» показали прочность на сжатие, равную 40,9 МПа. Прочность образцов бетона в возрасте 28 суток увеличилась по сравнению с 7-дневными показателями для каждой смеси на 16,86 %, 23,28 %, 17,65 %, 23,94 % и 21,52 % для составов К, МЛБ10, МЛБ20, МЛБ40 и МЛБ60 соответственно. Такое повышение прочности на сжатие можно объяснить наличием реактивного кремнезёма в МЛБ, который способствовал химической реакции.

У составов ККЛБ прочность на сжатие выше, чем у составов МЛБ. Через 28 дней твердения в камере нормального твердения прочность на сжатие увеличилась на 17,0 % (46,8 МПа), 11,81 %, 15,22 % и 17,76 % для составов ККЛБ10, ККЛБ20, ККЛБ40, ККЛБ60 соответственно. Реактивный диоксид кремния улучшает процесс геополимеризации и приводит к повышению прочности и плотности геополимерных композиций в более поздние сроки [1, 4, 6].

Испытания бетонов на водопоглощение и пористость проводились в соответствии с ГОСТ 12730.4–2020.

Для определения коррозионной стойкости исследуемых бетонов в водных 10 % растворах NaCl и MgSO₄ использовалась методика ГОСТ Р 70109–2022. Время экспозиции 1, 3, 6 месяцев. Результаты представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Результаты испытания бетонов на композиционном вяжущем в водных 10 % растворах NaCl и MgSO₄

Среда	Время твердения, сут, К _{ст}	Прочность на изгиб/сжатие, МПа								
		К0	МЛБ 10	МЛБ20	МЛБ40	МЛБ60	ККЛБ10	ККЛБ20	ККЛБ40	ККЛБ60
Н ₂ O	60	2,6/35,0	2,4/32,5	2,2/24,1	2,0/20,6	1,8/14,4	2,8/39,3	2,6/39,9	2,2/33,5	1,8/31,6
	90	2,7/37,1	2,4/35,7	2,3/27,9	2,0/24,8	1,85/17,7	3,1/44,4	2,8/43,2	2,3/33,5	2,0/34,0
	180	2,9/40,9	2,6/37,6	2,4/30,0	2,2/26,4	1,9/19,2	3,3/46,8	2,86/44,5	2,6/38,6	2,4/35,8
10 % водный р-р NaCl	60	2,4/33,0	2,2/30,3	2,0/21,5	1,9/18,9	1,5/15,7	2,6/40,2	2,4/37,6	2,2/36,0	1,7/30,4
	К _{ст60}	0,92	0,917	0,909	0,95	0,83	0,929	0,923	1,0	0,944
	90	2,2/31,7	2,1/28,9	1,7/19,9	1,6/16,1	1,3/14,3	2,3/36,5	2,2/36,4	2,0/34,3	1,5/31,4
	К _{ст90}	0,851	0,875	0,739	0,8	0,70	0,741	0,82	0,87	0,75
	180	2,1/28,3	1,9/26,4	1,6/17,8	1,5/16,1	1,2/13,8	2,1/35,0	2,1/35,7	1,9/33,5	1,4/29,7
	К _{ст180}	0,72	0,73	0,67	0,68	0,63	0,63	0,75	0,73	0,58
10 % водный р-р Na ₂ SO ₄	60	2,7/35,1	2,3/32,2	2,0/24,0	1,8/20,3	1,5/17,1	2,58/39,7	2,6/39,7	2,1/38,2	1,7/32,8
	К _{ст60}	1,04	0,96	0,91	0,9	0,83	0,92	0,929	0,955	0,94
	90	2,5/33,4	2,2/30,8	1,9/22,6	1,6/18,4	1,5/15,0	2,75/38,5	2,5/39,0	2,2/37,8	1,7/31,4
	К _{ст90}	0,93	0,917	0,826	0,8	1,81	0,89	0,89	0,95	0,85
	180	2,52/30,8	2,2/28,1	1,92/18,9	1,7/16,0	1,3/14,6	2,8/38,2	2,47/38,4	2,1/36,6	1,6/30,1
	К _{ст180}	0,87	0,85	0,8	0,77	0,68	0,85	0,86	0,846	0,66

П р и м е ч а н и е . Коэффициент стойкости рассчитывается по формуле

$$K_{ст} = R_{из}^{среда} / R_{из}^{вода}$$

В табл. 4 приведены данные по остаточной прочности на сжатие и изгиб образцов, активированных щелочью, при замене МГШ на МЛБ и ККЛБ в диапазоне от 0 до 60 %. Образцы бетона хранились в чистой питьевой водопроводной воде и в водных 10 % растворах NaCl и MgSO₄. Из данных табл. 4 видно, что по мере увеличения количества МЛБ прочность снижалась как на сжатие, так и на изгиб. Прочность на сжатие и изгиб уменьшалась с 32,5 до 14,4 МПа и с 2,6 до 1,8 МПа соответственно, что обусловлено разложением геля алюмосиликата кальция, который в результате реакции теряет кальций [7]. В то же время МЛБ вызывает расширение образцов, активированных щелочью, что способствует появлению в образце трещин, которые приводят к снижению прочностных показателей.

Поскольку в МЛБ содержится много оксида кальция, это вызывает образование гипса в щелочной среде, что и обеспечивает расширение образца, увеличение размеров трещин, снижение прочности на сжатие и изгиб, а также приводит к потере массы [6]. Таким образом, образцы с большим содержанием МЛБ сильнее разрушаются по отношению к образцам, содержащим помимо МЛБ и ККЛБ. Из табл. 4 также видно, что при добавлении МЛБ и ККЛБ в качестве заменителя МГШ в различных смесях остаточная прочность на сжатие и изгиб значительно выше: после погружения образцов в водные 10 % растворы NaCl и MgSO₄ их прочность на сжатие и изгиб практически не изменилась. Это можно объяснить высоким содержанием кремнезёма и глинозёма в обожженной глине, которые способствуют процессу геополимеризации и делают матрицу образца достаточно устойчивой к воздействию агрессивных сред, таких, как NaCl и MgSO₄ [1, 8].

В табл. 5 представлены результаты испытаний на пористость образцов бетона на композиционном вяжущем, активированных щелочным компонентом. Испытания проводили через 7, 28 и 90 дней.

Т а б л и ц а 5

Значения пористости образцов бетона на бесцементной основе

Возраст твердения, сут	Пористость, %, образцов								
	К0	МЛБ10	МЛБ20	МЛБ40	МЛБ60	ККЛБ10	ККЛБ20	ККЛБ40	ККЛБ60
Под форвакуумом									
7	5,4	6,5	6,92	7,58	8,95	5,6	5,75	6,02	6,84
28	4,76	5,42	5,81	6,09	7,33	4,23	4,44	4,83	5,12
90	3,68	4,78	5,00	5,37	6,15	3,37	3,50	4,21	4,75
Открытая пористость									
7	13,9	12,9	13,978	14,63	15,88	12,75	12,56	13,89	15,24
28	12,01	10,59	10,69	11,17	11,83	11,69	11,11	11,94	13,68
90	11,15	10,00	10,00	10,55	10,94	9,48	9,61	10,77	12,49

Из анализа данных (см. табл. 5) видно, что процент открытой пористости был наибольший в образцах через 7 суток твердения в нормальных условиях, но самая высокая пористость составила 15,88 % в серии МЛБ60 и 15,24 % у образцов ККЛБ 60. Однако по мере увеличения срока твердения доля открытых пор во всех образцах снижалась. Пористость смеси МЛБ60 через 28 и 90 суток составила 11,83 % и 10,94 % соответственно. Уменьшение пористости бетонов свидетельствует о формировании однородной матрицы цементного камня, что способствует повышению прочности и стойкости в агрессивных 10 % водных растворах NaCl и Na₂SO₄ [6]. Было установлено, что, несмотря на снижение пористости образца с возрастом, при увеличении количества МЛБ в качестве частичной замены доменного граншлака в каждой смеси, пористость образцов бетона повышается.

В составах серии ККЛБ видно, что при увеличении % содержания МЛБ и ТМБКК в качестве частичной замены молотого граншлака пористость возрастает. Это можно объяснить способностью обожжённого клинкера глиняного кирпича впитывать большое количество воды, что и приводит к повышению пористости. Однако по мере увеличения срока твердения образцов бетона пористость уменьшается. Это можно объяснить очень мелким размером частиц обожжённого клинкера глиняного кирпича [6, 7, 9].

При исследованиях капиллярной пористости образцов бетона в виде кубиков размером 70,0×70,0×70,0 мм применяли метод насыщения водой образцов бетона под форвакуумом в соответствии с ГОСТ 12730.5-84. Результаты исследования показали, что наибольший прирост получили образцы составов МЛБ40, МЛБ60, ККЛБ40 и

ККЛБ 60 – 7,58 %, 8,95 %, 6,02 % и 6,84 % соответственно на раннем этапе твердения (7 суток). В то же время в возрасте 90 суток пористость существенно снизилась для образцов серии ККЛБ. Так, пористость ККЛБ10, ККЛБ20, ККЛБ40 и ККЛБ60 составила 3,07 %, 3,21 %, 3,99 % и 4,75 % соответственно. Снижение пористости по сравнению с 7-суточными показателями составило 30,6 – 45,2 %.

Для серии МЛБ снижение пористости равнялось 26,6–68,71 %, а у контрольного состава К0 – 31,85 %. В то же время самая низкая пористость наблюдалась у образцов серии ККЛБ10 ККЛБ20, что говорит о синергетическом эффекте влияния композиции вяжущего, активированного щелочным компонентом из граншлака, молотого клинкера кирпичного боя и молотого лома бетона, на формирование оптимальной структуры матрицы цементного камня.

Особый интерес представляет выщелачивание на поверхности бетонов, приготовленных на основе вяжущего, активированного щелочью. Данный процесс связан с перемещением щелочей, содержащихся в структуре пор, на внешнюю поверхность бетона, где под действием CO_2 воздуха образуется карбонат натрия. Наблюдение за выщелачиванием осуществлялось через семь дней после извлечения образца из ванны для водного твердения и выдержки в течение 7 дней на воздухе при $T=20^\circ\text{C}$. Было замечено, что образцы серии МЛБ60 на поверхности образца имеют наибольшее количество высолов щелочи. Такое высолообразование объясняется высокой пористостью цементного камня, что приводит к более интенсивному проникновению воды и выделению щелочных катионов [6, 8]. Образование более пористой микроструктуры, особенно в первые дни, способствует вымыванию щелочей на поверхность. Высолы, по данным, представленным в публикациях, считаются физически безвредными для эксплуатации бетонов. Высолы на поверхности бетонов в основном отражаются на эстетическом виде бетонов, подверженных увлажнению и высушиванию.

Кроме того, растворимость ионов натрия и их миграция ограничены, но их движение усиливается из-за высокой концентрации щелочного химического раствора [3, 4]. В составах серии ККЛБ по мере увеличения доли обожжённой красной глины (молотого кирпича) в образцах наблюдалось увеличение высолов. Выщелачивание менее выражено на образцах ККЛБ10 и ККЛБ20, чем в составах, содержащих только МЛБ. Таким образом, уменьшение доли высолов на поверхности бетонов, активированных щелочью, возможно за счет повышения их плотности и снижения пористости.

Выводы

1. Механическая прочность образцов бетона на композиционном бесцементном вяжущем снижается при увеличении содержания МЛБ, используемого вместо МГШ. Прочность на сжатие бетонных образцов с вяжущим, содержащим 5 % МЛБ и 5 % ТМБКК, увеличилась на 14,4 % (46,8 МПа) через 28 дней относительно контрольного состава.

2. При увеличении количества МЛБ в вяжущем, активированном щелочью, повышается как уровень пористости, так и степень высолов на поверхности бетонов.

3. Введение в оптимальном количестве ККЛБ в вяжущее позволяет повысить плотность бетона, снизить пористость и уменьшить количество высолов на поверхности образцов.

Список литературы

1. Глуховский, В.Д. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения / В.Д. Глуховский, Р.Ф. Рунова, С.Е. Максун. – Киев : Выща шк. 1991. – 242 с., с. 233–241.
2. Abadel, A.A. Effect of molar ratios on strength, microstructure, and energy consumption in metakaolin geopolymer production / A.A. Abadel, A.S. Albida, A.H. Alteb, F.A. Alrshudi, H. Abbas, Y.A. Al-Sallum // Adv. Concr. Constr. – 2021. – 11:127. – 140.1.
3. Романенко, И.И. Получение бетонов на бесцементной основе с золой-унос и ломом бетона / И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, М.И. Шереметьева, Д.М. Лобашина // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 2 (122). – С. 597–604.

4. Zhang, P. Properties of fresh and hardened fly ash/slag-based geopolymer concrete: a review / P. Zhang, Q. Gao, J. Wang, J. Guo, S. Hu, Y. Lin. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122389.16 // J. Clean. Prod. – 2020. – 270. – 122389.
5. Капустин, А. Состав и свойства композиционного цемента с добавка золошлаковой смеси ТЭЦ / А. Капустин, И. Семериков // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – № 16. – С. 38–40.
6. Li, W.-H. Study on the characteristics and microstructure of GGBS/FA-based geopolymer paste and concrete / W.-H. Li, J.-H. Wang, Y.-C. Ding, T.-W. Cheng. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.291.17 // Constr. Stroit. Mater. – 2019. – 211. – 807–813.
7. Alharbi, Y.R. Effect of using available metakaolin and nanomaterials on the behavior of reactive powder concrete / Y.R. Alharbi, A.A. Abadel, O.A. Mayhoub, M. Kohail. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121344.21 // Constr. Build. Mater. – 2021. – 269. – 121344.
8. Романенко, И.И. Строительные материалы на основе активированного сталеплавильного шлака / И.И. Романенко, А.И. Фадин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1(54). – С. 85–93.
9. Wang, B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete / B. Wang, L. Yan, Q. Fu, B. Kasal. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105565 // Resour. Conserv. Recycl. – 2021. – 171. – 105565.
10. Qian, D. Novel development of green ultra-high-performance concrete (UHPC) based on rational use of recycled binders / D. Qian, R. Yu, Q. Shui, Y. Sun, Q. Jiang, F. Zhou, M. Ding, S. Tong, Y. He. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121231 // J. Clean. Prod. – 2020. – 261. – 121231.

References

1. Glukhovskiy, V.D. Binders and composite materials of contact hardening / V.D. Glukhovskiy, R.F. Runova, S.E. Maksunov. – Kyiv : Vyshcha shk., 1991. – 242 p., p. 233–241.
3. Abadel, A.A. Effect of molar ratios on strength, microstructure, and energy consumption in metakaolin geopolymer production / A.A. Abadel, A.S. Albida, A.H. Aldeb, F.A. Alrshudi, H. Abbas, Y.A. Al-Sallum // Adv. Concr. Constr. – 2021. – 11:127. – 140.1.
3. Romanenko, I.I. Production of cement-free concrete with fly ash and concrete scrap / I.I. Romanenko, I.N. Petrovna, M.I. Sheremetyeva, D.M. Lobashina // Engineering Bulletin of the Don. – 2025. – No. 2 (122). – P. 597–604.
4. Zhang, P. Properties of fresh and hardened fly ash/slag-based geopolymer concrete: a review / P. Zhang, Q. Gao, J. Wang, J. Guo, S. Hu, Y. Lin. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122389.16 // J. Clean. Prod. – 2020. – 270. – 122389.
5. Kapustin, A. Composition and properties of composite cement with the addition of ash and slag mixture from thermal power plants / A. Kapustin, I. Semerikov // Vestnik of SUSU. – 2011. – No. 16. – P. 38–40.
6. Li, W.-H. Study on the characteristics and microstructure of GGBS/FA-based geopolymer paste and concrete / W.-H. Li, J.-H. Wang, Y.-C. Ding, T.-W. Cheng. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.291.17 // Constr. Stroit. Mater. – 2019. – 211. – 807–813.
7. Alharbi, Y.R. Effect of using available metakaolin and nanomaterials on the behavior of reactive powder concrete / Y.R. Alharbi, A.A. Abadel, O.A. Mayhoub, M. Kohail. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121344.21 // Constr. Build. Mater. – 2021. – 269. – 121344.
8. Romanenko, I.I. Construction materials based on activated steelmaking slag / I.I. Romanenko, A.I. Fadin // Regional architecture and engineering. – 2023. – №1(54). – P. 85–93.
9. Wang, B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete / B. Wang, L. Yan, Q. Fu, B. Kasal. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105565 // Resour. Conserv. Recycl. – 2021. – 171. – 105565.
10. Qian, D. Novel development of green ultra-high-performance concrete (UHPC) based on rational use of recycled binders / D. Qian, R. Yu, Q. Shui, Y. Sun, Q. Jiang, F. Zhou, M. Ding, S. Tong, Y. He. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121231 // J. Clean. Prod. – 2020. – 261. – 121231.

УДК 691.58

DOI 10.54734/20722958_2026_3_44

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
имени Н.П. Огарёва*

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевикская, д. 68,
тел.: (8342) 47-37-13

Черкасов Василий Дмитриевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Прикладная механика»
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

*Государственное казенное учреждение
«Управление автомобильных дорог
Республики Мордовия»*

Россия, 430011, Республика Мордовия,
г. Саранск, пер. Дачный, д.9

Тюрякин Максим Алексеевич,
главный специалист сводно-аналитического
отдела
E-mail: max5554284@ya.ru

*National Research Ogarev Mordovia State
University*

Russia, 430005, Saransk,
68, Bolshevistskaya St.,
tel.: +7(8342) 47-37-13

Cherkasov Vasily Dmitrievich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Applied mechanics»
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru
*State budgetary institution «Road
Administration of the Republic of Mordovia»*

Russia, 430011, Republic of Mordovia,
Saransk, 9, per. Dachnyj

Tyuryakin Maxim Alekseevich,
Chief Specialist of the consolidated and
Analytical Department
E-mail: max5554284@ya.ru

САМОКЛЕЯЩИЙСЯ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ

В.Д. Черкасов, М.А. Тюрякин

Для эффективного снижения уровня вибрации и структурного шума в элементах конструкций различного назначения применяются вибропоглощающие покрытия и конструкционные вибропоглощающие материалы. Основным элементом этих конструкций является вязкоупругий слой, обеспечивающий рассеивание энергии. В основном вязкоупругий слой выполняется из битума, который необходимо крепить с помощью клея, имеет ограниченный температурный диапазон работы. На основании исследований разработан состав вязкоупругого самоклеящегося материала для комбинированных вибропоглощающих покрытий и слоистых материалов. В настоящей работе представлены результаты разработки и исследования свойств нового вязкоупругого состава, предназначенного для использования в демпфирующих конструкциях.

Ключевые слова: вязкоупругий слой, слоистые материалы, состав, адгезионная прочность, коэффициент потерь

SELF-ADHESIVE VIBRATION-ABSORBING MATERIAL

V.D. Cherkasov, M.A. Tyuryakin

Vibration-absorbing coatings and structural vibration-absorbing materials are used to effectively reduce vibration and structural noise in various structural elements. The key element of these structures is a viscoelastic layer that provides energy dissipation. The viscoelastic layer is typically made of bitumen, which must be bonded with adhesive and has a limited operating temperature range. Based on the research a viscoelastic self-adhesive material composition for combined vibration-absorbing coatings and laminated materials has been developed. This paper presents the results of the development and study of the properties of a new viscoelastic composition intended for use in damping structures.

Keywords: viscoelastic layer, laminated materials, composition, adhesive strength, loss coefficient

Введение. Современная техногенная среда характеризуется неизбежным присутствием вибраций и акустического шума, оказывающих негативное влияние как на надежность конструкций, так и на здоровье и комфорт человека [1, 2]. В ответ на этот вызов ключевой областью материаловедения стала разработка многослойных

комбинированных материалов с целенаправленными вибропоглощающими свойствами. Многослойные вибропоглощающие покрытия являются наиболее перспективными в области вибропоглощения [3]. Применение таких материалов ведет к снижению шумового загрязнения в урбанистической среде, что является важным фактором психологического благополучия и профилактики заболеваний людей [4].

В зависимости от решаемой задачи используются либо конструкционные вибропоглощающие материалы типа «сэндвич», обладающие одновременно несущей способностью и высоким демпфированием, либо армированные комбинированные вибропоглощающие покрытия, наносимые на готовые металлические поверхности [2, 5, 6].

Одним из важнейших элементов в многослойных конструкциях является промежуточный слой [7, 8]. Существующие слоистые материалы производятся на основе битумной и поливинилацетатной мастик [9, 10], а также с промежуточным слоем из стеклоткани и термопластика. Они крепятся к стальным листам с помощью эпоксидного клея. Это приводит к увеличению срока изготовления материала. Актуальная проблема таких материалов – это слабые адгезионные свойства и малый коэффициент потерь.

В комбинированных армированных покрытиях применяют вязкоупругий слой на основе битума. К недостаткам таких покрытий относятся низкий коэффициент потерь и ограниченный температурный диапазон. В связи с этим возникает необходимость в разработке и подборе компонентов состава самоклеящегося вязкоупругого материала, обладающего высокими адгезионными показателями, высоким коэффициентом потерь и широким температурным диапазоном. Кроме того, такой материал должен быть универсальным, что позволит применять его как в армированных комбинированных покрытиях, так и в слоистых конструкциях. Создание такого материала являлось целью данных исследований. Для решения этой проблемы был разработан самоклеящийся вязкоупругий материал с адгезией к стали 0,19 МПа, к дюралюминию 0,2 МПа, имеющий коэффициент потерь 0,8.

Методы и материалы. Для решения поставленной задачи применялись следующие материалы: бутилкаучук марки БК-1675Н (ТУ 2294–034–05766801–2002), битум марки БН 70/30 ГОСТ 6617–76 производства ОАО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез», мел МТД-2 природный, технический, дисперсный (ТУ 5743–008–05120542–96), алкилфенолформальдегидная смола АФФС SP-1045 производства «SI Group» (Франция), масло индустриальное И-40 (ГОСТ 20799–88 «Масла индустриальные. Технические условия»).

Определение прочности связи с металлом при отслаивании проводили в соответствии с ГОСТ 21981-76 «Герметики. Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании».

Коэффициент потерь определяли по методике, приведенной в [7, 8].

Результаты и обсуждение. В многослойных вибропоглощающих материалах вибропоглощающие свойства зависят от состава и толщины вязкоупругого слоя. В связи с этим были проведены исследования по подбору компонентов и оптимизации состава, а также выявлена зависимость коэффициента потерь вязкоупругого слоя. Для получения оптимального состава вязкоупругого материала были выбраны следующие компоненты: бутилкаучук (связующее), мел (наполнитель), так как они обладают высокими диссипативными свойствами.

Выбор бутилкаучука в качестве связующего обусловлен тем, что кроме высоких диссипативных свойств он работает в широком диапазоне температур. В качестве наполнителя приняли мел, так как он обладает высокими демпфирующими свойствами. Содержание мела в составе определяли по влиянию его на адгезионную прочность. Влияние содержания мела на адгезионную прочность полимерной композиции представлено на рис. 1.

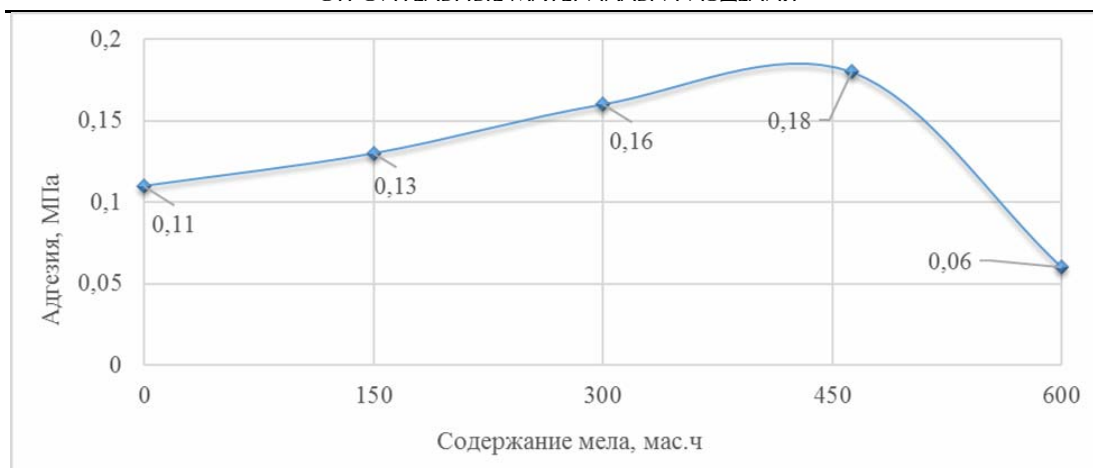


Рис. 1. Влияние содержания мела на адгезионную прочность полимерной композиции

Из рис. 1 видно, что оптимальное количество мела составляет 462,28 мас. ч. Для повышения адгезионной прочности композиции в состав добавляли битум. Влияние количества битума на адгезионную прочность вязкоупругого материала при отрыве от стали представлено на рис. 2.

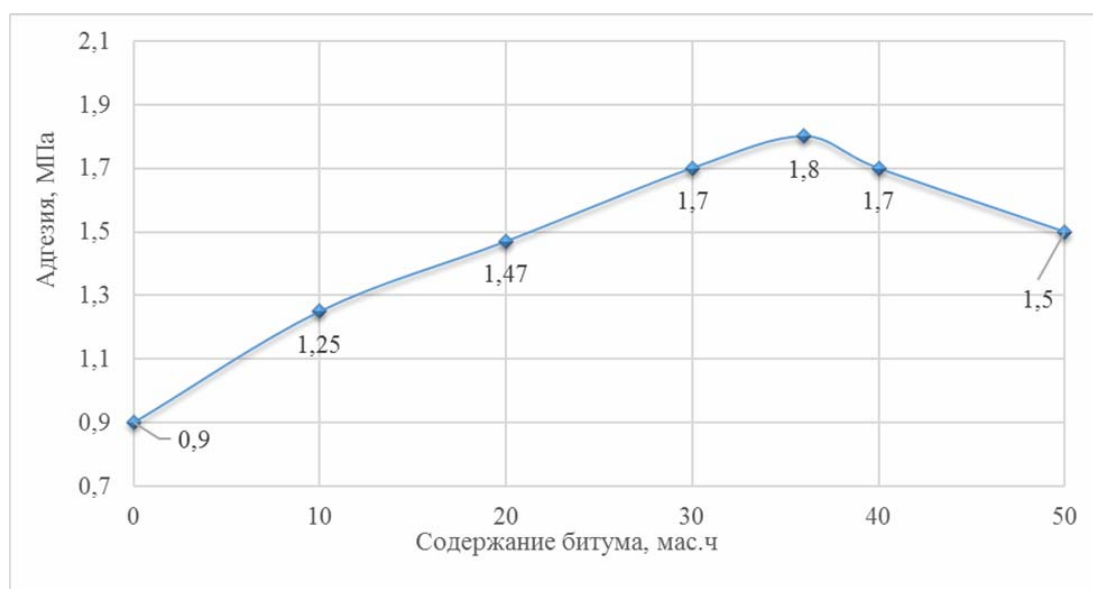


Рис. 2. Влияние количества битума на адгезионную прочность вязкоупругого материала при отрыве от стали

Исследование показывает, что введение в состав битума повышает адгезионную прочность. Установлено, что оптимальное количество битума составляет 36 мас. ч. При этом адгезионная прочность увеличивается в 2 раза. Это вызвано тем, что добавление битума в состав повышает вязкость композиции. В результате этого смесь заходит в различные шероховатости субстрата, повышая при этом адгезионную прочность.

В ходе проведенных исследований установлено следующее оптимальное соотношение компонентов: бутилкаучук – 77,52 мас. ч, мел – 462,28 мас. ч., битум – 36 мас. ч. Эти компоненты в дальнейшем не менялись.

На вибропоглощающие свойства полимерных композитов большое влияние оказывает пластификатор. В качестве пластифицирующей добавки используется индустриальное масло И-40, а в качестве адгезионной добавки, обеспечивающей липкость, – смола АФФС. Для установления необходимого количества этих компонентов в составе матрицы применяли метод математического планирования эксперимента. В качестве первого фактора (X_1) приняли количество масла, которое варьировалось в сле-

дующих пределах: 61,79, 70,52, 79,25 мас. ч. Вторым фактором (X_2) было количество смолы, которое варьировалось в пределах 12,6, 25,2, 37,8 мас. ч. Критерием оптимизации служил показатель коэффициента потерь.

Матрица планирования и рабочая матрица приведены в таблице.

№ опыта	Матрица планирования		Рабочая матрица		Коэффициент потерь
	X_1	X_2	Количество масла, мас. ч.	Количество смолы, мас. ч.	
1	+1	+1	79,25	37,8	0,82
2	0	+1	70,52	37,8	0,8
3	-1	+1	61,79	37,8	0,88
4	+1	0	79,25	25,2	0,8
5	0	0	70,52	25,2	0,68
6	-1	0	61,79	25,2	0,74
7	+1	-1	79,25	12,6	0,65
8	0	-1	70,52	12,6	0,62
9	-1	-1	61,79	12,6	0,69

Из данных, приведенных на рис. 3, 4, получаем, что оптимальное содержание масла в составе – 79,25 мас. ч., а смолы – 25,2 мас. ч.

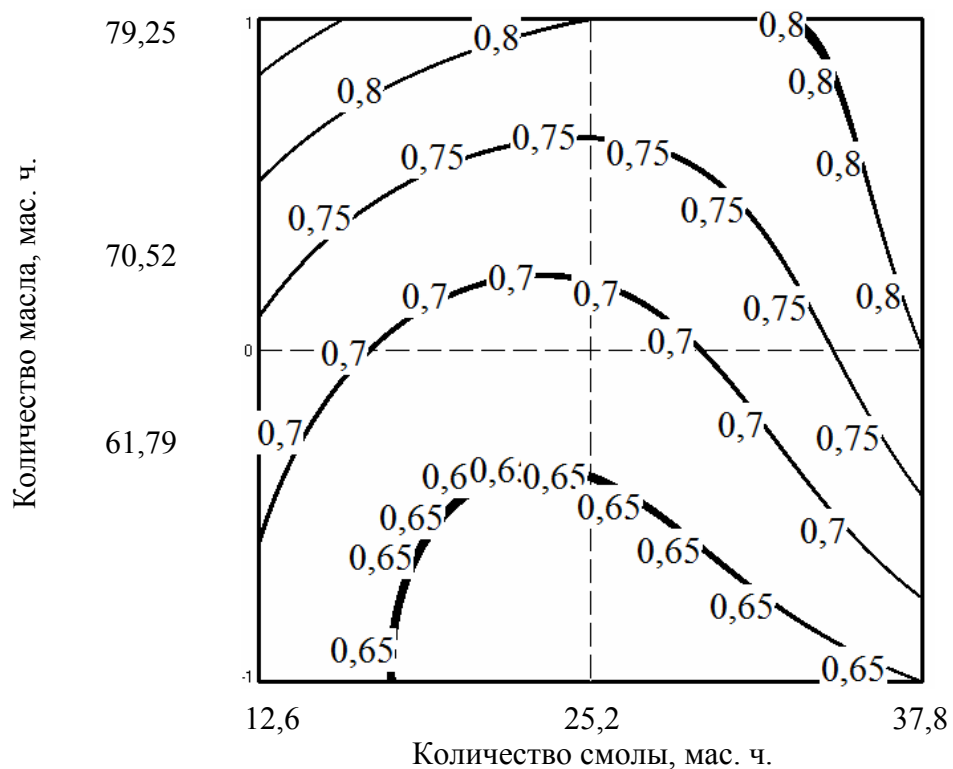


Рис. 3. Влияние количества масла и смолы на коэффициент потерь

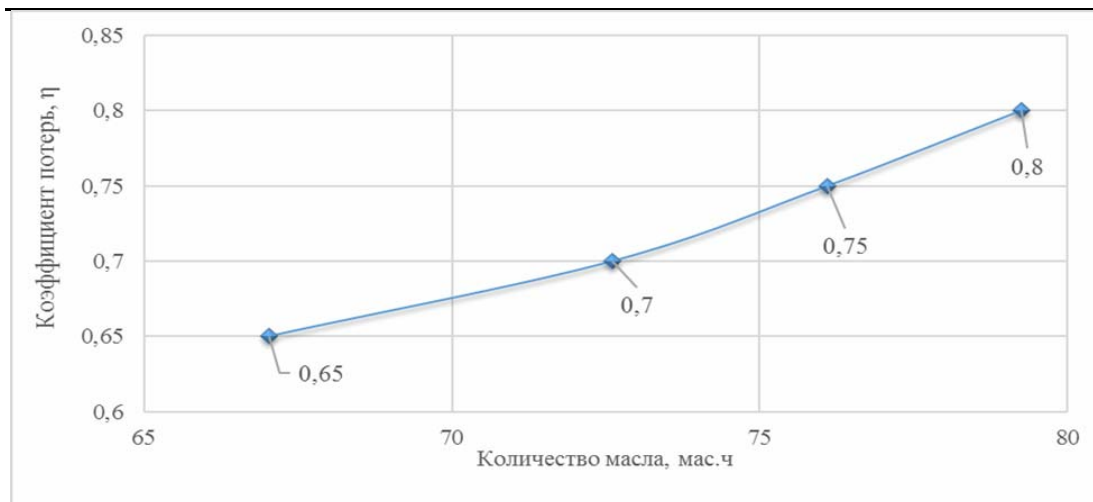


Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь вязкоупругого слоя от количества масла при содержании смолы 25,2 мас. ч.

Выводы. Среди большого разнообразия компонентов, используемых при разработке вязкоупругого слоя для многослойных конструкций, основными выбраны бутилкаучук, мел и битум, а также установлено оптимальное соотношение этих компонентов в следующих пропорциях: бутилкаучук (77,52 мас. ч.), мел (462,28 мас. ч.) и битум (36 мас. ч.), что обеспечивает высокие диссипативные свойства и адгезионную прочность. Введение пластификатора (индустриальное масло И-40) и адгезионной добавки (смола АФФС) значительно влияет на коэффициент потерь. Наилучшие результаты достигнуты при содержании масла 79,25 мас. ч. и смолы 25,2 мас. ч. Доказано, что разработанный материал обладает высокими демпфирующими характеристиками: коэффициент механических потерь (η) составляет 0,8. Материал демонстрирует хорошую адгезионную прочность к конструкционным материалам: 0,19 МПа к стали и 0,2 МПа к дюралюминию.

Список литературы

1. Влияние наполнителей на динамические механические свойства композиционных материалов на основе бутилкаучука / О.И. Тарасова, Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин [и др.]. – DOI 10.51608/26867818_2025_4_118 // Эксперт: теория и практика. – 2025. – № 4(31). – С. 118–129.
2. Никифоров, А.С. Вибропоглощение на судах / А.С. Никифоров. – Ленинград : Судостроение, 1979 – 184 с.
3. Шеянов, Д.А. Методы регулирования вибропоглощающих свойств полимерных материалов / Д.А. Шеянов // Научный аспект. – 2024. – Т. 43, № 1. – С. 5615–5621.
4. Иванов, Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н.И. Иванов. – Москва : Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.
5. Huang, Zhi Cheng & Pan, Jinbo & Yang, Ziheng & Wang, Xingguo & Chu, Fulei. Transverse Vibration of Viscoelastic Sandwich Structures: Finite Element Modeling and Experimental Study. Materials. 14. 7751., 2021. DOI: 10.3390/ma14247751
6. Николаев, А.Ф. Вибропоглощающие полимерные материалы / А.Ф. Николаев, Н.И. Дувакина, Т.А. Александрова // Пластические массы – 1989. – №11. – С. 40–42.
7. Чернышев, В.М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов / В.М. Чернышев ; отв. ред. А.А. Гусаров ; Ин-т машиноведения. – Москва : Наука, 2004 – 288 с.
8. Авдонин, В.В. Вибропоглощающие композиционные покрытия: специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Авдонин Валерий Викторович. – Саранск, 2015. – 123 с.

9. Черкасов, В.Д. Битумно-каучуковое вяжущее для эффективных вибропоглощающих покрытий / В.Д. Черкасов, Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин. – DOI 10.5862/MCE.43.2 // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 8(43). – С. 7–13.
10. Черкасов, В.Д. Вибропоглощающие свойства слоеных материалов / В.Д. Черкасов, А.С. Смиркин, А.В. Бородин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1(42). – С. 45–51.

References

1. The influence of fillers on the dynamic mechanical properties of composite materials based on butyl rubber / O.I. Tarasova, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin [et al.]. – DOI 10.51608/26867818_2025_4_118 // Expert: Theory and Practice. – 2025. – No. 4 (31). – P. 118–129.
2. Nikiforov, A.S. Vibration absorption on ships / A.S. Nikiforov. – Leningrad : Sudostroenie, 1979 – 184 p.
3. Sheyanov, D.A. Methods for regulating vibration-absorbing properties of polymeric materials / D.A. Sheyanov // Scientific aspect. – 2024. – Vol. 43, No. 1. – P. 5615–5621.
4. Ivanov, N.I. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control / N.I. Ivanov. – Moscow : University book, Logos, 2008. – 424 p.
5. Huang, Zhi Cheng & Pan, Jinbo & Yang, Ziheng & Wang, Xingguo & Chu, Fulei. Transverse Vibration of Viscoelastic Sandwich Structures: Finite Element Modeling and Experimental Study. Materials. 14. 7751., 2021. DOI: 10.3390/ma14247751
6. Nikolaev, A.F. Vibration-absorbing polymeric materials / A.F. Nikolaev, N.I. Duvakina, T.A. Aleksandrova // Plastics. – 1989. – No. 11. – P. 40–42.
7. Chernyshev, V.M. Damping of mechanical systems vibrations by polymer coatings / V.M. Chernyshev ; Ed. A.A. Gusarov ; Institute of Mechanical Engineering. – Moscow : Nauka, 2004 – 288 p.
8. Avdonin, V.V. Vibration-absorbing composite coatings: specialty 05.23.05 «Construction materials and products»: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Avdonin Valery Viktorovich. – Saransk, 2015. – 123 p.
9. Cherkasov, V.D. Bitumen-rubber binder for effective vibration-absorbing coatings / V.D. Cherkasov, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin. – DOI 10.5862/MCE.43.2 // Journal of Civil Engineering. – 2013. – No. 8(43). – P. 7–13.
10. Cherkasov, V.D. Vibration-absorbing properties of layered materials / V.D. Cherkasov, A.S. Smirkin, A.V. Borodin // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1 (42). – P. 45–51.

Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова,
д. 46

Алфимова Наталия Ивановна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: alfimovan@mail.ru,

Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, г. Belgorod,
46, Kostyukova St.

Alfimova Natalya Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building Materials Science,
Products and Structures»
E-mail: alfimovan@mail.ru

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме «Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки» (FZWG-2024-0001), с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ОЦЕНКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И МОРФОСТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИТРОГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ

Н.И. Алфимова

Представлены результаты комплексного исследования физико-химических и морфоструктурных особенностей цитрогипсов различного генезиса с точки зрения перспективности их использования в технологии строительных вяжущих. Установлено высокое сходство образцов по валовому химическому составу (содержанию основных оксидов CaO и SO_3) и первичной морфологии кристаллов (преобладание удлиненных пластинчатых частиц размером 10–100 мкм). Выявлено, что длительное хранение цитрогипса в отвалах сопровождается рядом вторичных процессов: формированием крупных агломератов (до 1000 мкм), сглаживанием граней кристаллов, накоплением атмосферных загрязнений, снижением удельной поверхности и трансформацией пористой структуры. Указанные изменения приводят к снижению реакционной способности сырья, что негативно влияет на характер новообразований затвердевшего цитрогипсового вяжущего и его прочностные характеристики.

Ключевые слова: цитрогипс, гипсосодержащие отходы, морфоструктурные особенности, цитрогипсовые вяжущие

This work was realized under the support of the State Assignment for the creation of new laboratories in 2021, including under the guidance of young promising researchers of the national project "Science and Universities". The research title is "Elaboration and development of scientific and technological foundations for creating an integrated technology for processing gypsum-containing waste from various industrial enterprises and searching of new ways to use processed products", FZWG-2024-0001. Equipment from the High Technology Center at BSTU named after V. G. Shukhov was used.

EVALUATION OF PHYSICOCHEMICAL AND MORPHOSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF CITROGYPSUM BINDERS

N.I. Alfimova

This paper presents the results of a comprehensive study of the physico-chemical and morphostructural features of citrogypsum from various sources, assessing its potential for using in construction binder technology. The samples have been found to exhibit high similarity in bulk chemical composition (content of major oxides CaO and SO_3) and primary crystal morphology

(predominance of elongated plate-like particles sized 10–100 μm). It is revealed that prolonged storage of citrogypsum in waste stockpiles is associated with several secondary processes: the formation of large agglomerates (up to 1000 μm), smoothing of crystal faces, accumulation of atmospheric contaminants, reduction in specific surface area, and transformation of the porous structure. These changes lead to a decrease in the reactivity of the raw material, which negatively affects the nature of hydration products in the hardened citrogypsum binder and its strength properties

Keywords: citrogypsum, gypsum-containing wastes, morphostructural characteristics, citrogypsum binders

Введение. Использование гипсосодержащих отходов (ГСО) в качестве сырьевой базы для производства одно- и многокомпонентных вяжущих [1–4] представляет собой перспективную альтернативу природному гипсовому камню. В настоящее время известно более 50 видов ГСО, среди которых наиболее крупнотоннажными являются отходы производства минеральных кислот [1, 2] – фосфогипс [5–7], фторгипс [8–10], борогипс [11, 12]. Отходы производства органических кислот (лимонной, винной, муравьиной и др.) образуются в значительно меньших объёмах; поэтому вопросы их утилизации традиционно стоят менее остро [1, 2].

Утилизация отходов минеральных кислот осложняется рядом факторов: наличием разнообразных примесей, негативно влияющих на окружающую среду и свойства строительных материалов, а также значительной вариативностью морфоструктурных характеристик в зависимости от источника [5, 13]. В отличие от них отходы органических кислот содержат существенно меньше вредных примесей (как правило, это остатки самих кислот), что делает их потенциально более привлекательным сырьём для получения вяжущих с предсказуемыми и воспроизводимыми свойствами [1, 2]. Высокая «чистота» таких отходов позволяет упростить, или полностью исключить стадию очистки, в результате снижаются энергозатраты и себестоимость конечного продукта.

Наиболее крупнотоннажным среди отходов органических кислот является цитрогипс, образующийся при биохимическом синтезе лимонной кислоты (1,34 т цитрогипса на 1 т кислоты [1, 2, 14]). До недавнего времени в России действовал единственный завод по производству лимонной кислоты в г. Белгороде, однако в настоящее время он прекратил работу, и потребность в кислоте удовлетворяется преимущественно за счёт импорта из Китая. Вместе с тем в России реализуются проекты по созданию собственных производственных мощностей: в Воронежской области строится завод «Цитрон» (плановая мощность 20 тыс. т/год), в Тульской области компания «Органические кислоты» намерена запустить предприятие по выпуску лимонной и молочной кислот и их солей мощностью 70 тыс. т/год. С вводом этих объектов в эксплуатацию прогнозируемый объём ежегодного образования цитрогипса может превысить 100 тыс. т [2]. В контексте принципов рационального природопользования и экономики замкнутого цикла целесообразно заранее предусмотреть пути утилизации цитрогипса, исключив его накопление в отвалах.

Следует отметить, что строгий контроль технологического процесса и множество ограничивающих факторов, необходимых для обеспечения сложной биохимической реакции при производстве лимонной кислоты [15, 16], позволяют предположить, что цитрогипс, в отличие от отходов минеральных кислот (например фосфогипса), будет характеризоваться относительной стабильностью химического и минерального состава, а также схожей морфологией частиц – как от партии к партии в рамках одного производства, так и между различными предприятиями, на которых используется технология глубокой ферментации.

В данном исследовании представлены результаты сопоставления качественных характеристик цитрогипса, взятого из отвалов российского завода по производству лимонной кислоты в г. Белгороде (ЦГ_Р) и цитрогипса китайского завода (ЦГ_К), взятого непосредственно после выхода из производства. Основной целью сравнительного анализа являлось выявление наличия существенных различий между цитрогипсами различных производителей лимонной кислоты, что в дальнейшем позволит оценивать степень сопоставимости и воспроизводимости результатов при замене источника

цитрогипса, Кроме того, так как ЦГ_к не подвергался продолжительному складированию в отличие от ЦГ_р, их сравнительный анализ позволит установить степень влияния длительного хранения на качественные характеристики ЦГ и цитрогипсовых вяжущих.

Методы исследования. В качестве объекта исследования выступали цитрогипс с предприятия РФ (ЦГ_р) и цитрогипс с предприятия Китая (ЦГ_к).

Рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализы исследуемых образцов осуществлялись с помощью дифрактометра высокого разрешения «Ultima IV» Rigaku (Rigaku, Япония). Для изучения минерального состава использовался ИК-фурье-спектрометр Vertex 70 (Bruker, Берлин, Германия). Фазовые превращения определялись с помощью термоанализатора STA 449 F1 JUPITER (Netzsch, Германия)

Особенности микроструктуры частиц ЦГ, цитрогипсового вяжущего (ЦГВ) и новообразований цитрогипсового камня (ЦГК) выявляли с помощью растровой электронной микроскопии. В качестве инструментария применяли сканирующий электронный микроскоп Mira 3 FesSem (Tescan, Чехия), работающий в режиме высокого вакуума (InBeam), с использованием катода Шоттки высокой яркости. Напыление образцов осуществлялось хромом.

Измерение удельной площади поверхности/распределения пор по размерам осуществлялось с помощью автоматического прибора BELSORP miniX (MicrotracBEL Corp., Япония). Гранулометрический состав определялся с помощью лазерного дифракционного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoTec plus (ООО «Фринч», Германия).

Вяжущее получали путем термической обработки цитрогипса в лабораторном сушильном шкафу при температуре 175 °С. Для контроля процесса дегидратации при изготовлении гипсового вяжущего применялся двухканальный цифровой измеритель-регистратор температуры (MASTECH, MS6514 TERMOMETER), в качестве измерительных элементов использовались термопары типа К.

Измерение pH проводили на pH-метре pH-150М (РУП «Гомельский завод измерительных приборов», Беларусь).

Расчет индекса кристалличности осуществлялся по формуле

$$CI = \frac{I_1 + I_2 I_3}{I_1}, \quad (1)$$

где I_1 , I_2 , I_3 , – максимальная высота трех самых интенсивных пиков в порядке убывания [16].

Результаты и обсуждения

Исследование химического и минерального состава цитрогипсов. Анализ химического и элементного состава изучаемых цитрогипсов показал, что они отличаются очень близким друг к другу содержанием основных оксидов (CaO и SO₃) (табл. 1) и элементов (С и S) (табл. 2). Различие в содержании других оксидов, в частности кремния, алюминия и железа, может быть обусловлено тем, что ЦГ_к был отобран непосредственно на выходе из технологической линии производства лимонной кислоты и не подвергался длительному складированию. В отличие от него, ЦГ_р был взят из открытого отвала после многолетнего хранения на открытом воздухе. За этот период произошло постепенное загрязнение материала за счёт привнесения пылеватых частиц извне.

Т а б л и ц а 1

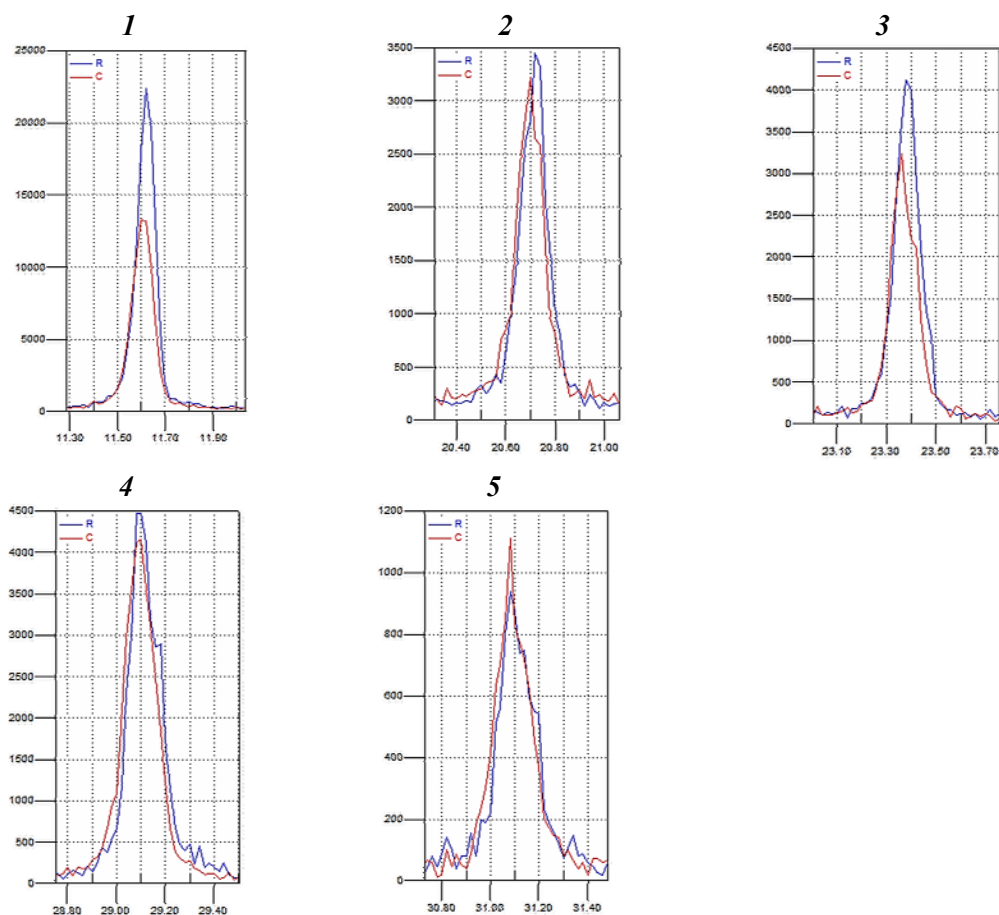
Химический состав (%) цитрогипсов

Вид ГСО	SO ₃	CaO	SrO	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Др.
ЦГ _р	50,85	48,32	0,030	0,317	0,066	0,061	0,064	0,146	0,018	0,128
ЦГ _к	49,77	49,40	0,010	0,275	0,036	0,152	0,030	0,162	0,034	0,131

Элементный состав (%) цитрогипсов

Вид ГСО	Sx	Ca	Sr	Si	Na	Al	Fe	Mg	K
ЦГ _Р	19,35	36,36	0,025	0,148	0,049	0,032	0,045	0,088	0,015
ЦГ _К	19,78	35,59	0,008	0,128	0,027	0,081	0,022	0,098	0,028

Анализ дифрактограмм цитрогипсов показал наличие всех рефлексов, соответствующих основным пикам дигидрата сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (рис. 1, табл. 3). При сопоставлении пяти основных рефлексов установлено, что их интенсивности (I) и ширина на полувысоте (FWHM) незначительно различаются между образцами. В частности, наибольшей интенсивностью основного рефлекса (№1 (020)) характеризуется ЦГ_Р (см. рис. 1).

Рис. 1. Основные отражения $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ на рентгенограммах: ЦГ_Р (—) и ЦГ_К (—)

Т а б л и ц а 3

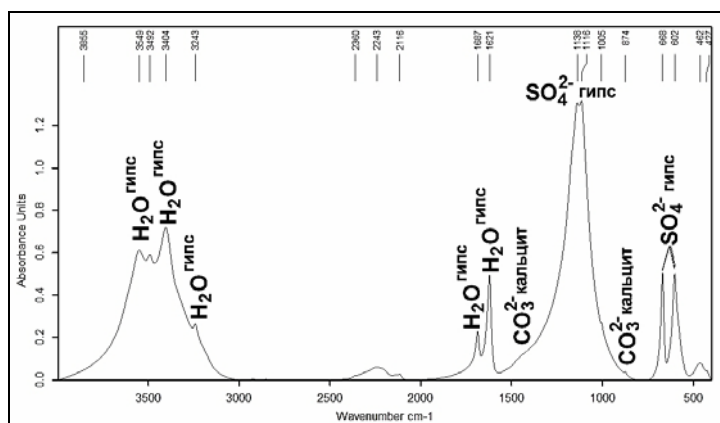
Характеристики основных отражений $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ на рентгенограммах цитрогипсов (№ согласно рис. 1)

№	2-theta(deg)		d(ang.)		I (cps)		FWHM(deg)	
	ЦГ _Р	ЦГ _К	ЦГ _Р	ЦГ _К	ЦГ _Р	ЦГ _К	ЦГ _Р	ЦГ _К
1	11,620	11,600	7,615	7,628	22279	13115	0,100	0,105
2	20,720	20,700	4,286	4,290	3319	3095	0,120	0,125
3	23,380	23,360	3,804	3,807	4064	3162	0,120	0,115
4	29,080	29,100	3,070	3,068	4454	4122	0,155	0,150
5	31,080	31,080	2,877	2,877	921	1082	0,165	0,150

Однако, несмотря на то что основные рефлексы, соответствующие $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, у ЦГ_Р выше, индекс его кристалличности составил 1,38, что ниже, чем у ЦГ_К (1,56). Учитывая методику расчёта CI (уравнение (1)), отмечаем, что данное различие свидетельствует не о снижении структурного совершенства, а о более выраженном доминировании рефлекса (020) у образца ЦГ_Р. Повышенная интенсивность пиков у ЦГ_Р, скорее всего, обусловлена удалением органических примесей и снижением аморфного фона в ходе естественного «старения» материала. Наблюдаемое увеличение полуширины дифракционных пиков №3 (040) и №4 (130) у ЦГ_Р (см. табл. 3) свидетельствует об избирательном характере структурных изменений: в то время как базальная плоскость {010} совершенствуется, отдельные кристаллографические направления могут подвергаться точечным искажениям под действием внешних атмосферных воздействий (замораживание-оттаивание, выветривание, вымывание). Таким образом, более низкое значение индекса кристалличности у ЦГ_Р отражает повышение степени текстурной ориентации кристаллов с преимущественным развитием грани {010}.

Анализ ИК-спектров образцов цитрогипса показал наличие у обоих полос поглощения, соответствующих $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (рис. 2). Полосы поглощения, характерные для ионов SO_4^{2-} , наблюдались в областях 602, 668, 1016–1142 cm^{-1} . Полосы вблизи 602 и 669 cm^{-1} отнесены к деформационным колебаниям $\nu_4(\text{SO}_4^{2-})$, тогда как полосы в диапазоне 1016–1142 cm^{-1} обусловлены валентными колебаниями $\nu_3(\text{SO}_4^{2-})$. Присутствие кристаллизационной воды H_2O подтверждается наличием полос при 1621, 1687, 2116–2244 cm^{-1} и 3200–3550 cm^{-1} .

а



б

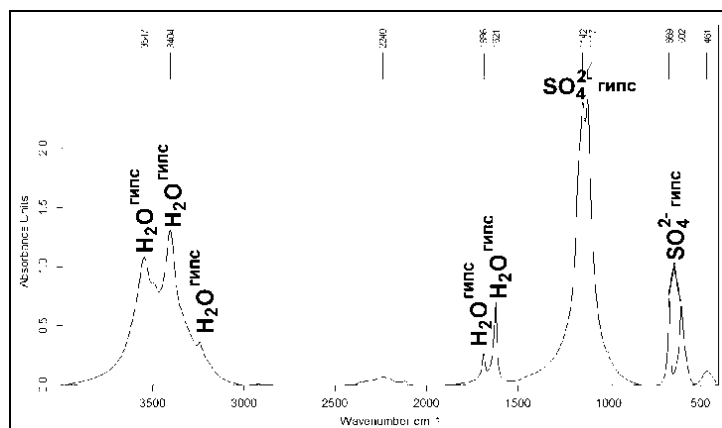


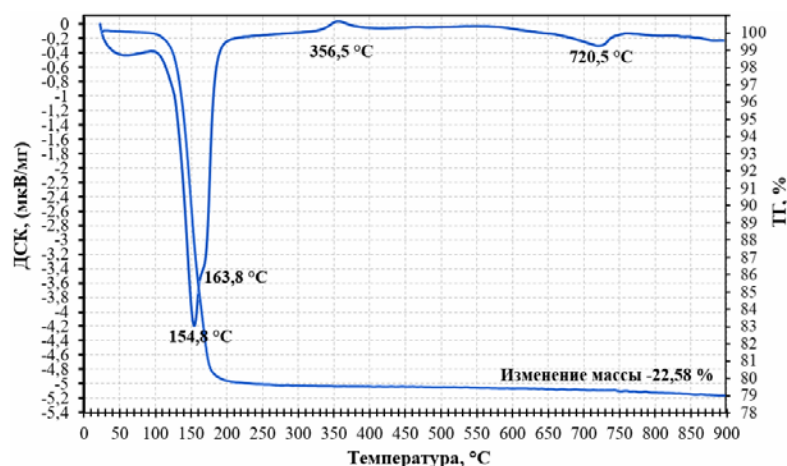
Рис. 2. ИК-спектры ЦГ_Р (а), ЦГ_К (б)

На ИК-спектрах ЦГ_р дополнительно выявлены полосы 874 см^{-1} , соответствующие деформационным колебаниям $\nu_2(\text{CO}_3^{2-})$, а также слабые полосы в области $1400\text{--}1450\text{ см}^{-1}$ – асимметричные валентные колебания $\nu_3(\text{CO}_3^{2-})$, что свидетельствует о присутствии кальцита (CaCO_3) в составе данного цитрогипса. Присутствие кальцита в составе ЦГ_р, вероятно, обусловлено тем, что г. Белгород является регионом, богатым меловыми отложениями и загрязнение могло произойти за счет попадания частиц мела из грунта или миграции компонентов грунтовых вод в процессе длительного накопления и хранения отходов.

Анализ дериватограмм (рис. 4) показал, что для обоих цитрогипсов характерен двойной эндотермический эффект в интервале температур $150\text{--}170\text{ }^\circ\text{C}$. Первый пик связан с удалением основной части кристаллизационной воды (переход дигидрата в полугидрат), второй – с дегидратацией остаточной кристаллизационной воды (образование растворимого ангидрита). При этом у ЦГ_к данные превращения смещены в область более высоких температур: температура первого эндотермического эффекта выше на $2,6\text{ }^\circ\text{C}$, а второго – на $8\text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с ЦГ_р.

Смещение температур дегидратации ЦГ_к в высокотемпературную область по сравнению с ЦГ_р, вероятно, обусловлено присутствием в первом остатков лимонной кислоты, которая, адсорбируясь на поверхности кристаллов, может затруднять десорбцию молекул воды, повышая энергетический барьер процесса дегидратации. По мере хранения и выветривания цитрогипса содержание органических примесей снижается, что закономерно приводит к протеканию дегидратации при более низких температурах.

а



б

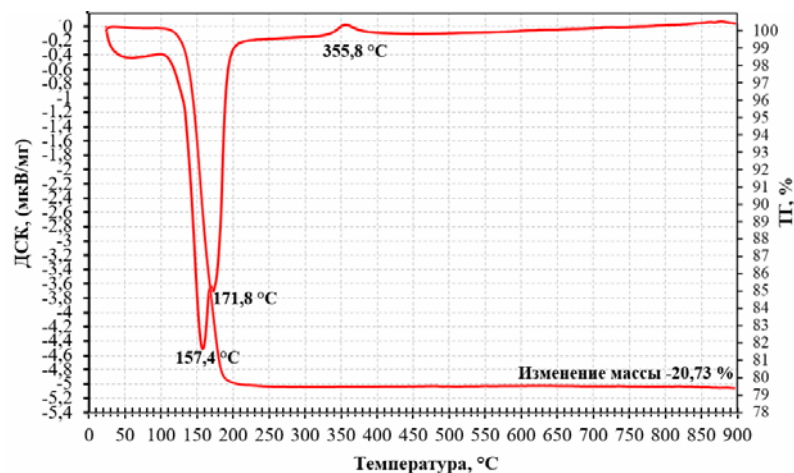


Рис. 3. Термический анализ ЦГ_р (а), ЦГ_к (б)

Перестройка кристаллической структуры с образованием нерастворимого ангидрита ($\text{CaSO}_4 \text{ II}$), сопровождающаяся экзотермическим эффектом, у обоих образцов цитрогипса происходит при практически идентичных температурах: $356,5^\circ\text{C}$ (рис. 3, а) и $355,8^\circ\text{C}$ (рис. 3, б). Это свидетельствует о том, что процессы перехода растворимого ангидрита в нерастворимый ангидрит не зависят от длительности хранения цитрогипса.

Необходимо отметить, что на дериватограмме ЦГ_р дополнительно наблюдается эндотермический эффект при температуре $720,5^\circ\text{C}$. Данный пик соответствует термическому разложению кальцита, присутствие которого в образцах ЦГ_р ранее было подтверждено методом ИК-спектроскопии.

Исследование рН цитрогипсов. рН гипсосодержащего сырья оказывает существенное влияние на кинетику гидратации вяжущих и, как следствие, на физико-механические характеристики камня. В случае цитрогипса значение рН также служит индикатором содержания остаточной лимонной кислоты и продуктов её диссоциации.

Для определения рН готовили суспензии при соотношении цитрогипс:дистиллированная вода = 1:10. Контроль рН осуществляли непосредственно после приготовления суспензии, а также через 1, 7 и 28 суток выдержки при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ (см. рис. 4).

Анализ полученных результатов показал, что значения рН суспензии ЦГ_р находятся в диапазоне 7,41–7,83, что соответствует нейтральной и слабощелочной среде. Смещение рН суспензий ЦГ_р в слабощелочную область, вероятнее всего, обусловлено присутствием карбонатных примесей (кальцит). В то же время значения рН ЦГ_к несколько ниже ($\text{pH} \approx 6,36\text{--}6,76$) и лежат в слабокислой области. Данное снижение может свидетельствовать о наличии в ЦГ_к остатков лимонной кислоты. Наблюдаемая динамика рН во времени (постепенная стабилизация значений к 28 суткам) может свидетельствовать о протекании процессов взаимодействия водорастворимых компонентов с твердой фазой.

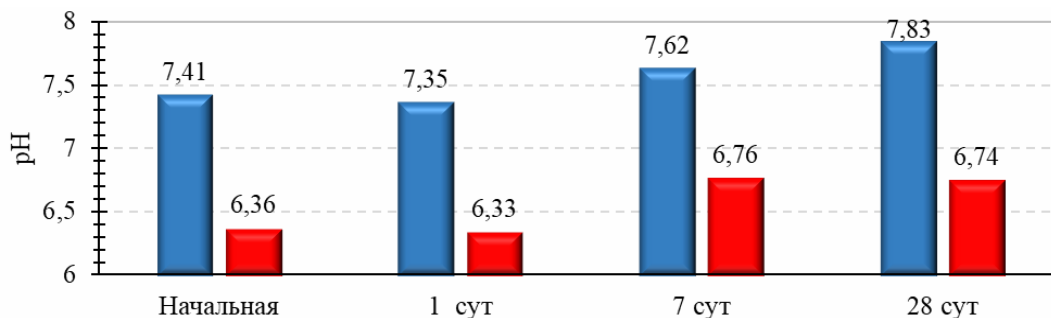
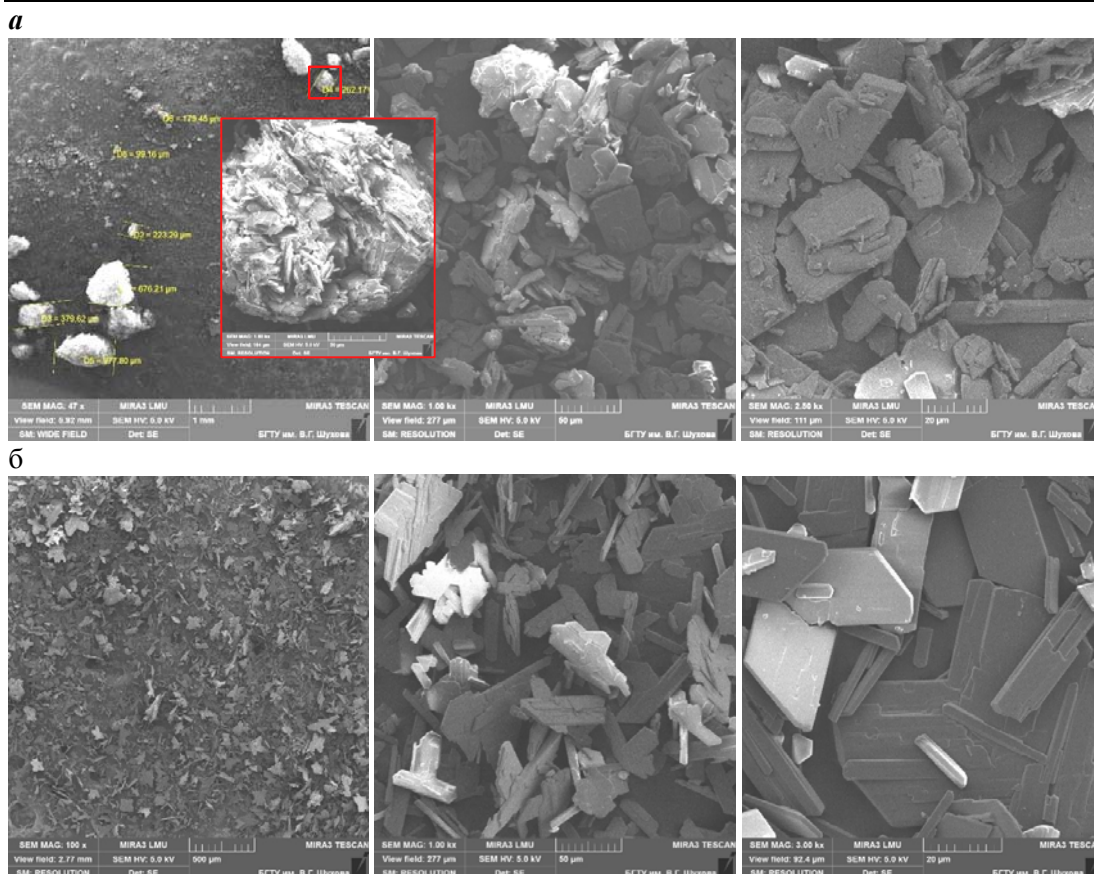


Рис. 4. рН гипсосодержащего сырья в зависимости от времени: (■) ЦГ_р, (■) ЦГ_к

Исследование морфологии частиц цитрогипсов. Анализ морфологии частиц (рис. 5) исследуемых образцов цитрогипса выявил их существенное сходство: оба ЦГ представлены преимущественно удлиненными кристаллами пластинчатого габитуса размером от 10 до 100 мкм. Однако ЦГ_к состоит преимущественно из отдельных частиц (рис. 5, б), тогда как в составе ЦГ_р наблюдается значительное количество агломератов размером от 10 до 1000 мкм, сформированных в результате длительного хранения в условиях повышенной влажности. Кроме того, частицы ЦГ_р характеризуются сглаженными, более округлыми краями, что обусловлено процессами поверхностного растворения и перекристаллизации при выветривании (рис. 5, а) в ходе длительного хранения.

Рис. 5. Морфология частиц ЦГ_Р (а), ЦГ_К (б)

Исследование гранулометрических характеристик цитрогипсов. Визуальная оценка цитрогипсов показала, что ЦГ_К отличается более высокой степенью белизны и имеет чистый молочный оттенок, тогда как ЦГ_Р характеризуется сероватым цветом с пониженной светлотой (рис. 6). Данное различие обусловлено загрязнением ЦГ_Р примесями в процессе длительного хранения в открытом хранилище. Кроме того, изменение цвета может быть связано с окислением накопленных и остаточных органических веществ, а также формированием вторичных минеральных фаз (например кальцита), что согласуется с данными ИК-спектроскопии и термического анализа.

Оба образца ЦГ представляют собой мелкозернистый порошкообразный материал, состоящий из отдельных частиц и их агломератов различного размера. При этом агломераты в ЦГ_К легко разрушаются при приложении незначительных усилий, тогда как агломераты в ЦГ_Р обладают большей прочностью и разрушаются только при интенсивном воздействии, что обусловлено формированием более прочных межчастичных контактов в процессе длительного хранения ЦГ_Р.

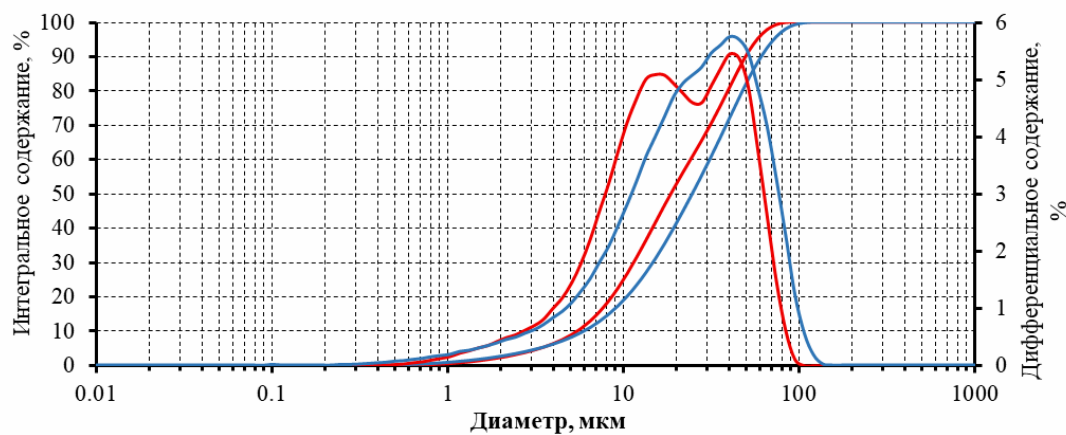
Анализ гранулометрического состава цитрогипсов, выполненный путем сопоставления дифференциальных кривых распределения (рис. 7), показал, что для ЦГ_Р характерно одномодальное распределение с максимумом в области ≈ 40 мкм и общим смещением кривой в сторону более крупных частиц. В то же время для ЦГ_К наблюдается бимодальное распределение с пиками при ≈ 15 и ≈ 40 мкм, что может свидетельствовать о гетерогенности его гранулометрического состава.

Количественные параметры (табл. 4) полностью согласуются с формой дифференциальных кривых. В частности, абсолютная ширина распределения, характеризуемая разностью d_{90} и d_{10} , для ЦГ_Р составляет 54,91 мкм, что на 19,5 % превышает значение для ЦГ_К (44,21 мкм), что свидетельствует о расширении диапазона размеров в центральной доле объемного распределения частиц и коррелирует с общим сдвигом кривой ЦГ_Р в область крупных частиц.

а



б

Рис. 6. Внешний вид ЦГ_р (а), ЦГ_к (б)Рис. 7. Гранулометрический состав ЦГ_р (—) и ЦГ_к (—)

Медианный диаметр (d_{50}) для ЦГ_р составляет 24,59 мкм, тогда как для ЦГ_к – 18,58 мкм, при этом коэффициент неоднородности $((d_{90}-d_{10})/d_{50})$ для ЦГ_к равен 2,37, что указывает на более широкий относительный разброс размеров частиц по сравнению с ЦГ_р (2,23).

Т а б л и ц а 4

Гранулометрические характеристики цитрогипса, полученные с помощью лазерного анализатора размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plu

Вид ЦГ	Показатель							
	Модалый диаметр (мкм)	Удельная поверхность (см ² /см ³)	d_{10} (мкм)	d_{50} (мкм)	d_{90} (мкм)	Размах $(d_{90}-d_{10})/d_{50}$	$d_{90}-d_{10}$	$D[4, 3]$ (мкм)
ЦГ _р	37,79	5635	5,91	24,59	60,82	2,23	54,91	29,6
ЦГ _к	37,79	5712	5,45	18,59	49,66	2,37	44,21	23,7

Более высокое значение d_{10} у ЦГ_р (5,91 мкм) свидетельствует о меньшей доле мелкодисперсной фракции в данном цитрогипсе по сравнению с ЦГ_к, что согласуется с данными о значениях удельной поверхности (см. табл. 4), объёмно-взвешенного среднего диаметра ($D[4, 3]$), смещением дифференциальных кривых и в совокупности свидетельствует об укрупнении частиц в процессе длительного хранения у ЦГ_р.

Необходимо отметить, что, несмотря на различия в интегральных параметрах гранулометрического распределения, модалый диаметр частиц для обоих цитро-

гипсов составляет 37,79 мкм. Вероятным объяснением данного результата может выступать то, что размер ≈ 38 мкм соответствует наиболее характерному размеру первичных кристаллов цитрогипса, формирующемуся в процессе технологического осаждения при производстве лимонной кислоты. Изменение гранулометрического состава при выветривании затрагивает преимущественно периферийные фракции распределения: мелкодисперсная фракция (< 10 мкм) агломерируется или удаляется, что приводит к росту d_{10} и исчезновению вторичного пика на кривой распределения ЦГ_р. В то же время доминирующая фракция ≈ 38 мкм сохраняется как модальное значение для обоих образцов.

Постоянство модального диаметра при изменении других гранулометрических параметров дает основание предполагать, что процессы длительного хранения приводят к перераспределению объёмных долей крайних фракций, но не изменяют фундаментальную характеристику размера первичных кристаллов, заложенную на стадии образования цитрогипса.

Результаты определения удельной площади поверхности и общего объема пор цитрогипсов, полученных методом адсорбции газов, коррелируются с данными по гранулометрии. В частности, ЦГ_р по сравнению с ЦГ_к отличается меньшими значениями удельной площади поверхности и общего объема пор ($p/p_0=0,9900$) при больших значениях среднего диаметра пор (табл. 5). Данная закономерность согласуется с установленным ранее укрупнением частиц ЦГ_р: рост медианного диаметра (d_{50}) и объёмно-взвешенного среднего размера ($D[4,3]$) приводит к уменьшению удельной поверхности согласно обратной зависимости. Снижение общего объема пор может быть связано с процессами поверхностного растворения и перекристаллизации частиц ЦГ_р в ходе длительного хранения, что ранее было установлено с помощью электронной микроскопии.

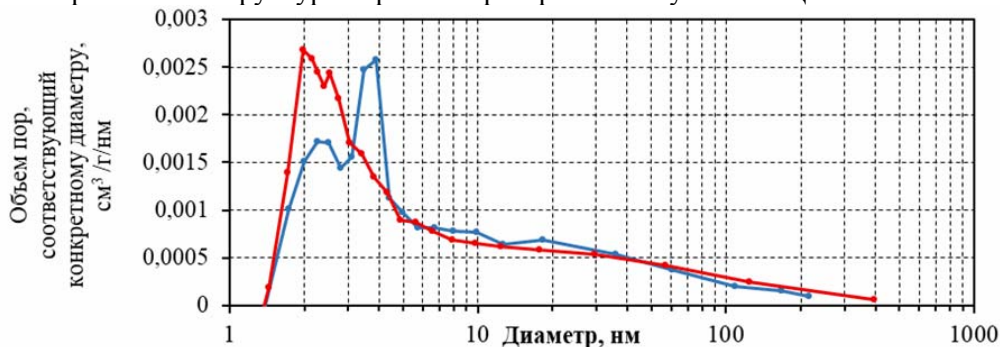
Т а б л и ц а 5

Удельная площадь поверхности и общий объем пор цитрогипсов
по методу адсорбции газов (ВЕТ)

Параметры	Вид цитрогипса	
	ЦГ _р	ЦГ _к
Удельная площадь поверхности, м ² /кг	13817	15495
Общий объем пор ($p/p_0=0,9900$), см ³ /г	0,061266	0,067487
Средний диаметр пор, нм	17,737	17,421

Увеличение среднего диаметра пор при сохранении одномодального характера распределения у ЦГ_р свидетельствует о трансформации пористой структуры: мелкие поры внутри частиц и микродефекты «залечиваются», тогда как межчастичное пространство формирует более крупные, но менее развитые по объёму поры.

На рис. 8 представлены дифференциальные кривые распределения пор по диаметрам для обоих образцов цитрогипсов (по методу ВЛН), анализ которых позволил выявить различия в структуре порового пространства изучаемых ЦГ.

Рис. 8. Объем пор, соответствующий конкретному диаметру ЦГ_р (—) и ЦГ_к (—)

В частности, ЦГ_к характеризуется узким одномодальным распределением мезопор с доминирующим максимумом при 1,97 нм и дополнительным выбросом в области 2,54 нм. В то же время для ЦГ_р характерно бимодальное распределение мезопор с пиками в областях 2,25–2,51 и 3,47–3,88 нм. Появление второй моды в области крупных мезопор (3,47–3,88 нм) свидетельствует о формировании развитой межчастичной пористости в процессе длительного хранения. Это обусловлено изменением структуры агломератов: наряду с сохранением внутривчастичных пор (2,25–2,51 нм) происходит формирование более крупных межчастичных пустот в агломератах, что согласуется с данными гранулометрического анализа об укрупнении частиц ЦГ_р.

Изготовление цитрогипсового вяжущего. Изготовление вяжущих и исследуемых цитрогипсов осуществлялось путем обжига в сушильном шкафу при равных загрузке и температурном режиме. Необходимо отметить, что из ЦГ_р предварительно, путем просеивания через сито 1,25, были удалены крупные включения. Ввиду отсутствия достаточного количества ЦГ_к физико-механические характеристики определялись на образцах-кубах размером 3×3×3 см при нормальной густоте цитрогипсового теста.

Анализ полученных результатов (табл. 6) показал, что для достижения нормальной консистенции цитрогипсового теста в случае с ЦГВ_к требуется на 2 % больше количества воды затворения, чем для ЦГВ_р, что закономерно обусловлено большей пористостью частиц исходного цитрогипса и, как следствие, вяжущего на его основе. Стоит отметить, что, несмотря на большие значения нормальной густоты и изначально большее содержание остатков лимонной кислоты в составе исходного цитрогипса, ЦГВ_к, в сравнении с ЦГВ_р, отличается более короткими сроками схватывания. Это может быть связано, во-первых, с тем, что исходный ЦГ_к обладает большей удельной поверхностью и содержит большее количество мелкодисперсной фракции, что обеспечивает повышенную реакционную способность ЦГВ_к при гидратации. Во-вторых, обжиг ЦГ_к при температуре 175 °С способствует термическому разложению и удалению остатков лимонной кислоты, которая в исходном состоянии способна оказывать ингибирующее действие на процесс гидратации цитрогипсового вяжущего.

Т а б л и ц а 6

Характеристики цитрогипсовых вяжущих в соответствии с ГОСТ

Вид ЦГВ	НГ	Сроки схватывания, мин:сек		Средняя плотность, кг/м ³		Предел прочности при сжатии, МПа	
		начало	конец	2 ч (влажный)	1 сут (сухой)	2 ч (влажный)	1 сут (сухой)
ЦГВ _р	80	15:30	25:15	1325	1066	2,36	4,5
ЦГВ _к	82	11:00	18:00	1235	1075	2,81	7,3

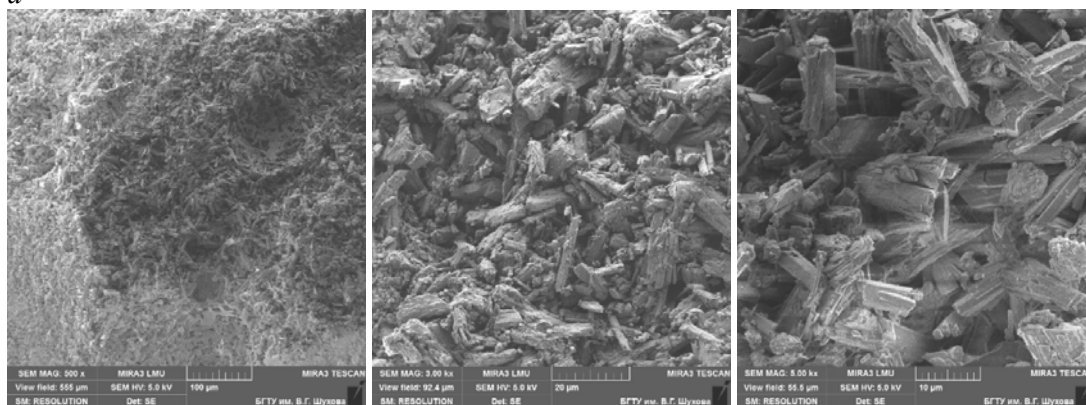
Повышенное количество воды затворения непосредственно отражается на средней плотности затвердевшего камня: через 2 часа после затворения плотность образцов на основе ЦГВ_к на 7,3 % ниже по сравнению с образцами ЦГВ_р. Однако в высушенном состоянии показатели средней плотности образцов ЦГВ_к становятся сопоставимыми (даже немного превышают) с показателями ЦГВ_р. Необходимо отметить, что предел прочности при сжатии у образцов ЦГВ_к как во влажном, так и в сухом состоянии выше, чем у образцов ЦГВ_р. При этом если во влажном состоянии превышение незначительное (≈0,5 МПа), то в сухом состоянии оно составляет 2,8 МПа (62 %).

Такие различия в пределах прочности при сжатии между исследуемыми цитрогипсовыми вяжущими, вероятнее всего, обусловлены различиями в морфологии новообразований. Для подтверждения данного предположения был проведен анализ микроструктуры затвердевших цитрогипсовых вяжущих с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 9), который показал, что ЦГВ_к отличается более плотной и упорядоченной системой кристаллических новообразований, представленных удлиненными пластинчатыми кристаллами дигидрата сульфата кальция, формирующими плотные переплетения и однонаправленные пучки (рис. 9, б). В то время как кри-

сталлы ЦГВ_р имеют более утолщённую структуру меньшей длины, что приводит к образованию менее плотной сетки новообразований (рис. 9, *а*).

Морфологические особенности новообразований ЦГВ_р (большая толщина и меньшая длина кристаллов) в совокупности с отсутствием упорядоченной структуры приводят к образованию слабых зон, что предопределяет снижение площади межкристаллических контактов и закономерно отрицательно сказывается на прочности цитрогипсового камня. Вероятными причинами образования таких кристаллов у ЦГВ_р может выступать наличие в их составе привнесённых в ходе длительного хранения примесей, которые могут осаждаться на поверхности кристаллов и влиять на их растворимость и рост в определенном направлении. В данном случае это требует дополнительных исследований, однако уже на данном этапе можно сделать вывод о том, что длительное хранение цитрогипса в отвалах отрицательно сказывается на свойстве цитрогипсовых вяжущих.

а



б

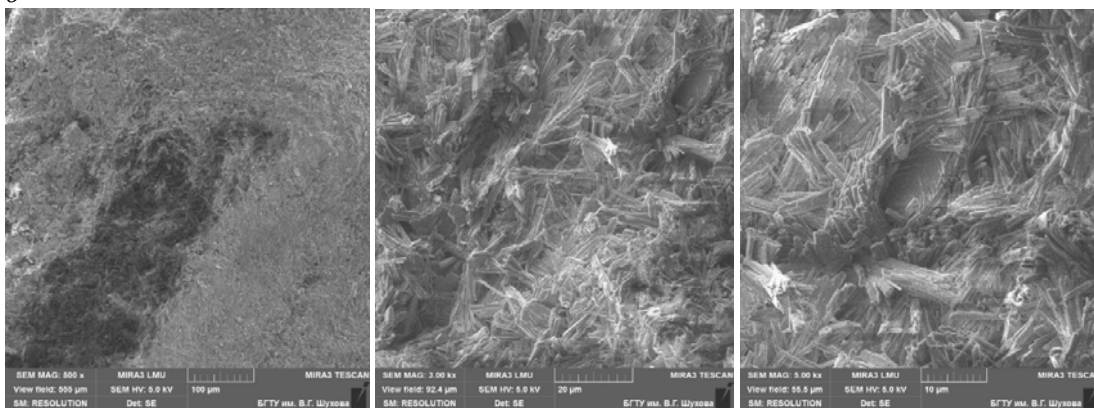


Рис. 9. Морфология новообразований затвердевших ЦГВ_р (*а*) и ЦГВ_к (*б*)

Выводы.

1. Исследуемые цитрогипсы, взятые из различных источников, характеризуются высокой схожестью базового химического состава (содержание основных оксидов (CaO и SO₃)) и первичных морфологических характеристик кристаллов (преобладание удлиненных пластинчатых кристаллов размером 10–100 мкм), что подтверждает гипотезу о стабильности базовых характеристик цитрогипсов независимо от производителя при использовании глубинной ферментации.

2. Длительное хранение ЦГ в отвалах оказывает определенное влияние на ряд его характеристик: снижает индекс кристалличности; приводит к формированию агломератов размером до 1000 мкм и сглаживанию краёв кристаллов; увеличивает содержание примесей (кремнезём, алюминий, железо, кальцит) за счёт атмосферного загрязнения; снижает удельную поверхность и изменяет пористую структуру; смещает pH в щелочную область из-за удаления остатков лимонной кислоты и привнесения примесей.

3. Затвердевшее цитрогипсовое вяжущее из «свежего» цитрогипса (ЦГ_к) характеризуется плотной и упорядоченной структурой новообразований, с максимальной площадью межкристаллических контактов, что проявляется в повышенной прочности камня по сравнению с цитрогипсовым вяжущим, полученным из цитрогипса, взятого из отвала (ЦГ_р).

Таким образом, накопление и длительное хранение цитрогипса в отвалах оказывает не только негативное влияние на экологическую обстановку регионов, но и потенциально снижает возможность переработки цитрогипса с получением вяжущего с хорошими физико-механическими характеристиками без применения дополнительных мероприятий (помол, использование модификаторов и т.д.). В условиях планируемого ввода новых мощностей по производству лимонной кислоты в России целесообразно рассмотреть возможность организации переработки цитрогипса в вяжущие материалы без длительного хранения в отвалах, что позволит снизить экологическую нагрузку и повысить эффективность использования данного сырья в строительной индустрии.

Список литературы

1. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials / Z.-Y. Jiang, X.-P. Sun, Y.-Q. Luo [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.13660 // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 432. – 136609.
2. Алфимова, Н.И. Обзорный анализ особенностей образования и перспектив использования гипсосодержащих отходов в качестве альтернативы природному гипсовому сырью / Н.И. Алфимова. – DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-20-35 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 11. – С. 20–35.
3. Характеристики шлакощелочного вяжущего с использованием комплексного активатора с гипсосодержащим отходом / Р.А. Глазков, Н.И. Кожухова, Л.Н. Боцман, И.В. Жерновская. – DOI 10.34031/2071-7318-2025-11-1-8-19 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2026. – № 1. – С. 8–19.
4. Глазков, Р.А. Влияние способа получения шлакощелочного вяжущего на его физико-механические характеристики / Р.А. Глазков, Н.И. Кожухова. – DOI: 10.54734/20722958_2025_2_68 // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2(63). – С. 68–76.
5. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide / E. Bilal, H. Bellefqih, V. Bourcier [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137561 // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 414. – 137561.
6. Левицкая, К.М. Использование фосфогипса как сырья для производства однокомпонентных вяжущих / К.М. Левицкая, Н.И. Алфимова, А.Ф. Бурьянов. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №1 (58). – С. 82–98.
7. Environmental impact and management of phosphogypsum / H. Tayibi, M. Choura, F.A. López [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007 // Journal of Environmental Management. – 2009. – Vol. 90(8). – P. 2377–2386.
8. Пурескина, О.А. Утилизация фторангидрита – отхода производства плавиковой кислоты с получением гранулированного гипса / О.А. Пурескина, В.И. Гашкова, С.Ф. Катышев // Экология промышленного производства. – 2008. – № 4. – С. 19–21.
9. Bazaldua-Medellin, M.E. Composite hydraulic binders based on fluorgypsum: Reactions, properties and sustainability / M.E. Bazaldua-Medellin, R.X. Magallanes-Rivera, J.I. Escalante Garcia. – DOI: 10.1016/j.jobte.2022.104590 // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 53. – 104590.
10. Модификация фторангидридовых вяжущих ультрадисперсным порошком диабазы / А.Ф. Димухаметова, Г.И. Яковлев, Г.Н. Первушин [и др.]. – DOI:

10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-57-64 // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2. – С. 57–64.

11. Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production / R. Boncukcuoğlu, M.T. Yılmaz, M.M. Kocakerim, V. Tosunoğlu. – DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00711-6 // Cement and Concrete Research. – 2002. – Vol. 32 (3). – P. 471–475.

12. Комплексная переработка отходов производства борной кислоты с получением материалов для стройиндустрии / П.С. Гордиенко, А.В. Козин, С.Б. Ярусова, И.Г. Згиблый // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S4–9. – С. 60–66.

13. Pirieva, S. Citrogyptum as a Raw Material for Gypsum Binder Production / S. Pirieva, N. Alfimova, K. Levickaya. – DOI: 10.4123/CUBS.100.7 // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2022. – Vol. 100. – 10007.

14. Overview of citric acid production from *Aspergillus niger* / P.L. Show, K.O. Oladele, Q.Y. Siew [et al.]. – DOI: 10.1080/21553769.2015.1033653// Frontiers in Life Science. – 2015. – Vol. 8(3). – P. 271–283.

15. Biotechnological production of citric acid / B. Max, J.M. Salgado, N. Rodríguez [et al.]. – DOI: 10.1590/S1517-83822010000400005// Brazilian Journal of Microbiology. – 2010. – Vol. 41. – P. 862–875.

16. Hossain, Md.S. Synthesis of nano-crystallite gypsum and bassanite from waste *Pila globosa* shells: crystallographic characterization / Md.S. Hossain, S. Ahmed. – DOI:10.1039/d2ra04881g // RSC Advances. – 2022. – Vol. 12. – P. 25096–25105.

References

1. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials / Z.-Y. Jiang, X.-P. Sun, Y.-Q. Luo [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.13660 // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 432. – 136609.

2. Alfimova, N.I. Review analysis of formation features and prospects for using gypsum-containing waste as an alternative to natural gypsum raw materials / N.I. Alfimova. – DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-20-35 // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2025. – No. 11. – P. 20–35.

3. Characteristics of slag-alkaline binder using a complex activator with gypsum-containing waste / R.A. Glazkov, N.I. Kozhukhova, L.N. Botsman, I.V. Zhernovskaya. – DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-8-19// Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2026. – No. 1. – P. 8–19.

4. Glazkov, R.A. Influence of the production method of slag-alkaline binder on its physico-mechanical characteristics / R.A. Glazkov, N.I. Kozhukhova. – DOI: 10.54734/20722958_2025_2_68// Regional Architecture and Construction. – 2025. – No. 2(63). – P. 68–76.

5. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide / E. Bilal, H. Bellefqih, V. Bourcier [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137561 // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 414. – 137561.

6. Levitskaya, K.M. Use of phosphogypsum as raw material for production of single-component binders / K.M. Levitskaya, N.I. Alfimova, A.F. Bur'yanov. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_82 // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – No. 1(58). – P. 82–98.

7. Environmental impact and management of phosphogypsum / H. Tayibi, M. Choura, F.A. López [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007 // Journal of Environmental Management. – 2009. – Vol. 90(8). – P. 2377–2386.

8. Pureskina, O.A. Utilization of fluoranhydrite – a waste product of hydrofluoric acid production – to obtain granulated gypsum / O.A. Pureskina, V.I. Gashkova, S.F. Katyshev // Ecology of Industrial Production. – 2008. – No. 4. – P. 19–21.

9. Bazaldua-Medellin, M.E. Composite hydraulic binders based on fluorgypsum: Reactions, properties and sustainability / M.E. Bazaldua-Medellin, R.X. Magallanes-Rivera, J.I. Escalante Garcia. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104590 // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 53. – 104590.
10. Modification of fluoranhydrite binders with ultrafine diabase powder / A.F. Dimukhametova, G.I. Yakovlev, G.N. Pervushin [et al.]. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-57-64 // Building Materials. – 2022. – No. 1–2. – P. 57–64.
11. Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production / R. Boncukcuoğlu, M.T. Yılmaz, M.M. Kocakerim, V. Tosunoğlu. – DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00711-6 // Cement and Concrete Research. – 2002. – Vol. 32 (3). – P. 471–475.
12. Integrated processing of boric acid production waste to obtain materials for the construction industry / P.S. Gordienko, A.V. Kozin, S.B. Yarosova, I.G. Zgibly // Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2014. – No. S4-9. – P. 60–66.
13. Pirieva, S. Citrogypsum as a Raw Material for Gypsum Binder Production / S. Pirieva, N. Alfimova, K. Levickaya. – DOI: 10.4123/CUBS.100.7 // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2022. – Vol. 100. – 10007.
14. Overview of citric acid production from *Aspergillus niger* / P.L. Show, K.O. Oladele, Q.Y. Siew [et al.]. – DOI: 10.1080/21553769.2015.1033653 // Frontiers in Life Science. – 2015. – Vol. 8(3). – P. 271–283.
15. Biotechnological production of citric acid / B. Max, J.M. Salgado, N. Rodríguez [et al.]. – DOI: 10.1590/S1517-83822010000400005 // Brazilian Journal of Microbiology. – 2010. – Vol. 41. – P. 862–875.
16. Hossain, Md.S. Synthesis of nano-crystallite gypsum and bassanite from waste *Pila globosa* shells: crystallographic characterization / Md.S. Hossain, S. Ahmed. – DOI:10.1039/d2ra04881g // RSC Advances. – 2022. – Vol. 12. – P. 25096–25105.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.072.2

DOI 10.54734/20722958_2026_3_65

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Бакушев Сергей Васильевич,

доктор технических наук, профессор

кафедры «Механика»

E-mail: bakuchsv@mail.ru

Баронин Сергей Александрович,

доктор экономических наук, профессор

кафедры «Экспертиза и управление
недвижимостью»

E-mail: baron60@inbox.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Bakushev Sergey Vasilyevich,

Doctor of Sciences, Professor of the

Department «Mechanics»

E-mail: bakuchsv@mail.ru

Baronin Sergey Alexandrovich,

Doctor of Economics, Professor of the

Department «Real Estate Expertise and
Management»

E-mail: baron60@inbox.ru

РАСЧЁТ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ УПРУГИХ ИЗГИБАЕМЫХ БАЛОК ИЗ УСЛОВИЯ ЖЁСТКОСТИ

С.В. Бакушев, С.А. Баронин

Рассматриваются вопросы расчёта многослойных неоднородных упругих изгибаемых балок из условия жёсткости. Гипотеза плоских сечений и гипотеза о ненадавливании продольных волокон для многослойной неоднородной упругой балки остаются справедливыми. Перемещения считаются малыми. Сдвиги между слоями балки отсутствуют. Слои балки предполагаются параллельными оси стержня и одной из главных плоскостей инерции поперечного сечения (горизонтальной). Показано, что определение перемещений в многослойной неоднородной упругой балке как с использованием дифференциального уравнения изогнутой оси балки, так и методом начальных параметров следует выполнять через приведённую жёсткость, включающую как модули упругости материала слоёв балки, так и осевые моменты инерции площадей поперечных сечений слоёв относительно нейтральной оси. Нейтральная ось многослойной неоднородной упругой балки определяется из условия равенства нулю продольной силы и не совпадает, вообще говоря, с центром тяжести поперечного сечения балки. Результаты данной работы могут быть использованы при оценке жёсткости многослойных неоднородных упругих балок.

Ключевые слова: неоднородные балки, упругость, многослойность, неоднородность, перемещения

CALCULATION OF MULTILAYER NON-HOMOGENEOUS ELASTIC BEAMS FROM STIFFNESS CONDITION

S.V. Bakushev, S.A. Baronin

The problems of calculating multilayer non-homogeneous elastic bending beams from the stiffness condition are considered. The hypothesis of plane sections and the hypothesis of non-pressure of longitudinal fibers for a multilayer inhomogeneous elastic beam remains valid. Displacements are considered small. There are no shifts between the beam layers. The layers of the beam are assumed to be parallel to the axis of the member and one of the main planes of inertia of the cross-section (horizontal). It is shown that the determination of displacements in a multilayer inhomogeneous elastic beam both using the differential equations of the curved axis of the beam and the method of initial parameters should be carried out through the reduced stiffness, which includes both the modulus of elasticity of the material of the beam layers and the axial moments of inertia of the cross-sectional areas of the layers relative to the neutral axis. The neutral axis of a multilayer inhomogeneous elastic beam is determined from the condition of equal to zero of the longitudinal force and does not coincide, generally speaking, with the center of gravity of the cross-section of the beam. The results of this work can be used to assess the stiffness of multilayer heterogeneous elastic beams.

Keywords: non-homogeneous beams, elasticity, multilayering, heterogeneity, displacements

Введение. Рассматривая вопросы расчёта неоднородных многослойных упругих балок, находящихся в условиях плоского поперечного изгиба, нельзя не коснуться вопросов их расчёта из условия жёсткости, что, безусловно, влечёт за собой исследование вопросов определения перемещений их центральных осей. Как известно, для однородных балок определение перемещений их осей выполняется различными методами [1, 2]: методом непосредственного интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки, методом начальных параметров, методом Мора и так далее. Что касается неоднородных многослойных упругих балок, то определение перемещений методом непосредственного интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки рассмотрено в [3]. Вопросам оценки прочности и жёсткости многослойных изгибаемых элементов строительных конструкций посвящены многие работы отечественных исследователей [4–12].

В данной работе для определения перемещений изогнутой оси многослойной неоднородной упругой балки используется как метод непосредственного интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси, так и метод начальных параметров. При этом предполагается, что гипотеза плоских сечений и гипотеза о ненадавливании продольных волокон для многослойной неоднородной упругой балки остаются справедливыми. Перемещения считаются малыми. Сдвиги между слоями балки отсутствуют. Слои стержня предполагаются параллельными оси стержня и одной из главных плоскостей инерции поперечного сечения (горизонтальной).

Теоретические основы. Рассмотрим многослойную неоднородную упругую балку, состоящую из n разнородных слоёв, из которых k слоёв находятся в сжатой зоне, а m слоёв – в растянутой зоне поперечного сечения, так что $k + m + 1 = n$ (предполагается, что один из средних слоев с номером нуль делится нейтральной линией на две части). Каждый i -й слой балки характеризуется своими размерами поперечного сечения и своим значением модуля упругости E_i . На рис.1 показано поперечное сечение пятислойной балки.

Метод непосредственного интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси многослойной неоднородной упругой балки для определения её прогибов рассмотрен в работе [3]. При этом получено дифференциальное уравнение изогнутой оси многослойной балки:

$$\frac{d^2 v(z)}{dz^2} = \frac{M_x(z)}{EI}. \quad (1)$$

Здесь

$$EI = E_k^{(-)} I_x^{(k)(-)} + E_{k-1}^{(-)} I_x^{(k-1)(-)} + \dots + E_1^{(-)} I_x^{(1)(-)} + E_0 I_x^{(0)(-)} +$$

$$+E_0 I_x^{(0)(+)} + E_1^{(+)} I_x^{(1)(+)} + E_2^{(+)} I_x^{(2)(+)} + \dots + E_m^{(+)} I_x^{(m)(+)} , \quad (2)$$

причём $E_i^{(-)}$ – модуль упругости материала i -го слоя балки, расположенного в сжатой зоне поперечного сечения, $i = 1, 2, \dots, k$; $E_i^{(+)}$ – модуль упругости материала i -го слоя балки, расположенного в растянутой зоне поперечного сечения, $i = 1, 2, \dots, m$; $I_x^{(i)(-)}$ – момент инерции площади поперечного сечения относительно нейтральной оси X i -го слоя балки, расположенного в сжатой зоне поперечного сечения, $i = 1, 2, \dots, k$; $I_x^{(i)(+)}$ – момент инерции площади поперечного сечения относительно нейтральной оси X i -го слоя балки, расположенного в растянутой зоне поперечного сечения, $i = 1, 2, \dots, m$.

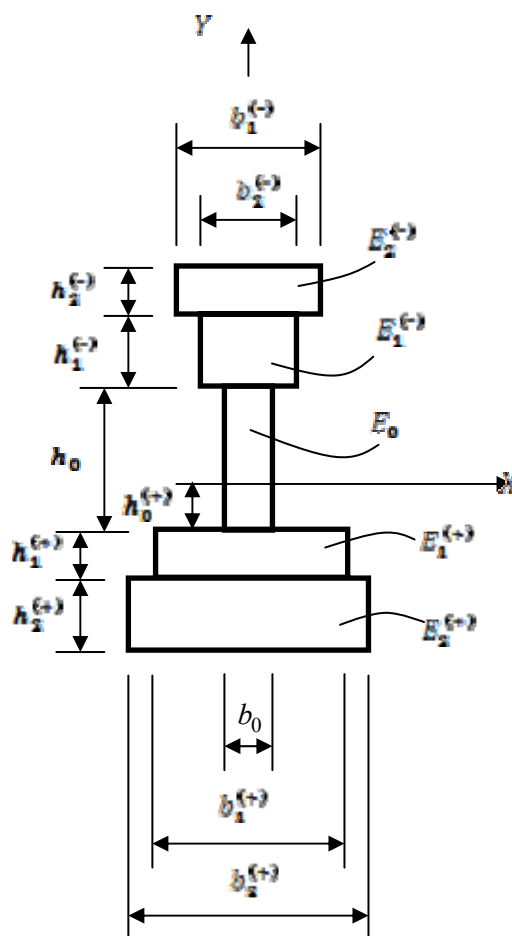


Рис. 1. Поперечное сечение многослойной балки

Величину EI можно назвать приведённой изгибной жёсткостью многослойной неоднородной упругой балки.

Положение нейтральной линии в поперечном сечении определяется величиной $h_0^{(+)}$ и может быть найдено из условия, что при изгибе продольная сила равна нулю:

$$\begin{aligned} & -E_k^{(-)} S_x^{(k)(-)} - E_{k-1}^{(-)} S_x^{(k-1)(-)} - \dots - E_0 S_x^{(0)(-)} + \\ & + E_0 S_x^{(0)(+)} + \dots + E_{m-1}^{(+)} S_x^{(m-1)(+)} + E_m^{(+)} S_x^{(m)(+)} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $S_x^{(i)(-)}$ – статический момент площади поперечного сечения относительно нейтральной оси X i -го слоя балки, расположенного в сжатой зоне поперечного сечения, $i = 1, 2, \dots, k$; $S_x^{(i)(+)}$ – статический момент площади поперечного сечения относительно нейтральной оси X i -го слоя балки, расположенного в растянутой зоне поперечного сечения, $i = 1, 2, \dots, m$.

Интегрируя дифференциальное уравнение (1) совместно с краевыми (граничными) условиями, можно найти уравнение изогнутой оси многослойной неоднородной упругой балки.

Метод непосредственного интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки при определении её прогибов имеет известные недостатки, сохраняющиеся и для неоднородных многослойных балок. Свободным от этих недостатков является метод начальных параметров. Рассмотрим *метод начальных параметров для многослойных неоднородных балок*.

Поскольку дифференциальные зависимости между внутренними усилиями в изгибаемом стержне [1, 2]

$$\frac{dM_x}{dz} = Q_y; \quad \frac{dQ_y}{dz} = q; \quad \frac{d^2 M_x}{dz^2} = q \quad (4)$$

не зависят от материала балки, то они остаются справедливыми и для многослойных неоднородных балок. Кроме того, так как приведённая жёсткость $EI = \text{const}$, то зависимости (4) и формулу (1) для многослойной неоднородной балки с учётом малости перемещений оси балки $\frac{dv}{dz} = \varphi$ и без учёта деформаций сдвига можно привести к виду:

$$\frac{dv(z)}{dz} = \varphi(z); \quad \frac{d^2 v(z)}{dz^2} = \frac{M_x(z)}{EI}; \quad \frac{d^3 v(z)}{dz^3} = \frac{Q_y(z)}{EI}; \quad \frac{d^4 v(z)}{dz^4} = \frac{q(z)}{EI}. \quad (5)$$

Далее, повторяя рассуждения, приведённые в книге А.В. Александрова [1], запишем универсальную формулу для определения прогибов и углов поворота поперечных сечений при изгибе многослойного неоднородного стержня, находящегося в условиях плоского поперечного изгиба.

$$\begin{aligned} v_n = & v_0 + \varphi_0 z + \frac{M_0}{EI} \frac{z^2}{2!} + \frac{Q_0}{EI} \frac{z^3}{3!} + \frac{q_0}{EI} \frac{z^4}{4!} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta v_i + \dots \\ & \dots + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta \varphi_i (z - a_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta M_i (z - a_i)^2}{EI \cdot 2!} + \\ & + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta Q_i (z - a_i)^3}{EI \cdot 3!} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta q_i (z - a_i)^4}{EI \cdot 4!} + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь v_0 , φ_0 , M_0 , Q_0 , q_0 , ... – прогиб, угол поворота, изгибающий момент, поперечная сила, интенсивность распределённой нагрузки в начальном (крайнем левом) сечении стержня; Δv_i , $\Delta \varphi_i$, ΔM_i , ΔQ_i , Δq_i , ... – приращение прогиба, угла поворота, изгибающего момента, поперечной силы, интенсивности распределённой нагрузки в начале каждого i -го участка стержня; a_i – координата начала каждого i -го участка стержня.

Универсальное уравнение для углов поворота поперечных сечений:

$$\varphi_n = \frac{dv_n}{dz} = \varphi_0 + \frac{M_0}{EI} z + \frac{Q_0}{EI} \frac{z^2}{2!} + \frac{q_0}{EI} \frac{z^3}{3!} + \frac{q'_0}{EI} \frac{z^4}{4!} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta \varphi_i + \dots$$

$$\dots + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta M_i}{EI_x} (z - a_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta Q_i}{EI} \frac{(z - a_i)^2}{2!} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta q_i}{EI} \frac{(z - a_i)^3}{3!} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta q'_0}{EI} \frac{(z - a_i)^4}{4!} + \dots \quad (7)$$

Входящие в универсальные уравнения прогибов и углов поворота неизвестные параметры v_0 , φ_0 , M_0 , Q_0 , q_0 определяются либо из краевых условий, в частности из условий на опорах, либо часть из них заранее известна. Приращение прогиба, угла поворота, изгибающего момента, поперечной силы, интенсивности распределённой нагрузки в начале каждого i -го участка стержня – Δv_i , $\Delta \varphi_i$, ΔM_i , ΔQ_i , Δq_i – определяются исходя из вида эпюр внутренних усилий и вида внешней нагрузки, действующей на стержень, путём вычисления разности соответствующих значений, взятых непосредственно справа и слева от начала каждого участка.

При использовании в расчётах универсальных уравнений прогибов и углов поворота, представленных выше, следует соблюдать следующее правило знаков: начало координат должно располагаться на оси балки на левом конце стержня, ось OZ направляется вправо, ось OY – вверх; внешние сосредоточенные силы и распределённые нагрузки считаются положительными, если они направлены вверх; внешние изгибающие моменты считаются положительными, если они действуют по ходу часовой стрелки.

Пример расчёта. Рассмотрим неоднородную упругую балку на двух опорах длиной $l = 3$ м, нагруженную в середине пролёта сосредоточенной силой $F = 10$ кН (рис. 2, а).

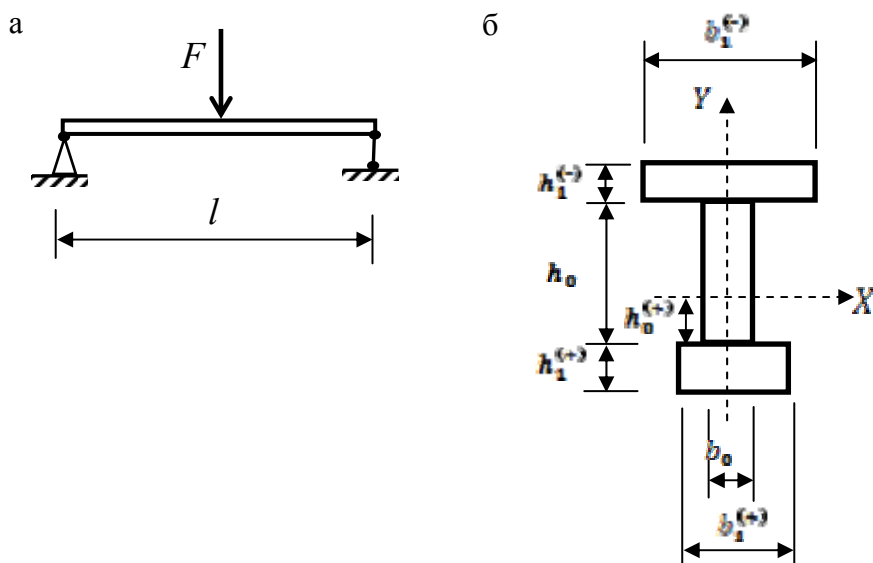


Рис. 2. Балка на двух опорах:
а – схема балки; б – поперечное сечение

Поперечное сечение балки (рис. 2, б) представляет собой неравнополочный двутавр, причём нижняя полка выполнена из стали ($E_1^{(+)} = 205000$ МПа), верхняя полка – из меди ($E_0 = 130000$ МПа), стенка – из алюминия ($E_1^{(-)} = 69000$ МПа). Размеры поперечного сечения:

$$b_1^{(+)} \times h_1^{(+)} = 6 \times 1,4 (\text{см}),$$

$$b_0 \times h_0 = 1 \times 10 (\text{см}),$$

$$b_1^{(-)} \times h_1^{(-)} = 3 \times 1,2 (\text{см}).$$

Определяем положение нейтральной оси поперечного сечения балки.

Предположим, что нейтральная ось делит стенку двутавра на две части и проходит на расстоянии $h_0^{(+)}$ от нижнего края стенки. Тогда статические моменты площадей поперечных сечений слоёв относительно нейтральной оси X будут равны:

$$S_x^{(1)(+)} = b_1^{(+)} h_1^{(+)} \left(\frac{h_1^{(+)}}{2} + h_0^{(+)} \right); \quad S_x^{(0)(+)} = b_0 h_0^{(+)} \frac{h_0^{(+)}}{2};$$

$$S_x^{(0)(-)} = b_0 (h_0 - h_0^{(+)}) \frac{h_0 - h_0^{(+)}}{2}; \quad S_x^{(1)(-)} = b_1^{(-)} h_1^{(-)} \left(\frac{h_1^{(-)}}{2} + h_0 - h_0^{(+)} \right).$$

Уравнение (3) получает вид:

$$-E_1^{(-)} b_1^{(-)} h_1^{(-)} \left(\frac{h_1^{(-)}}{2} + h_0 - h_0^{(+)} \right) - E_0 b_0 (h_0 - h_0^{(+)}) \frac{h_0 - h_0^{(+)}}{2} +$$

$$+ E_0 b_0 h_0^{(+)} \frac{h_0^{(+)}}{2} + E_1^{(+)} b_1^{(+)} h_1^{(+)} \left(\frac{h_1^{(+)}}{2} + h_0^{(+)} \right) = 0.$$

Отсюда
$$h_0^{(+)} = \frac{S_{np}}{A_{np}} = 2,42 \text{ см},$$

где

$$S_{np} = E_1^{(-)} b_1^{(-)} h_1^{(-)} \left(\frac{h_1^{(-)}}{2} + h_0 \right) + E_0 b_0 h_0 \frac{h_0}{2} - E_1^{(+)} b_1^{(+)} h_1^{(+)} \frac{h_1^{(+)}}{2} = 792764,0 \text{ кН} \cdot \text{см};$$

$$A_{np} = E_1^{(-)} b_1^{(-)} h_1^{(-)} + E_0 b_0 h_0 \frac{1}{2} + E_0 b_0 \frac{h_0}{2} + E_1^{(+)} b_1^{(+)} h_1^{(+)} = 327040,0 \text{ кН}.$$

Вычисляем моменты инерции в формуле (2):

$$I_x^{(1)(+)} = \frac{b_1^{(+)} h_1^{(+)^3}{12} + b_1^{(+)} h_1^{(+)} \left[\frac{h_1^{(+)}}{2} + h_0^{(+)} \right]^2 = 83,354 \text{ см}^4;$$

$$I_x^{(0)(+)} = \frac{b_0 h_0^{(+)^3}{12} + b_0 h_0^{(+)} \left[\frac{h_0^{(+)}}{2} \right]^2 = 4,748 \text{ см}^4;$$

$$I_x^{(0)(-)} = \frac{b_0 [h_0 - h_0^{(+)}]^3}{12} + b_0 [h_0 - h_0^{(+)}] \frac{[h_0 - h_0^{(+)}]^2}{2} = 253,645 \text{ см}^4;$$

$$I_x^{(1)(-)} = \frac{b_1^{(-)} h_1^{(-)^3}{12} + b_1^{(-)} h_1^{(-)} \left[\frac{h_1^{(-)}}{2} + h_0 - h_0^{(+)} \right]^2 = 241,077 \text{ см}^4.$$

Находим приведённую жёсткость:

$$EI = E_1^{(-)} I_x^{(1)(-)} + E_0 I_x^{(0)(-)} + E_0 I_x^{(0)(+)} + E_1^{(+)} I_x^{(1)(+)} = 6731300,660 \text{ кН} \cdot \text{см}^2.$$

Краевая задача для дифференциального уравнения (1) рассматриваемой балки (см. рис. 2, а) имеет вид:

$$\frac{d^2 v(z)}{dz^2} = \frac{M_x(z)}{EI}, \quad v(0) = 0; \quad v(l) = 0.$$

Решение данной краевой задачи, как известно [2], имеет вид:

$$v_I(z_I) = \frac{Fz_I^3}{12EI} - \frac{Fl^2z_I}{16EI}; \text{ при этом } 0 \leq z_I \leq \frac{l}{2} \text{ (первый участок);}$$

$$v_{II}(z_{II}) = -\frac{Flz_{II}^2}{8EI} + \frac{Fz_{II}^3}{12EI} - \frac{Fl^3}{48EI}, \text{ где } 0 \leq z_{II} \leq \frac{l}{2} \text{ (второй участок).}$$

Решая данную задачу методом начальных параметров, получаем следующие выражения для перемещений оси стержня:

$$v_I(z) = \frac{Fz^3}{12EI} - \frac{Fl^2z}{16EI}; \text{ при этом } 0 \leq z \leq \frac{l}{2} \text{ (первый участок);}$$

$$v_{II}(z) = -\frac{Fz^3}{12EI} - \frac{3Fl^2z}{16EI} + \frac{Flz^2}{12EI} + \frac{Fl^3}{48EI}; \text{ где } \frac{l}{2} \leq z \leq l \text{ (второй участок).}$$

Кроме того, на первом участке $z = z_I$; на втором участке $z = \frac{l}{2} + z_{II}$.

Вычислив перемещение изогнутой оси под силой, получим:

– решение краевой задачи для изогнутой оси балки

$$v_{II}(z_{II} = 0) = -\frac{Fl^3}{48EI} = 0,836 \text{ см};$$

– решение задачи методом начальных параметров

$$v_I\left(z = \frac{l}{2}\right) = -\frac{Fl^3}{48EI} = 0,836 \text{ см}.$$

Таким образом, результаты расчётов совпадают.

Выводы.

1. Определение перемещений в многослойной неоднородной упругой балке как с использованием дифференциального уравнения изогнутой оси балки, так и методом начальных параметров следует выполнять через приведённую жёсткость, включающую как модули упругости материала слоёв балки, так и осевые моменты инерции площадей поперечных сечений слоёв относительно нейтральной оси.

2. Нейтральная ось многослойной неоднородной упругой балки определяется из условия равенства нулю продольной силы и не совпадает, вообще говоря, с центром тяжести поперечного сечения балки.

3. Результаты данной работы могут быть использованы при оценке жёсткости многослойных неоднородных упругих балок.

Список литературы

1. Александров, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – Москва : Высш. шк., 1995. – 560 с.: ил.
2. Сопротивление материалов / под редакцией А.Ф. Смирнова. – Москва : Высшая школа, 1975.
3. Бакушев, С.В. Прогибы в многослойных балках / С.В. Бакушев, Х.Р. Ахмедханов // Электронный журнал «Моделирование и механика конструкций». – 2025. – Вып. №22.
4. Болотин, В. Механика многослойных конструкций / В. Болотин. – Москва : Машиностроение, 1980. – 375 с.
5. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки / А.Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат, 1986. – 316 с.
6. Анарова, Ш.А. Современное состояние и постановка задачи исследования трёхслойных стержней / Ш.А. Анарова, Д.А. Шокиров, Ш.М. Исмоилов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2022. – № 4 (42). – С. 54–78.
7. Чепурненко, А.С. Применение метода конечных элементов в сочетании с методом контактного слоя для определения напряженно-деформированного состояния многослойных балок / А.С. Чепурненко, В.С. Тюрина // Вестник Пермского нацио-

нального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. – С. 130–139.

8. Кобелев, В. Расчёт трёхслойных конструкций / В. Кобелев. – Москва : Машиностроение, 1984. – 304 с.

9. Старовойтов, Э. Деформирование трехслойных физически нелинейных стержней / Э. Старовойтов. – Москва : Изд-во МАИ, 2016. – 184 с.

10. Филатов, В.В. Расчет многослойных балок, взаимодействующих с однопараметрическим упругим основанием / В.В. Филатов, Б.Ф. Кужин // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 11. – С. 604–608.

11. Андреев, В.И. Моделирование реальной системы «здание – фундамент – основание» двухслойной балкой переменной жесткости на упругом основании / В.И. Андреев, Е.В. Барменкова // Вестник МГСУ. – 2012. – №6. – С. 37–41.

12. Атаров, Н.М. Изгиб составной балки, расположенной на упругом основании / Н.М. Атаров, А.Н. Леонтьев, И.Г. Леонтьева // Вестник МГСУ. – 2011. – №4. – С. 212–216.

References

1. Aleksandrov, A.V. Resistance of Materials / A.V. Aleksandrov, V.D. Potapov, B.P. Derzhavin. – Moscow : Vyssh. Shk., 1995. – 560 p.: ill.

2. Strength of materials / Edited by A.F. Smirnov. – Moscow : Vysshaya shkola Publ., 1975.

3. Bakushev, S.V. Deflections in Multilayer Beams / S.V. Bakushev, Kh.R. Akhmedkhanov // Electronic journal «Modeling and Mechanics of Structures». – 2025. – Issue No22.

4. Bolotin, V. Mechanics of Multilayer Structures / V. Bolotin. – Moscow : Mechanical Engineering, 1980. – 375 p.

5. Rzhantsyn, A.R. Composite Rods and Plates / A.R. Rzhantsyn. – Moscow : Stroyizdat Publ., 1986. – 316 p.

6. Anarova, Sh.A. Current state and formulation of the problem of studying three-layer rods / Sh.A. Anarova, D.A. Shokirov, Sh.M. Ismoilov // Problems of Computational and Applied Mathematics. – 2022. – No. 4 (42). – P. 54–78.

7. Chepurnenko, A.S. Application of the finite element method in combination with the contact layer method for determining the stress-strain state of multilayer beams / A.S. Chepurnenko, V.S. Tyurina // Mechanics. – 2023. – № 4. – P. 130–139.

8. Kobelev, V. Calculation of Three-Layer Structures / V. Kobelev. – Moscow : Mechanical Engineering, 1984. – 304 p.

9. Starovoytov, E. Deformation of three-layer physically nonlinear rods / E. Starovoytov. – Moscow: MAI Publishing House, 2016. – 184 p.

10. Filatov, V.V. Calculation of multilayer beams interacting with a one-parameter elastic foundation / V.V. Filatov, B.F. Kuzhin // Innovations and Investments. – 2024. – № 11. – P. 604–608.

11. Andreev, V.I. Modeling of a real “building – foundation – base” system using a two-layer beam of variable stiffness on an elastic foundation / V.I. Andreev, E.V. Barmenkova // Bulletin of MGSU. – 2012. – №6. – P. 37–41.

12. Atarov, N.M. Bending of a composite beam located on an elastic foundation / N.M. Atarov, A.N. Leontyev, I.G. Leontyeva // Bulletin of MGSU. – 2011. – №4. – P. 212–216.

УДК 624.072.338.2

DOI 10.54734/20722958_2026_3_73

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Комаров Виктор Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: stroyconst@pguas.ru

Болдырева Ольга Вячеславовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: boov@yandex.ru

Болдырев Егор Сергеевич,
магистрант по направлению подготовки
08.04.01 «Строительство»
E-mail: egr-b@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Comarov Victor Aleksandrovich,
Candidate of sciences, Associate Professor,
Professor of the department «Building
Constructions»

E-mail: stroyconst@pguas.ru

Boldyreva Olga Vajcheslavovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building constructions»
E-mail: boov@yandex.ru

Egor Sergeevich Boldyrev,
Magister in Construction (08.04.01)
E-mail: egr-b@yandex.ru

ОПОРНЫЕ ЗОНЫ РИГЕЛЕЙ С ПОДРЕЗКОЙ ИЗ ФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОНА МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСОВ: ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

В.А. Комаров, О.В. Болдырева, Е.С. Болдырев

Приведены результаты экспериментальных исследований опорных зон ригелей из фиброжелезобетона. Установлено, что при хаотичном введении в бетонную матрицу композитной стеклопластиковой фибры длиной 40-45 мм, диаметром 0,7-0,9 мм увеличивается прочность сжатых бетонных полос. При оптимальном насыщении бетонной матрицы стеклопластиковой фиброй, равном 2,5 %, прочность при действии сжатия увеличивается на 41 % по сравнению с составом без фибры и на 13 % при насыщении фиброй бетонной матрицы 1,5 %. При оптимальном насыщении, равном 2,5 %, момент образования трещин сжатой бетонной полосы увеличивается в 2,1 раза, при этом ширина раскрытия трещин уменьшается в 1,6 раза по сравнению с бетонной матрицей без фибры. Экспериментально получены две схемы разрушения сжатых бетонных полос: при насыщении стеклопластиковой фиброй 1,5 % – от действия сжатия, при насыщении стеклопластиковой фиброй 2,5 % – от совместного действия сжатия и растяжения поперечной сосредоточенной арматурой.

Ключевые слова: многоэтажные каркасы, опорные зоны ригелей с подрезкой, фиброжелезобетон, композитная стеклопластиковая фибра, сжатые полосы, схемы разрушения

SUPPORT ZONES OF FIBER-REINFORCED CONCRETE BEAM BAR WITH UNDERCUTTING OF MULTI-STOREY FRAMEWORKS. FEATURES OF DEFORMATION, CRACKING, AND DESTRUCTION

V.A. Komarov, O.V. Boldyreva, E.S. Boldyrev

The results of experimental studies of the support zones of fiber-reinforced concrete beams are presented. It has been established that the introduction of composite fiberglass fibers with a length of 40-45 mm and a diameter of 0.7-0.9 mm into the concrete matrix increases the strength of compressed concrete strips. At the optimal saturation of the concrete matrix with fiberglass fiber equal to 2.5 %, the compressive strength increases by 41 % compared to the composition without fiber and by 13 %

at the saturation of the concrete matrix with fiber equal to 1.5 %. At the optimal saturation equal to 2.5 %, the cracking moment of the compressed concrete strip increases by 2.1 times, while the crack opening width decreases by 1.6 times compared to the concrete matrix without fiber. Two failure patterns of compressed concrete strips were obtained experimentally: when the glass fiber content was 1.5 %, the failure was caused by compression; when the glass fiber content was 2.5 %, the failure was caused by the combined effects of compression and tension from the transverse concentrated reinforcement.

Keywords: multi-story frames, support zones of beams with undercutting, fiber-reinforced concrete, composite fiberglass, compressed strips, failure patterns

Современное строительное производство требует новых конструктивных решений и конструктивных материалов, обладающих высокой надежностью, долговечностью и экономической целесообразностью.

Известно, что традиционный бетон и железобетон обладают таким недостатком, как низкая трещиностойкость. Понятие трещиностойкости, вязкости разрушения определяется способностью материала сопротивляться образованию и развитию трещин.

Развитие железобетонных конструкций возможно путем эффективного использования высокопрочных бетонов и высокопрочных сталей. Применение в обычных железобетонных конструкциях (без предварительного напряжения) высокопрочной арматуры малоэффективно из-за ограниченной предельной сжимаемости бетона и низкой трещиностойкости в растянутых зонах. С ростом прочности бетона снижается его способность к перераспределению усилий, повышается его хрупкость, что приводит к внезапному разрушению после появления трещин.

Одним из наиболее перспективных строительных материалов, обладающим особыми свойствами, является фибробетон. Основные преимущества фибробетона перед обычным бетоном: более высокая прочность на сжатие, растяжение, срез как при статических, так и при динамических воздействиях, повышенная морозостойкость, истираемость. Главные же преимущества фибробетона заключаются в его высокой предельной растяжимости и, как следствие, высокой трещиностойкости, а также повышенной предельной сжимаемости, обусловивших высокую вязкость разрушения [1, 2].

Упрочнение волокнами основывается на предположении, что материал бетонной матрицы передает волокнам нагрузку посредством касательных сил, действующих на поверхности раздела, и если модуль волокна больше модуля упругой матрицы, то основную долю приложенных напряжений воспринимают волокна.

Кроме эффекта стеснения деформаций имеет место качественный скачок в свойствах бетона. Он происходит тогда, когда зоны влияния армирующих волокон начинают взаимно накладываться, бетон становится «пластичным по всей толщине». При этом трещины до весьма значительного уровня напряжений малы.

Располагаясь в объеме бетона хаотично, фибры улучшают структуру матрицы, блокируют проявление дефектности матрицы. Фибры, в отличие от арматуры в железобетоне, действуют на бетонную матрицу на гораздо большем объеме, затрудняя развитие в ней трещин и, как следствие, композиционный материал – бетон, армированный фиброй, приобретает улучшенные показатели качества и не требует при этом значительного повышения трудовых, энергетических и материальных ресурсов на свое производство и эксплуатацию [3, 4].

Из неметаллической фибры, используемой при производстве бетонных и железобетонных конструкций и широко представленной на рынке, наибольшую эффективность имеет композитная стеклопластиковая фибра [5, 6]. Ее применение при оптимальных дозировках позволяет получать фибробетоны с фактическим классом по остаточной прочности в пределах до 50 % от фактического класса по прочности на растяжение при изгибе. Композитная фибра имеет меньшую эффективность по сравнению со стальной в связи с ее низким модулем упругости и низкой адгезией к бетону [7], но обладает рядом значительных преимуществ, позволяющих найти ей принципиально новое применение при производстве изделий и конструкций.

Армирование композитной стеклопластиковой фиброй является выгодным в конструкциях, в которых существует опасность электрохимической коррозии, в диэлектрических конструкциях или в конструкциях, обладающих антимагнитными свойствами.

Совершенствование отдельных элементов зданий – общепризнанная тенденция, продиктованная необходимостью повышения эксплуатационной надежности.

Ригели с консольными опорами (подрезками) являются типовыми конструкциями промышленных многоэтажных сборных каркасов серий ИИ-04, 1.020. Узлы сопряжения ригелей с колоннами в несущей системе обеспечивают безопасность здания в целом. Ригели в составе сборных каркасов имеют разное напряженно-деформированное состояние как по высоте сечения, так и по длине элемента. Эксплуатационная надежность ригелей оценивается по сечениям с наименьшей прочностью, в связи с этим целесообразно использовать фибровое армирование, тем самым усиливая сжатую или растянутую зону сечения.

Результаты экспериментально-теоретических исследований позволяют считать, что прочность узлового соединения следует определять на основе схемы разрушения опорной консоли ригеля, которая представляет собой разрушение наклонной сжатой полосы бетона.

Проведены экспериментальные исследования влияния дисперсного армирования на прочность и напряженно-деформированное состояние сжатых бетонных полос над опорной площадкой короткой консоли ригеля по направлению жестких узлов сопряжения сосредоточенной поперечной арматуры A_{sw1} с продольной арматурой ригеля A'_s , а также к грузовым площадкам при пролетах среза $a = 1,5h_{01}$, где h_{01} – рабочая высота консоли ригеля, a – расстояние от оси опоры до линии действия силы.

Для разработки программы приняты консольные опоры типовых ригелей с подрезкой, которые ранее исследовались. В программу испытаний включены опытные образцы с различным содержанием фибры (рубленого щелочестойкого стекловолокна) и различным армированием замкнутыми сосредоточенными поперечными хомутами A_{sw1} за подрезкой (одиночные сосредоточенные хомуты и пакет из двух сосредоточенных хомутов). Опытные образцы изготовлены одной серии. В испытанных образцах замкнутые вертикальные хомуты принимались в виде пакета $\emptyset 20A400 + \emptyset 14A400$. Длина пакета $l'_{sup,v}$ сосредоточенной поперечной арматуры A_{sw1} составила 68 мм (горизонтальные участки [-образных стержней A_{sw1} сваривались между собой). Пролет среза принимался $a = 1,5h_{01}$. Проектный класс бетона принят В15. Фибровое армирование опорной зоны ригелей осуществлялось стеклопластиковой композитной фиброй длиной 40-45 мм, диаметром 0,7...0,9 мм с геометрическим фактором 45-60, плотностью 1,54 г/см³ и модулем упругости порядка 50 ГПа.

Технология приготовления фибробетона включала в себя равномерное распределение фибры и бетонной смеси. Конструктивное решение и схема приложения нагрузки приведены на рис. 1.

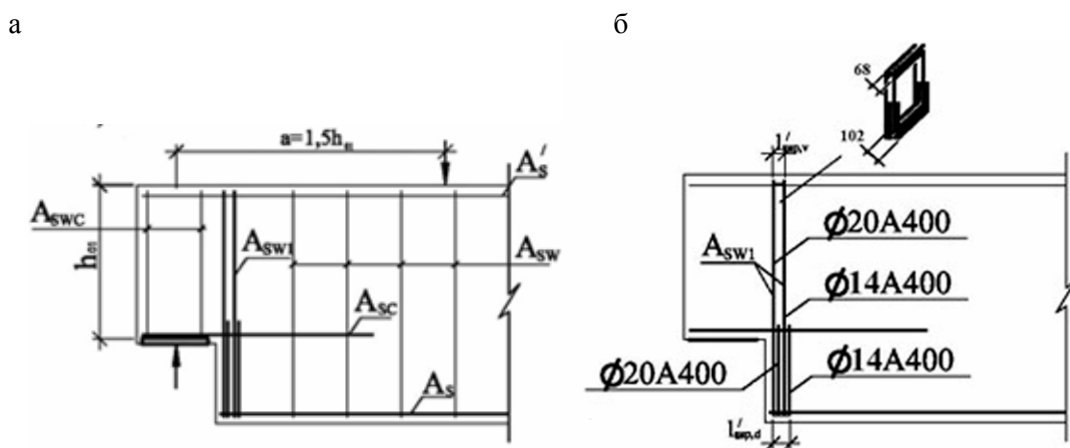


Рис. 1. Схема приложения нагрузки и конструктивное решение опытных образцов:
а – образцы марок БФ1-1-БФ1-3; б – конструктивное решение A_{sw1} марок БФ1-1-БФ1-3

Образцы (ригели) рассматриваемой серии имели различное насыщение фиброй из щелочестойкого стекловолокна: 0 % – БФ1-1; 1,5 % – БФ2-1; 2,5 % – БФ1-3. Образец БФ1-1 выполнен из обычного бетона (нулевой образец). Для всех образцов продольная арматура консольной опоры принималась 2 $\emptyset$ 20A400, поперечная арматура – 2 $\emptyset$ 8A400

с шагом 150 мм. Фактический класс бетона в образцах составил: БФ1-1 – 16 МПа; бетонной матрицы, армированной фиброй БФ1-2, – 19 МПа; БФ1-3 – 23 МПа [8].

Испытания образцов проводились на лабораторном комплексе для автоматизированных испытаний элементов строительных конструкций. Нагружение осуществлялось поэтапно нагрузкой, составляющей 10 % от предполагаемой разрушающей нагрузки. Во всех испытаниях измерялись прогибы индикаторами часового типа ИЧ-10 с точностью 0,01 мм. Проводилось визуальное наблюдение за появлением и развитием трещин. Ширина раскрытия трещин в бетоне измерялась трубкой Бринелля с точностью 0,1 мм.

В ходе экспериментальных исследований получены схемы разрушения бетона и схемы разрушения бетонной матрицы, армированной стеклопластиковой фиброй в сжатых полосах короткой консоли ригеля, расположенных между опорной и «условной» грузовой площадками при пролетах среза $a=0,6h_{01}$ и физическими грузовыми и опорными площадками с пролетами среза $a=1,5h_{01}$ [9, 10].

В образце БФ1-1 (нулевой образец) формирование сжатой бетонной полосы происходит при значении поперечной силы 0,3 от разрушающей (равной 219 кН) над опорной площадкой в направлении центра тяжести верхней «условной» грузовой площадки, образованной узлом пересечения сосредоточенной поперечной арматуры с продольной арматурой ригеля. При значении поперечной силы 0,6 от разрушающей наблюдаются образование и развитие наклонных трещин, пересекающих сосредоточенные хомуты по направлению к физической грузовой площадке. При дальнейшем увеличении поперечной силы развитие наклонных трещин происходит по направлению «условной» грузовой площадки вдоль сосредоточенного хомута с последующим раздроблением бетона внутри сжатой наклонной полосы.

Экспериментально получена схема разрушения сжатой бетонной полосы от совместного действия сжатия вдоль полосы и растяжения поперек полосы сосредоточенной поперечной арматурой между наклонными трещинами. Образование и развитие трещин образца БФ1-1 и схема разрушения показаны на рис. 2.

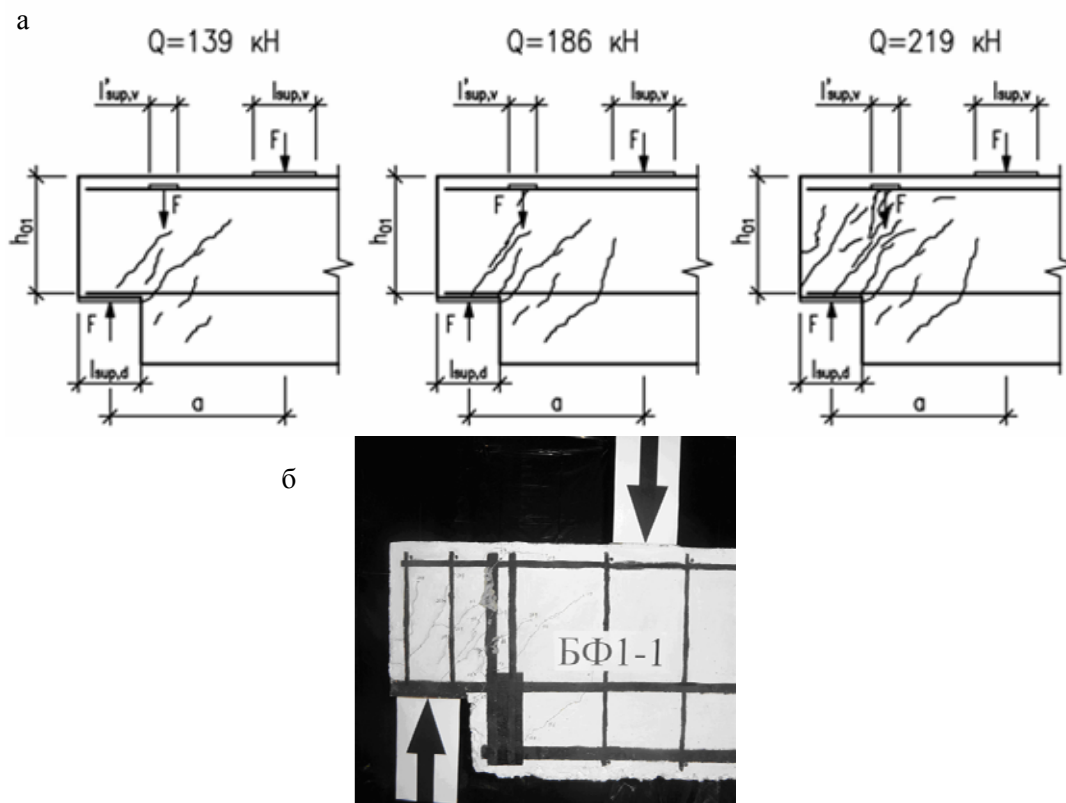


Рис. 2. Разрушение образца БФ1-1:

а – поэтапное образование трещин; б – схема разрушения сжатой бетонной полосы

В образце БФ1-2 (бетонная матрица с насыщением фибры 1,5 %) формирование сжатой бетонной полосы происходит при значении поперечной силы 0,35 от разрушающей (равной 270 кН) над опорной площадкой по направлению к «условной» грузовой площадке. При значении поперечной силы 0,5 от разрушающей образуются граничные наклонные трещины над опорной площадкой, выделяющие сжатую бетонную полосу. При дальнейшем увеличении поперечной силы наблюдаются развитие и раскрытие наклонных трещин внутри сжатой наклонной полосы. Схема разрушения сжатой бетонной полосы от действия сжатия между «условной» грузовой и опорной площадками показана на рис. 3.

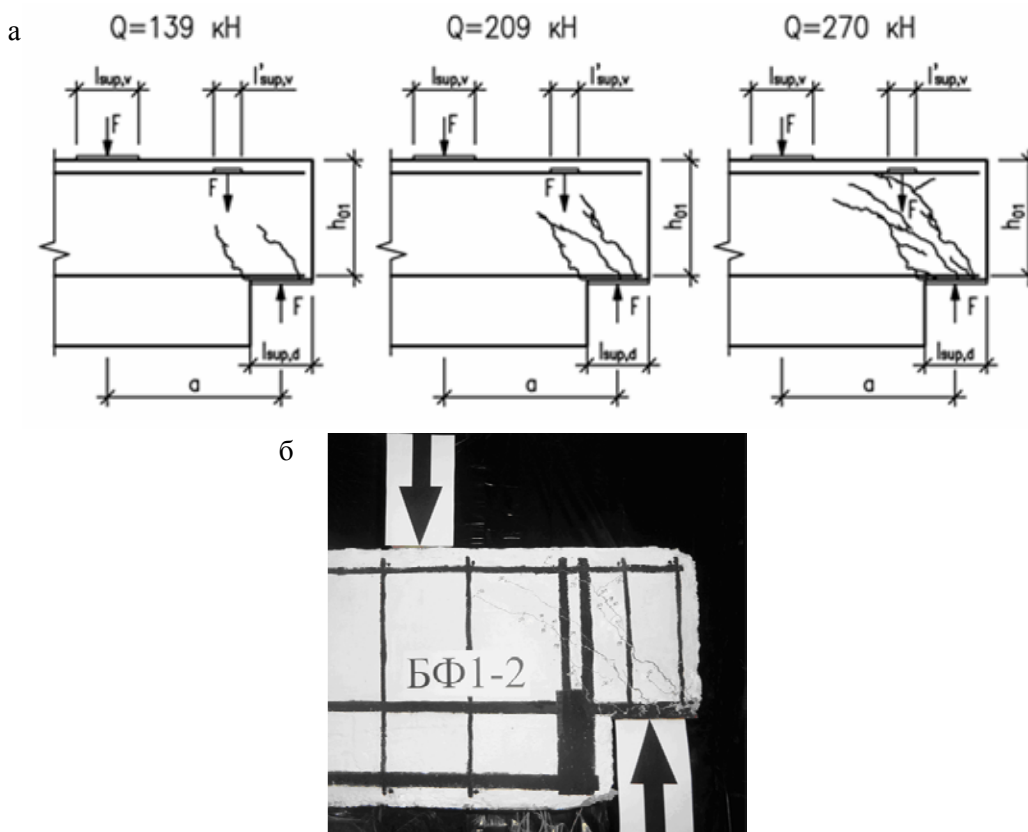


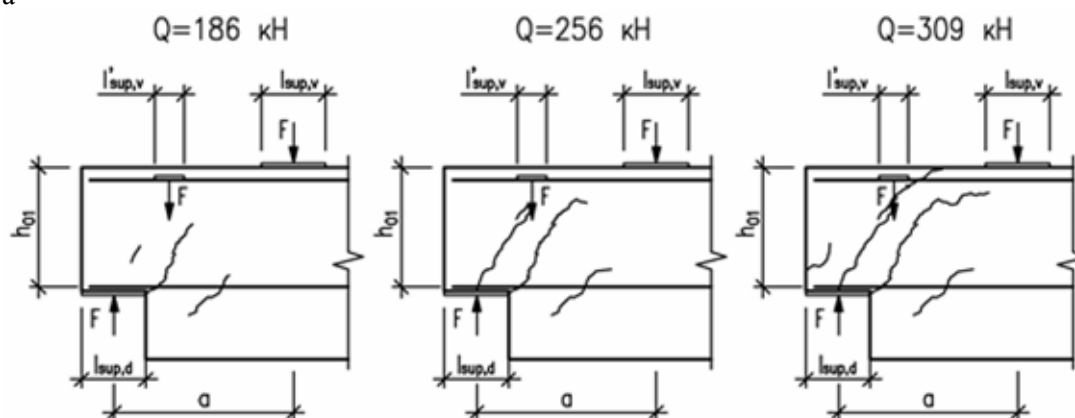
Рис. 3. Разрушение образца БФ1-2:

а – поэтапное образование трещин; б – схема разрушения сжатой бетонной полосы

В образце БФ1-3 (бетонная матрица с насыщением фибры 2,5 %) формирование сжатой бетонной полосы происходит при значении поперечной силы 0,45 от разрушающей (равной 309 кН) над опорной площадкой короткой консоли ригеля по направлению к физической грузовой площадке. При значении поперечной силы 0,5 от разрушающей наблюдаются образование и развитие граничных трещин, выделяющих сжатую бетонную полосу.

При дальнейшем увеличении поперечной силы до 0,7 от разрушающей внутри сжатой бетонной полосы образуются наклонные трещины, пересекающие сосредоточенные поперечные хомуты, с последующим раздавливанием бетона внутри сжатой полосы. Схема разрушения сжатой бетонной полосы от совместного действия сжатия вдоль полосы и растяжения поперек полосы сосредоточенной поперечной арматурой между наклонными трещинами показана на рис. 4.

а



б

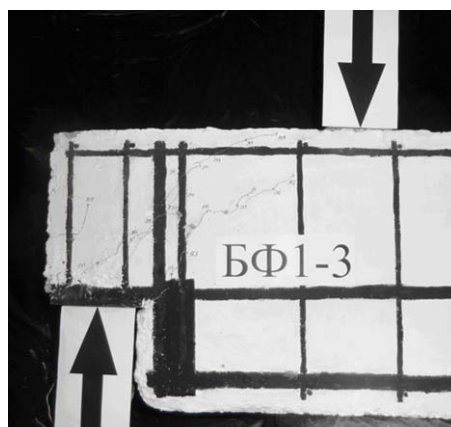


Рис. 4. Разрушение образца БФ1-3:

а – поэтапное образование трещин; б – схема разрушения сжатой бетонной полосы

В ы в о д ы

1. Экспериментально получены две схемы разрушения сжатых бетонных полос консольных опор ригелей: первая схема от сжатия, вторая схема от совместного действия сжатия вдоль полосы и растяжения поперечной арматурой поперек полосы при достижении главными сжимающими напряжениями предела прочности на осевое сжатие при различном содержании композитной стеклопластиковой фибры в бетонной матрице.

2. При введении стеклопластиковой фибры диаметром 15 мкм и длиной 12-18 мм в бетонную матрицу:

- повышается момент образования трещин сжатых бетонных полос при насыщении 1,5 % – в 1,5 раза, 2,5 % – в 2,1 раза;
- увеличивается прочность сжатых бетонных полос в 1,2 и 1,4 раза соответственно;
- изменяется схема разрушения сжатых бетонных полос при насыщении 1,5 % от действия сжатия, при насыщении 2,5 % – от совместного действия сжатия и растяжения поперечной арматурой.

Список литературы

1. Белоусов, И.В. Применение фибробетона в железобетонных конструкциях / И.В. Белоусов, А.В. Шилов, З.А. Меретуков, Л.Д. Маилян // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №4. – С.25–29.
2. Пухаренко, Ю.В. О вязкости разрушения фибробетона / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – №3. – С.80–83.

3. Степанова, В.Ф. Исследование особенности работы бетонных конструкций с комбинированным армированием (арматурой композитной полимерной и неметаллической фиброй)/ В.Ф. Степанова, А.В. Бучкин, Д.А.Ильин// Academia, Архитектура и строительство. – 2017. – №1. – С.31–34.
4. Габидуллин, М.Г. Исследование влияния характеристик стеклофибры на физико-механические свойства стеклофибробетона/ М.Г. Габидуллин, Р.Т. Багманов, А.Я. Шангараев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – №3. – С.42–48.
5. Соловьев, В.Г. Эффективность применения различных видов фибры в бетонах/ В.Г. Соловьев, Е.А. Шувалов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – №9. – С.78–81.
6. Нурдинов, М.Р. Повышение эффективности применения стеклопластиковой фибры в бетонах / М.Р. Нурдинов, А.Ф. Бурьянов, В.Г. Соловьев // Строительные материалы. – 2017. – №4. – С.68–71.
7. Nuridinov, M. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete/ M. Nuridinov, V. Solovyev, A. Panchenko. – DOI: <https://10.1051/matecconf/20168604026> // MATEC Web of Conferences. – 2016. November. – Vol. 86. – Article number 04026.
8. СП 297.1325800.2017. Конструкции фибробетонные с неметаллической фиброй. Правила проектирования. – Москва, 2017.
9. Комаров, В.А. Прочность сжатых полос бетона консольных опор ригелей с подрезкой / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3(32). – С.105–112.
10. Комаров, В.А. Предельные состояния сжатых бетонных полос в подрезках ригелей многоэтажных каркасов / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // IX Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» / РААСН, ПГУАС, НИИМГСУ, 21-24 мая 2025 г.. – Пенза, 2025. – С.138–142.

References

1. Belousov, I.V. Application of fiber-reinforced concrete in reinforced concrete structures / I.V. Belousov, A.V. Shilov, Z.A. Meretukov, L.D. Mailyan // Engineering Journal of Don. – 2017. – No. 4. – P. 25–29.
2. Pukharensko, Yu.V. On the fracture toughness of fiber-reinforced concrete / Yu.V. Pukharensko, V.Yu. Golubev // Bulletin of Civil Engineers. – 2008. – No. 3. – P. 80–83.
3. Stepanova, V.F. Investigation of the performance of concrete structures with combined reinforcement (polymer composite rebar and non-metallic fiber) / V.F. Stepanova, A.V. Buchkin, D.A. Ilyin // Academia. Architecture and Construction. – 2017. – No. 1. – P. 31–34.
4. Gabidullin, M.G. Investigation of the influence of glass fiber characteristics on the physicochemical and mechanical properties of glass fiber-reinforced concrete / M.G. Gabidullin, R.T. Bagmanov, Shangaraev A.Ya. // News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. – 2010. – №3. – P. 42–48.
5. Solovyev, V.G. Effectiveness of using various types of fibers in concrete / V.G. Solovyev, E.A. Shuvalov // International Research Journal. – 2017. – No. 9. – P. 78–81.
6. Nurdinov M.R. Improving the efficiency of using glass fiber in concrete / M.R. Nurdinov, A.F. Buryanov, V.G. Solovyev // Construction Materials. – 2017. – No. 4. – P. 68–71.
7. Nuridinov, M. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete/ M. Nuridinov, V. Solovyev, A. Panchenko. – Doi: <https://10.1051/matecconf/20168604026> // MATEC Web of Conferences. – 2016. – November. – Vol. 86. – Article number 04026.
8. SP 297.1325800.2017. Fiber-reinforced concrete structures with non-metallic fibers. Design rules. – Moscow, 2017.

9. Komarov, V.A. Strength of compressed concrete struts in dapped-end cantilever supports of crossbars / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva // Regional Architecture and Engineering. – 2017. – No. 3(32). – P. 105–112.

10. Komarov, V.A. Limit states of compressed concrete struts in beam dapped ends within multi-story frames / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva // IX International Symposium «Current Problems in Computer Modeling of Structures and Buildings» / RAASN, PGUAS, NRU MGSU, May 21–24, 2025. – Penza, 2025. – P. 138–142.

УДК 699.844

DOI 10.54734/20722958_2026_3_81

*Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет*
Россия, 603952, г. Н. Новгород,
ул. Ильинская, д. 65,
тел.: (831) 430-19-57

Гребнев Павел Алексеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Архитектура», начальник
научного центра «Новое строительство»
E-mail: p.grebnev@mail.ru

Монич Дмитрий Викторович,
доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Архитектура»
E-mail: dmitriy.monich@mail.ru

Бобылев Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, профессор,
профессор кафедры «Архитектура»,
член-корреспондент РААСН
E-mail: k-arhi@yandex.ru

Барчуков Сергей Владимирович,
магистрант кафедры «Архитектура»

Березин Никита Сергеевич,
студент

*Nizhny Novgorod State University of
Architecture and Civil Engineering*
Russia, 603952, Nizhny Novgorod,
65, Ilyinskaya St.,
tel.: (831) 430-19-57

Grebnev Pavel Alekseevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Architecture», Head of the
Scientific Center «New Construction»
E-mail: p.grebnev@mail.ru

Monich Dmitriy Viktorovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Architecture»
E-mail: dmitriy.monich@mail.ru

Bobylev Vladimir Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Professor, Professor of
the Department «Architecture»,
Corresponding member of RAACS,
E-mail: k-arhi@yandex.ru

Barchukov Sergey Vladimirovich,
Graduate student of the Department
«Architecture»

Berezin Nikita Sergeevich,
Student

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УДАРНОГО ШУМА КОНСТРУКЦИЯМИ ПОЛОВ

П.А. Гребнев, Д.В. Монич, В.Н. Бобылев, С.В. Барчуков, Н.С. Березин

Представлены результаты лабораторных экспериментальных исследований изоляции ударного шума различными конструкциями полов, применяемыми при проектировании междуэтажных перекрытий жилых и общественных зданий. Экспериментально исследованы конструкции «плавающего» пола с различными упругими звукоизоляционными слоями, рулонные покрытия, деревянные покрытия, сборные покрытия на основе гипсовых листовых материалов. Проанализированы нормативные требования и определены типы ограждений, предпочтительные для использования в жилых и общественных зданиях. Выделены ограждения, обеспечивающие выполнение нормативных требований по звукоизоляции, но не имеющие запаса по изоляции ударного шума.

Ключевые слова: лабораторные измерения, ударный шум, звукоизоляция перекрытий, защита от ударного шума, «плавающий» пол

EXPERIMENTAL STUDIES OF IMPACT NOISE INSULATION BY FLOOR STRUCTURES

P.A. Grebnev, D.V. Monich, V.N. Bobylev, S.V. Barchukov, N.S. Berezin

The results of laboratory experimental studies of impact noise insulation by various types of floor coverings in residential and public buildings are presented. Floating floor coverings with various substrates, rolled coverings, wood coverings, and prefabricated coverings based on gypsum sheet materials have been experimentally studied. Regulatory requirements have been analyzed, and the preferred types of enclosures for use in residential and public buildings have been determined.

Enclosures with sound insulation values that formally meet regulatory requirements but lack sufficient impact noise insulation have been identified.

Keywords: laboratory measurements, impact noise, soundproofing of ceilings, impact noise protection, «floating» floor

Введение. Защита от ударного шума указана в ФЗ № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» как одно из требований безопасных для здоровья человека условий проживания и пребывания в зданиях. Поэтому задача проектирования ограждающих конструкций зданий, обеспечивающих защиту от шума и комфортные условия для людей в жилых и общественных зданиях, является актуальной.

При проектировании и строительстве гражданских зданий необходимо использовать конструкции полов, обеспечивающие выполнение нормативных требований СП 51.133330 «Защита от шума». При этом следует учитывать необходимость одновременного выполнения норм по защите не только от ударного, но и от воздушного шума.

Получить данные о звукоизоляционных свойствах конструкций полов можно в результате экспериментального исследования в лабораторных условиях по ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций». Поиск рациональных по параметру изоляции ударного шума конструктивных решений полов ведется на основании анализа результатов экспериментальных лабораторных и натурных исследований. В работе [1] рассматривается сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов по стандартному методу для перекрытий с применением подвесного потолка и «плавающего» пола в различных сочетаниях. Решения звукоизолирующих конструкций на основе «плавающих» полов с указанием основных материалов и их характеристик приведены в [2]. Проблемам борьбы с ударным шумом в жилых зданиях посвящены работы [3, 4]. Результаты лабораторных экспериментальных исследований улучшения изоляции ударного шума конструкциями полов с использованием упругих прокладок из современных материалов в составе «плавающего» пола различной массивности представлены в работах [5, 6]. Статистические данные, полученные на основе результатов измерений звукоизоляции междуэтажных перекрытий в новостройках Москвы, приводятся в работах [7, 8]. Проанализированы конструктивные решения, применяемые для защиты от ударного шума в массовом жилищном строительстве в России, выявлены существующие проблемы. Указано на то, что обеспечить требуемую защиту от ударного шума может только конструкция «плавающего» пола.

Теоретический расчет индекса приведенного уровня ударного шума под перекрытием с конструкцией пола (L_{nw} , дБ) выполняется табличным способом по СП 275.1325800.2016 «Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции». Исследованиям методик расчета изоляции ударного шума «плавающих» полов в сравнении с результатами измерений посвящена работа [9]. Актуализация динамических характеристик материалов, применяющихся для изоляции ударного шума, рассматривается в [10].

Методика измерений. Комплекс экспериментальных исследований приведенного уровня ударного шума под перекрытием для различных конструкций полов жилых и общественных зданий проведен в лаборатории акустики ННГАСУ на исследовательской экспериментальной установке «Новые акустические камеры» (НовАК) по методике ГОСТ 27296-2012.

Установка НовАК представляет собой две смежные по вертикали реверберационные камеры. Объем камеры высокого уровня составляет 170 м^3 , камеры низкого уровня – 83 м^3 . Между КВУ и КНУ расположена стационарная испытательная железобетонная плита сплошного сечения длиной 4,4 м и шириной 2,7 м (площадь $11,9 \text{ м}^2$), толщиной 140 мм.

Установка НовАК имеет аттестат № 10/101/3018 о признании пригодной к измерениям приведенного уровня ударного шума под перекрытием в соответствии с ГОСТ 27296-2012 (выдан 10.12.2025 г. ФГУП ВНИИФТРИ).

Передающая измерительная система состояла из стандартной ударной машины УМ-10. Для измерения уровней звукового давления и времени реверберации в нижней реверберационной камере применялся двухканальный прецизионный интегрирующий шумомер-анализатор спектра «Larson Davis» типа 2900В. Измерения проводились в третьоктавных полосах частот нормируемого диапазона (от 100 до 3150 Гц).

В качестве верхнего пригрузочного слоя в конструкциях типа «плавающий» пол использовался фрагмент цементно-песчаной стяжки размерами 1,0×1,0 м, толщиной 60 мм и поверхностной плотностью 120 кг/м² (рис. 1).



Рис. 1. Стандартная ударная машина, размещенная на исследуемой конструкции пола при проведении измерения

Результаты измерений. В ходе проведенных экспериментальных измерений изоляции ударного шума получены частотные характеристики приведенного уровня ударного шума под перекрытием для исследуемых образцов полов, а также для испытательной плиты (без конструкции пола) при трех различных способах установки ударной машины (рис. 2).

На основании полученных частотных характеристик приведенного уровня ударного шума, в соответствии с методикой СП 51.13330.2011 «Защита от шума», для исследованных конструкций были определены индексы приведенного уровня ударного шума (L_{nw} , дБ), представленные в таблице.

Улучшение изоляции ударного шума конструкциями полов (ΔL , дБ) для каждого образца определялось на каждой частоте нормируемого диапазона частот по формуле

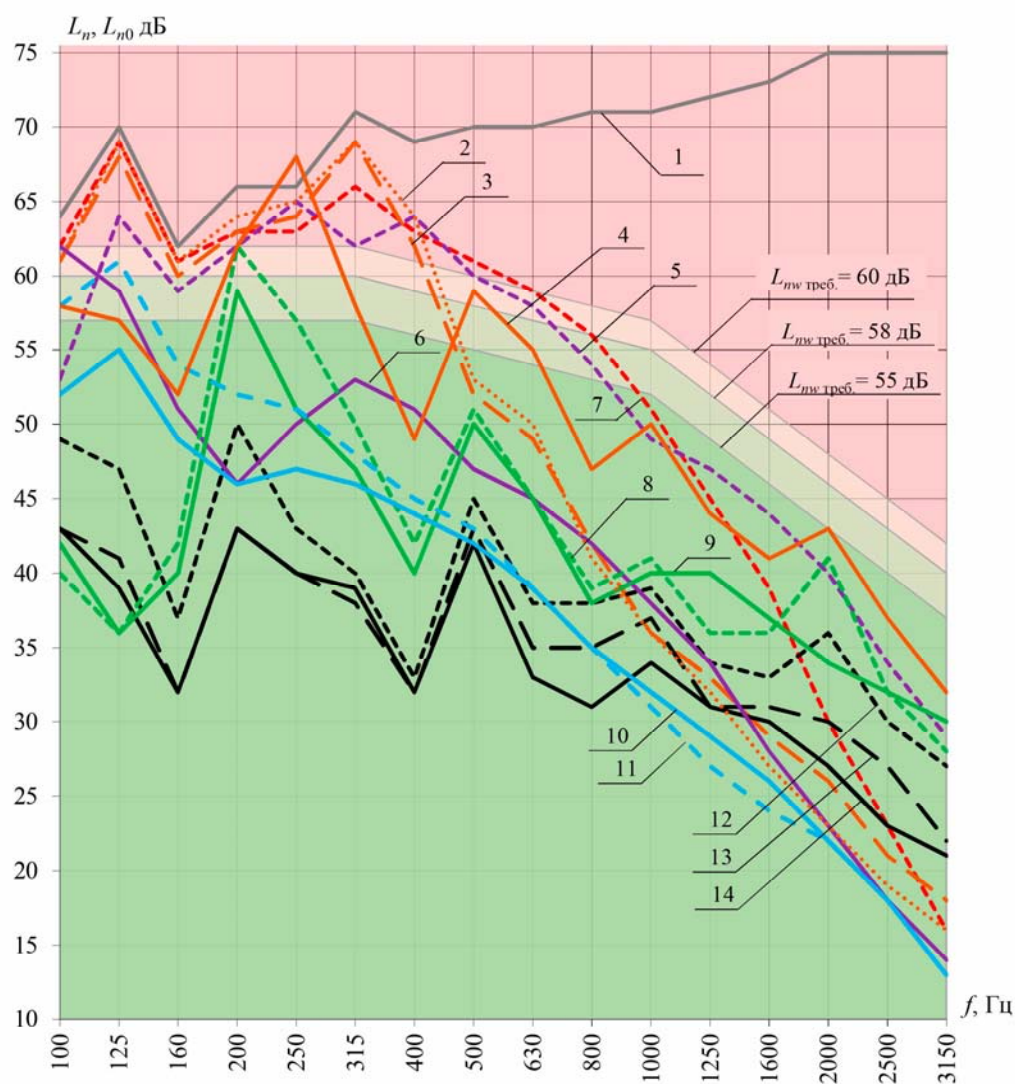
$$\Delta L_n = L_{n0} - L_n, \quad (1)$$

где L_{n0} – приведенный уровень ударного шума под испытательной плитой перекрытия без конструкции пола, дБ; L_n – приведенный уровень ударного шума под испытательной плитой перекрытия с установленным образцом конструкции пола.

Улучшение индекса приведенного уровня ударного шума под перекрытием определялось по формуле

$$\Delta L_{nw} = L_{nw0} - L_{nw}, \quad (2)$$

где L_{nw0} – индекс приведенного уровня ударного шума под испытательной плитой перекрытия без конструкции пола, дБ; L_{nw} – индекс приведенного уровня ударного шума под испытательной плитой перекрытия с установленным образцом конструкции пола, дБ.



- зона благоприятных отклонений от граничного нормативного значения для перекрытий гостиниц 4 и 5 звезд; перекрытий между музыкальными классами образовательных организаций высшего образования (зона №1);
- то же для перекрытий зоны №1 и для перекрытий между помещениями квартир и расположенными под ними ресторанами, кафе, спортивными залами; для перекрытий, отделяющих номера от помещений общего пользования гостиниц 3 звезды; для перекрытий между музыкальными классами общеобразовательных организаций среднего общего образования (зона №2);
- то же для перекрытий зон №1, №2 и для перекрытий между помещениями квартир; между жилыми помещениями общежитий; между помещениями гостиниц категорий 3 звезды и ниже; между палатами, кабинетами врачей, операционными (зона №3);
- зона неблагоприятных отклонений

Рис. 2. Частотные характеристики улучшения изоляции ударного шума конструкциями полов:
1 – 14 – номера кривых (см. таблицу)

Индекс улучшения изоляции ударного шума за счет покрытия пола (ΔL_y , дБ) вычислялся по формуле

$$\Delta L_y = 15 + \Delta_y, \quad (3)$$

где Δ_y – поправка, характеризующая отличие измеренной частотной характеристики снижения приведенного уровня ударного шума (ΔL , дБ) за счет конструкции пола от оценочного частотного спектра снижения приведенного уровня ударного шума (ΔL^0 , дБ), дБ.

Результаты сравнения звукоизоляционных свойств исследованных конструкций полов с нормативными требованиями СП 51.13330 «Защита от шума» приведены в таблице.

Сравнение звукоизоляционных свойств конструкций полов
с нормативными требованиями

№ кривой на рис. 2	Исследованная конструкция пола	Толщина конструкции пола, мм	Параметры изоляции ударного шума			Требуемые значения (не более), $L_{нп\text{треб}}$, дБ		
			$L_{нп}$, дБ	ΔL_y , дБ	$\Delta L_{нп}$, дБ	60	58	55
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Монолитная железобетонная плита толщиной 140 мм без конструкции пола	-	80	-	-	-	-	-
2	Паркет по рулонному материалу из полиэфирного волокна (ПЭВ) толщиной 4 мм	20	59	18	21	+	-	-
3	Ламинат по ПЭВ толщиной 4 мм	10	59	18	22	+	-	-
4	Цементно-песчаная стяжка толщиной 60 мм по ПЭВ толщиной 4 мм	64	54	22	26	+	+	+
5	Деревянный пол по лагам (брус 50×50 мм и два листа фанеры толщиной по 18 мм), заполненный минеральной ватой толщиной 50 мм, без упругого звукоизоляционного слоя под лагами	86	57	19	24	+	+	-
6	Деревянный пол по лагам (брус 50×50 мм и два листа фанеры толщиной по 18 мм), заполненный минеральной ватой толщиной 50 мм. Под лагами ленточные прокладки из акустического эластомера толщиной 25 мм	101	48	28	31	+	+	+
7	Линолеум с войлочной основой	5	59	18	21	+	-	-
8	Цементно-песчаная стяжка толщиной 60 мм по гранулированному пенополистиролу толщиной 20 мм	80	47	30	34	+	+	+
9	Цементно-песчаная стяжка толщиной 60 мм по гранулированному пенополистиролу толщиной 40 мм	100	45	33	36	+	+	+

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	Сборная стяжка из листов на основе гипса (4 слоя по 10 мм каждый) и с покрытием из фанеры толщиной 18 мм на слое минеральной ваты толщиной 20 мм	78	42	33	39	+	+	+
11	Сборная стяжка из листов на основе гипса (4 слоя по 10мм каждый) и с покрытием из фанеры толщиной 18 мм на слое минеральной ваты толщиной 50 мм	108	47	28	34	+	+	+
12	Цементно-песчаная стяжка толщиной 60 мм по минеральной вате толщиной 20 мм	80	42	36	39	+	+	+
13	Цементно-песчаная стяжка толщиной 60 мм по минеральной вате толщиной 40 мм	100	38	40	43	+	+	+
14	Цементно-песчаная стяжка толщиной 60 мм по минеральной вате толщиной 60 мм	120	37	41	44	+	+	+

У с л о в н ы е о б о з н а ч е н и я :

«+» – конструкция пола обеспечивает выполнение нормативных требований по изоляции ударного шума;

«-» – конструкция пола не обеспечивает выполнение нормативных требований по изоляции ударного шума;

+* – конструкция пола обеспечивает выполнение нормативных требований по изоляции ударного шума, но без значительного запаса по величине индекса приведенного уровня ударного шума под перекрытием (запас не превышает 1 дБ).

Анализ результатов исследования. Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1) для жилых зданий все исследованные конструкции полов обеспечивают выполнение нормативных требований по защите от ударного шума;

2) некоторые из исследованных типов конструкций полов обеспечивают выполнение параметров изоляции ударного шума, близких к нормативным, но без значительного запаса по величине индекса приведенного уровня ударного шума под перекрытием (запас не превышает 1 дБ):

- для перекрытий между помещениями квартир ($L_{nw \text{ треб}} \leq 60$ дБ); к таким конструкциям можно отнести тонкие рулонные материалы с жестким и относительно легким покрытием из ламината и паркета (кривые №2, №3 на рис. 2), рулонное покрытие из линолеума (кривая №7) и конструкцию деревянного пола по лагам, опирающимся на плиту перекрытия без упругого звукоизоляционного слоя (кривая №5);

- для перекрытий между помещениями квартир и расположенными под ними ресторанами, кафе, спортивными залами ($L_{nw \text{ треб}} \leq 58$ дБ); для перекрытий, отделяющих номера от помещений общего пользования гостиниц 3 звезды ($L_{nw \text{ треб}} \leq 58$ дБ); для перекрытий, расположенных между музыкальными классами общеобразовательных организаций среднего общего образования ($L_{nw \text{ треб}} \leq 58$ дБ); к таким конструкциям можно отнести конструкцию деревянного пола по лагам, опирающимся на плиту перекрытия без упругого звукоизоляционного слоя (кривая №5). При этом ряд конструкций полов нормативным требованиям не соответствует (кривые №2, №3, №7);

3) для перекрытий между помещениями гостиниц категорий 4 и 5 звезд ($L_{\text{нв. треб}} \leq 55$ дБ); для перекрытий между музыкальными классами образовательных организаций высшего образования ($L_{\text{нв. треб}} \leq 55$ дБ), к которым предъявляются наиболее высокие нормативные требования по изоляции ударного шума; ряд конструкций полов им не соответствует (кривые №2, №3, №5, №7). Для выполнения нормативных требований в этом случае необходимо применение конструкции «плавающего» пола. При этом конструкция №4 обеспечивает выполнение норматива, но без значительного запаса по величине индекса приведенного уровня ударного шума под перекрытием (запас не превышает 1 дБ). Целесообразно использовать конструкции полов с большей толщиной упругого слоя под сборной стяжкой (кривые №10, №11) или монолитной стяжкой «плавающего» пола (кривые №8, №9, №12, №13, №14). Для деревянных конструкций полов необходимо применение упругого звукоизоляционного слоя под лагами (кривая №6);

4) величины индексов улучшения изоляции ударного шума конструкцией пола (ΔL_y , дБ), рассчитанные по формуле (3), имеют расхождения с величиной ($\Delta L_{\text{нв.}}$, дБ), показывающие разницу между индексами приведенного уровня ударного шума под испытательной плитой перекрытия без конструкции пола и с конструкцией пола. Расхождения отмечены для всех исследованных образцов, их величина составляет от 3 до 6 дБ.

Заключение

1. Определены типы конструкций полов, которые обеспечивают выполнение нормативных требований по изоляции ударного шума, но без значительного запаса по величине индекса приведенного уровня ударного шума под перекрытием (запас не превышает 1 дБ). В процессе эксплуатации здания характеристики упругого звукоизоляционного слоя будут неизбежно снижаться, что приведет к нарушению акустического комфорта внутри помещений. При этом такие ограждения из-за своей малой массы могут не обеспечивать (при недостаточной толщине перекрытия) и нормативных требований по изоляции воздушного шума, что также является обязательным требованием к междуэтажным перекрытиям в жилых и общественных зданиях.

2. Для междуэтажных перекрытий с высокими нормативными требованиями по изоляции ударного шума ($L_{\text{нв. треб}} \leq 55$ дБ) к конструкциям без значительного запаса по величине индекса приведенного уровня ударного шума под перекрытием (запас не превышает 1 дБ) можно отнести достаточно эффективную конструкцию «плавающего» пола с тонким упругим слоем (конструкция №4).

3. Результаты выполненного лабораторного исследования могут быть использованы как справочные данные при проектировании жилых и общественных зданий, а также для межлабораторных сравнений результатов акустических измерений параметров изоляции ударного шума конструкциями полов.

Список литературы

1. Дымченко, В.В. Исследования звукоизолирующих свойств междуэтажных перекрытий при воздействии ударного шума / В.В. Дымченко, П.А. Гребнев, В.Н. Бобылев, Д.В. Монич, С.В. Барчуков // Приволжский научный журнал. – 2025. – № 4(76). – С. 28–34.
2. Шубин, И.Л. Звукоизоляция ограждающих конструкций в многоэтажных зданиях. Требования и методы обеспечения / И.Л. Шубин, В.А. Аистов, М.А. Пороженко // Строительные материалы. – 2019. – № 3. – С. 33–43.
3. Пороженко, М.А. Изоляция ударного шума ограждающими конструкциями здания / М.А. Пороженко // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 6. – С. 34–35.
4. Белолипецкая, В.А. Особенности применения различных звукоизолирующих материалов в монолитном строительстве / В.А. Белолипецкая, А.М. Кривошапов, Л.М. Весова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5. – С. 493–501.

5. Градова, О.В. Улучшение изоляции ударного шума упругими прокладками в конструкциях плавающих полов / О.В. Градова, А.М. Рогалев // Строительные материалы. – 2024. – №6. – С. 26–29.
6. Крышов, С.И. Зависимость изоляции ударного шума от состава конструктивных слоев напольного покрытия / С.И. Крышов, Д.Е. Котельников, О.В. Градова // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 6. – С. 16–17.
7. Крышов, С.И. Обеспечение требований звукоизоляции монолитными и сборными железобетонными конструкциями жилых зданий (по данным измерений в новостройках Москвы) / С.И. Крышов, О.В. Градова // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2019. – № 4(57). – С. 45–53.
8. Рогалев, А.М. Рациональный выбор звукоизоляционного материала из каменной ваты в конструкциях плавающих полов / А.М. Рогалев // Приволжский научный журнал. – 2024. – №4. – С. 18–26.
9. Рогалев, А.М. Оценка сходимости действующих методик расчета изоляции ударного шума плавающих полов с результатами измерений / А.М. Рогалев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2025. – № 6. – С. 29–33.
10. Рогалев, А.М. Актуализация динамических характеристик материалов упругого слоя конструкций плавающих полов / А.М. Рогалев // Строительные материалы. – 2025. – № 6. – С. 29–33.

References

1. Dymchenko, V.V. Investigation of sound insulation properties of interfloor slabs under impact noise / V.V. Dymchenko, P.A. Grebnev, V.N. Bobylev, D.V. Monich, S.V. Barchukov // Volga Region Scientific Journal. – 2025. – №4. – P. 28–34.
2. Shubin, I.L. Sound insulation of enclosing structures in multi-story buildings. Requirements and methods of ensuring / I.L. Shubin, V.A. Aistov, M.A. Porozhenko // Building materials. – 2019. – №3. – P. 33–43.
3. Porozhenko, M.A. Impact noise insulation by building enclosing structures / M.A. Porozhenko // Construction Equipment Bulletin. – 2018. – №6. – P. 34–35.
4. Belolipetskaya, V.A. Features of the use of various soundproofing materials in monolithic construction / V.A. Belolipetskaya, A.M. Krivoshchapov, L.M. Vesova // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. – №5. – P. 493–501.
5. Gradova, O.V. Improving impact noise insulation with elastic pads in floating floor structures / O.V. Gradova, A.M. Rogalev // Building materials. – 2024. – №6. – P. 26–29.
6. Kryshov, S.I. Dependence of impact noise insulation on the composition of the structural layers of the floor covering / S.I. Kryshov, D.E. Kotel'nikov, O.V. Gradova // Construction Equipment Bulletin. – 2021. – №6. – P. 16–17.
7. Kryshov, S.I. Provision of sound insulation requirements with monolithic and precast concrete structures of residential buildings according to measurements in new buildings in Moscow / S.I. Kryshov, O.V. Gradova // ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures. – 2019. – №4. – P. 45–53.
8. Rogalev, A.M. Rational choice of soundproofing material made of stone wool in floating floor structures / A.M. Rogalev // Volga Region Scientific Journal. – 2024. – №4. – P. 18–26.
9. Rogalev, A.M. Assessment of the convergence of current methods for calculating the impact sound insulation of floating floors with measurement results / A.M. Rogalev // Construction Equipment Bulletin. – 2025. – №6. – P. 29–33.
10. Rogalev, A.M. Updating the dynamic characteristics of elastic layer materials for floating floor structures / A.M. Rogalev // Building materials. – 2025. – №6. – P. 29–33.

УДК 697.112.3: 699.86

DOI 10.54734/20722958_2026_3_89

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук,
профессор кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: korolevatamara@mail.ru

Мыскин Сергей Михайлович,
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: myskin.sergej@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of Economic Sciences,
Professor of the Department «Heat and Gas
Supply and Ventilation»
E-mail: korolevatamara@mail.ru

Myskin Sergey Mikhailovich,
Postgraduate student of the Department «Heat
and Gas Supply and Ventilation»
E-mail: myskin.sergej@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НАРУЖНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Т.И. Королева, С.М. Мыскин

Проведены тепловизионное исследование наружной поверхности многослойной утепленной ограждающей конструкции стены с монолитным железобетонным каркасом, натурные измерения температур ее внутренней поверхности, а также выполнен расчет температурных полей данного ограждения на ЭВ с помощью разработанной программы «Расчет температурных полей в толще ограждающей конструкции». По итогам анализа полученных результатов и сравнения характеристик было определено, что программа верно производит расчеты и соответствует натурным измерениям в рамках допустимых погрешностей.

Ключевые слова: плоское температурное поле, тепловизионная съемка, компьютерное моделирование, программный комплекс, натурные измерения, термограмма

STUDYING TEMPERATURE FIELDS OF AN EXTERNAL ENCLOSING STRUCTURE USING COMPUTER-BASED SOFTWARE SYSTEMS

T.I. Koroleva, S.M. Myskin

A thermal imaging examination of the outer surface of a multilayer insulated wall envelope with a monolithic reinforced concrete frame and in-situ temperature measurements of its inner surface has been done, and a computer calculation of the temperature fields of this envelope using the developed program «Calculation of Temperature Fields in the Thickness of the Envelope» has been fulfilled. The obtained results have been analyzed and the characteristics have been compared. Based on the results of the analysis, it is determined that the program accurately performs calculations and corresponds to field measurements within the limits of permissible errors.

Keywords: flat temperature field, thermal imaging, computer modeling, software package, field measurements, thermogram

На этапе проектирования зданий и сооружений необходимо производить теплотехнический расчет и оценку температурно-влажностного режима наружных ограждающих конструкций. Данные мероприятия выполняются для правильного подбора конструктива и материалов ограждающих конструкций, что позволит своевременно оценить экономические затраты на строительство, принять правильные решения по

энергоэффективности зданий, а также избежать неблагоприятных последствий при неверном выборе конструкции, одним из которых является конденсация влаги как в толще, так и на внутренней поверхности ограждения [1-9].

По методике, разработанной К.Ф. Фокиным [10], авторами было проведено аналитическое исследование плоских температурных полей в толще неоднородной утепленной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом [11]. На основе результатов проведенного исследования и сформированной математической модели разработан программный комплекс для ЭВМ «Расчет температурных полей в толще ограждающей конструкции» с использованием современного языка программирования Python. Программа имеет свои базы данных с климатическими характеристиками городов Российской Федерации и теплотехническими характеристиками строительных материалов, соответствующими актуальным требованиям нормативных документов. Также данный программный комплекс производит автоматизированный расчет температурных полей ограждающих конструкций стен зданий, строит графики распределения температур в толще ОК. В программе предусмотрено сведение расчетных характеристик для каждого из узлов ограждающей конструкции в таблицу и имеется возможность загрузки подробных отчетов в формате docx, excel, csv, png.

Для апробации программного комплекса в реальных условиях проведены натурное исследование изучаемого объекта и измерения температур строительной конструкции с помощью специализированных измерительных приборов.

На первом этапе натурального исследования была выполнена тепловизионная съемка объекта. Измерения проводились при температуре наружного воздуха -8°C и относительной влажности воздуха 80 %. Температура внутри помещения $+20^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность воздуха 60 %.

Объектом исследования была выбрана наружная неоднородная ограждающая конструкция стены среднестатистического современного жилого здания, а именно коммерческое помещение на первом этаже (отм. 0.000) в жилом здании, расположенное по адресу: г. Пенза, пр-кт Победы, д. 97А.

Характеристики материалов наружной стены приняты по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и приведены ниже:

слой № 1: штукатурка фасадная декоративная по стеклосетке – $\delta_1=0,02$ м; $\lambda_1=0,76$ Вт/(м · °C); $\gamma_1=1800$ кг/м³; $\mu_1=0,09$ мг/(м · ч · Па);

слой № 2: утеплитель из плит пенополистирола ППС16Ф, ГОСТ 15588-2014 – $\delta_2=0,15$ м; $\lambda_2=0,039$ Вт/(м · °C); $\gamma_2=16$ кг/м³; $\mu_2=0,05$ мг/(м · ч · Па);

слой № 3: кладка из камня керамического щелевого КМ-р 250×120×140/2,1НФ/ 100/ 1,2/25/ ГОСТ 530-2012 на растворе М50 – $\delta_3=0,25$ м; $\lambda_2=0,64$ Вт/(м · °C); $\gamma_2=1400$ кг/м³; $\mu_2=0,14$ мг/(м · ч · Па);

слой № 4: монолитный железобетон – $\delta_2=0,27$ м; $\lambda_2=1,92$ Вт/(м · °C); $\gamma_2=2500$ кг/м³; $\mu_2=0,03$ мг/(м · ч · Па);

слой № 5: штукатурка известково-песчаная для внутренней отделки – $\delta_2=0,02$ м; $\lambda_2=0,7$ Вт/(м · °C); $\gamma_2=1600$ кг/м³; $\mu_2=0,12$ мг/(м · ч · Па).

Общий вид конструкции стены приведен на рис. 1, а, б.

При проведении натурных измерений были использованы следующие измерительные приборы:

- тепловизор инфракрасный Testo 875-1;
- цифровой пирометр Mastech;
- термогигрометр электронный (цифровой) МЕГЕОН 20066.

На рис. 2 показан внешний вид обследуемого объекта.

На рис. 3, 4, 5 представлены термограммы стены снаружи здания, которые были выполнены тепловизором Testo 875-1 и обработаны с помощью специализированного программного обеспечения, предоставленного производителем прибора.

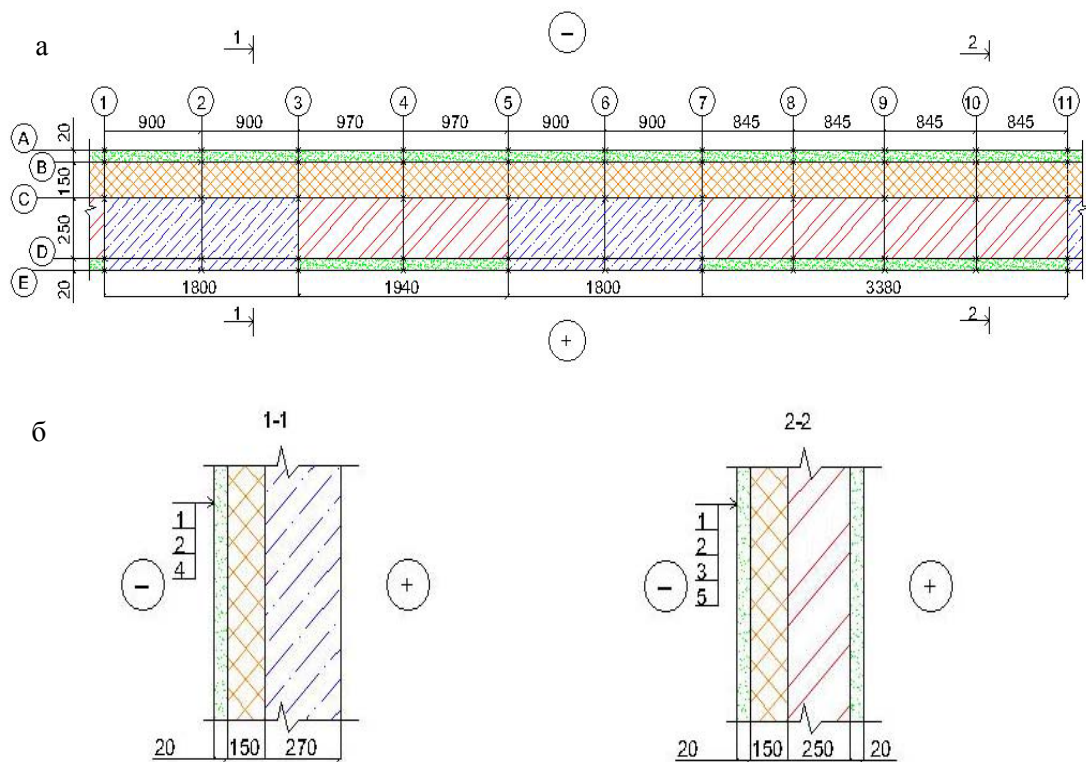


Рис. 1. Конструкция обследуемого участка наружной многослойной неоднородной стены:
а – вид сверху; б – разрезы 1-1, 2-2



Рис. 2. Внешний вид обследуемого объекта

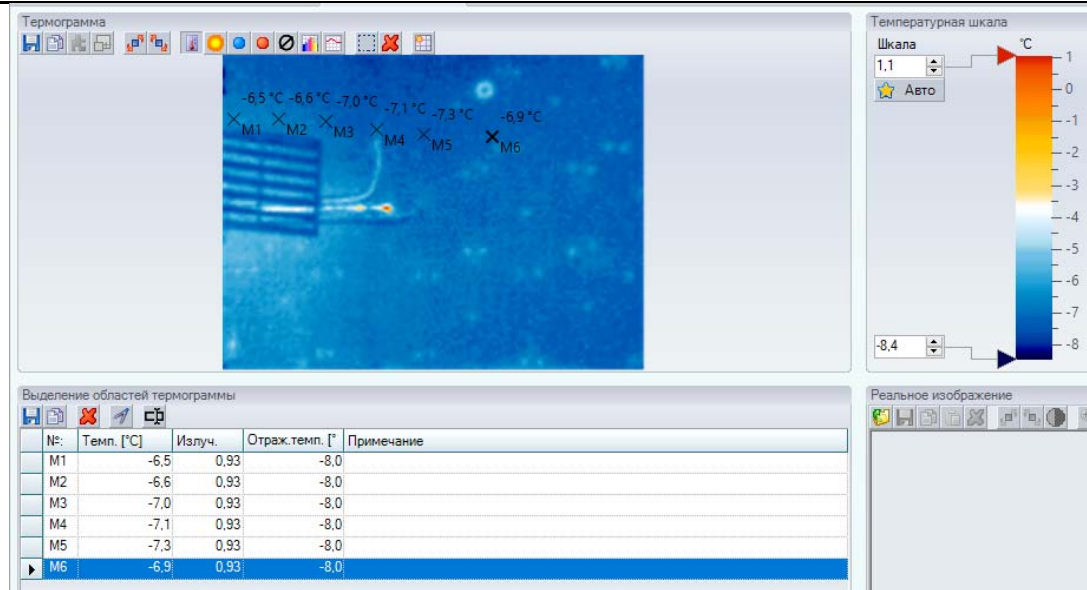


Рис. 3. Термограмма 1 обследуемого участка стены № 1

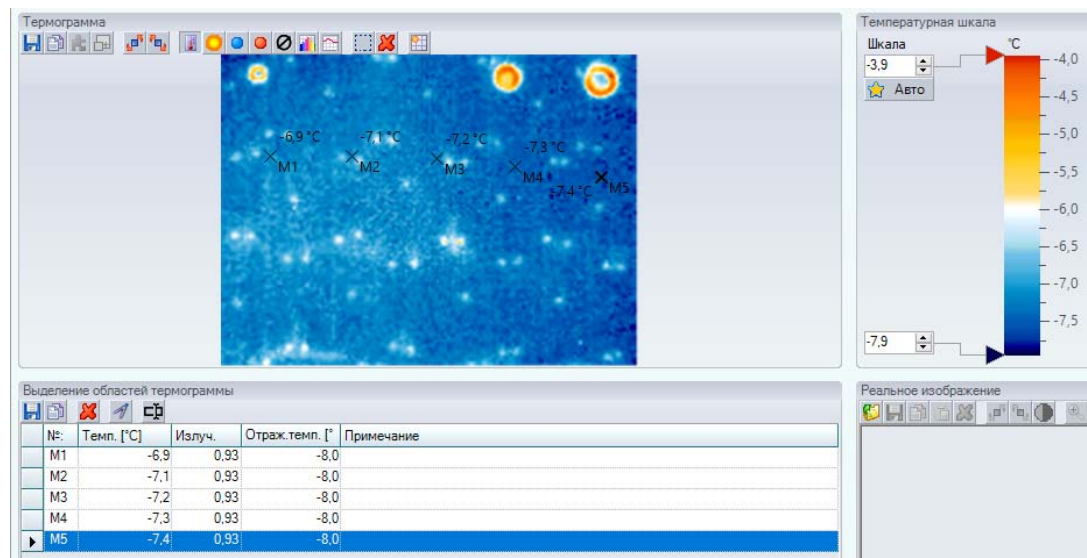


Рис. 4. Термограмма 2 обследуемого участка стены № 1

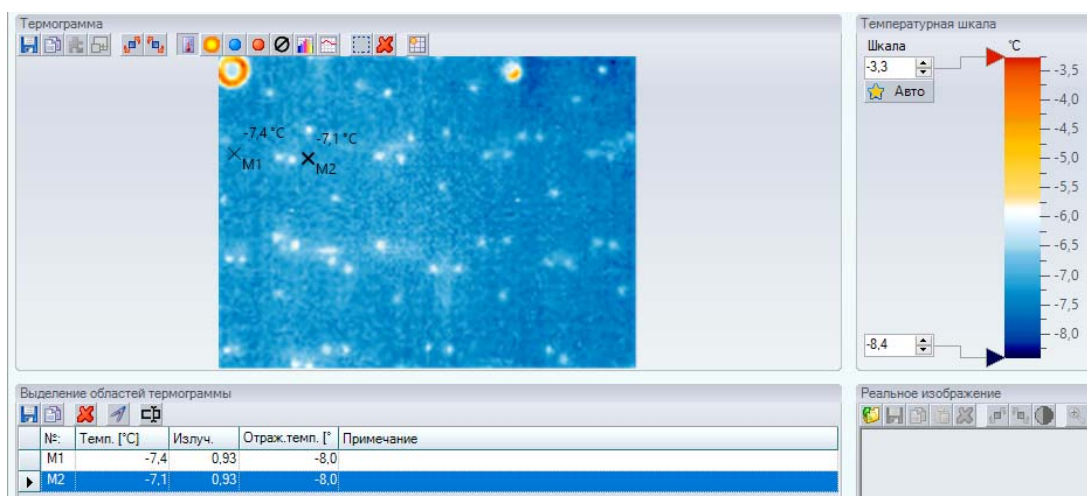


Рис. 5. Термограмма 3 обследуемого участка стены № 1

Выполненные измерения обследуемого участка стены показали, что температура наружной поверхности изменялась от 6,3 до 7,7 °С. Также проведены измерения внутренней поверхности обследуемого участка стены с помощью цифрового пирометра Mastech MS6520B. Результаты измерений сведены в таблицу.

Результаты измерений температур внутренней поверхности стены с помощью цифрового пирометра Mastech MS6520B

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17,7	17,5	17,4	17,5	17,8	17,7	17,6	17,7	17,8	17,7	17,9

На рис. 6, 7 представлены результаты расчета, выполненного в программе «Расчет температурных полей в толще ограждающей конструкции».

Расчет температурных полей в толще ограждающей конструкции

Файл Базы данных Экспорт Справка

1. Климатические параметры 2. Характеристики материалов 3. Разбивка на участки 4. Конструктор стены 5. Результаты 6. Таблица температур 7. Настройки надписей

Таблица температур: Редактировать вручную

X\Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
Y1	-7.18	-6.52	-6.53	-7.08	-7.08	-6.53	-6.53	-7.08	-7.08	-7.08	-7.51
Y2	-6.20	-5.63	-5.64	-6.52	-6.52	-5.64	-5.64	-6.52	-6.53	-6.53	-6.92
Y3	7.84	7.13	7.10	1.41	1.41	7.10	7.10	1.41	1.40	1.40	1.50
Y4	17.39	15.81	15.77	16.92	16.91	15.77	15.78	16.91	16.94	16.96	18.02
Y5	17.79	16.15	16.12	17.55	17.55	16.12	16.13	17.55	17.57	17.59	18.70

Рис. 6. Экранная страница полученных результатов – таблица распределения температур обследуемого участка стены

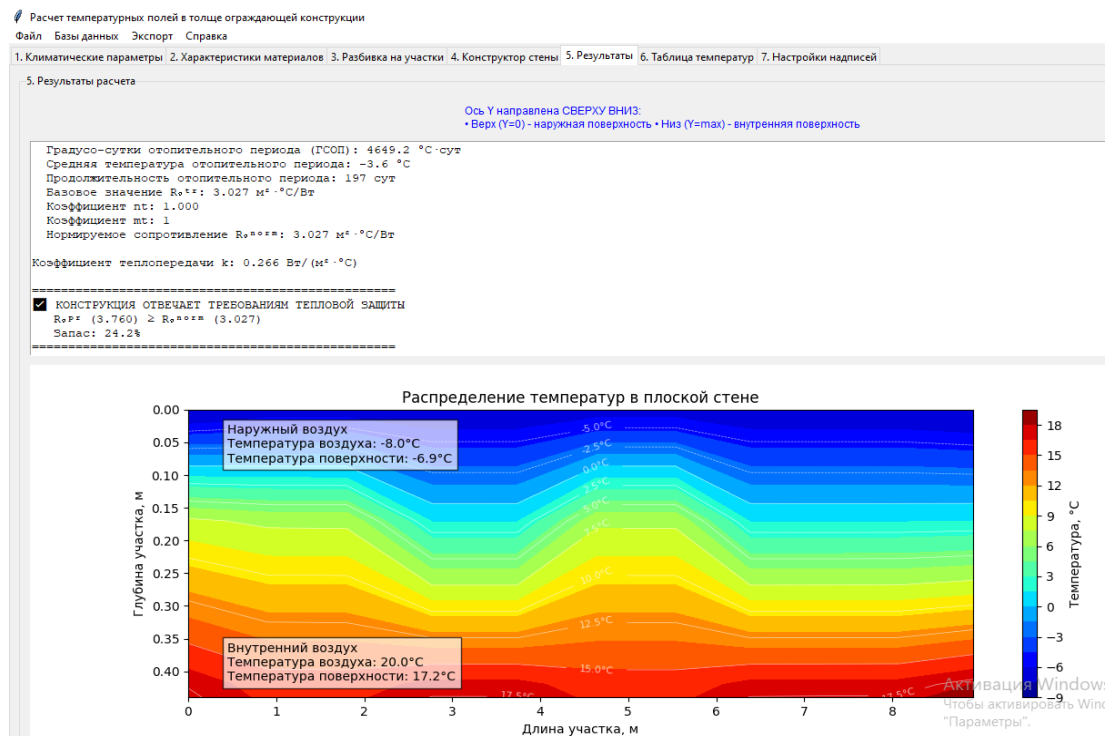


Рис. 7. Экранная страница полученных результатов – график распределения температур обследуемого участка стены

Средние температуры наружной и внутренней поверхностей стены вычислены по измеренным данным:

$$t_{н\text{ ср}} = \frac{\left[\begin{aligned} &-7,1 \cdot 0,450 + (-7,4) \cdot 0,900 + (-7,3) \cdot 0,935 + (-7,2) \cdot 0,970 + \\ &+ (-7,1) \cdot 0,935 + (-6,9) \cdot 0,900 + (-7,3) \cdot 0,8725 + (-7,1) \cdot 0,845 + \\ &+ (-7,0) \cdot 0,845 + (-6,6) \cdot 0,845 + (-6,5) \cdot 0,4225 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} &0,450 + 0,900 + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,8725 + 0,845 + \\ &+ 0,845 + 0,845 + 0,4225 \end{aligned} \right]} = -7,08^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{в\text{ ср}} = \frac{\left[\begin{aligned} &17,7 \cdot 0,450 + 17,5 \cdot 0,900 + 17,4 \cdot 0,935 + 17,5 \cdot 0,970 + \\ &+ 17,8 \cdot 0,935 + 17,7 \cdot 0,900 + 17,6 \cdot 0,8725 + 17,7 \cdot 0,845 + \\ &+ 17,8 \cdot 0,845 + 17,7 \cdot 0,845 + 17,9 \cdot 0,4225 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} &0,450 + 0,900 + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,8725 + 0,845 + \\ &+ 0,845 + 0,845 + 0,4225 \end{aligned} \right]} = 17,65^{\circ}\text{C}.$$

Определены средние температуры наружной и внутренней поверхностей стены по расчетам, выполненным в программе на ЭВМ:

$$t_{н\text{ ср}}^* = \frac{\left[\begin{aligned} &-7,18 \cdot 0,450 + (-6,52) \cdot 0,900 + (-6,53) \cdot 0,935 + (-7,08) \cdot 0,970 + \\ &+ (-7,08) \cdot 0,935 + (-6,53) \cdot 0,900 + (-6,53) \cdot 0,8725 + (-7,08) \cdot 0,845 + \\ &+ (-7,08) \cdot 0,845 + (-7,08) \cdot 0,845 + (-7,51) \cdot 0,4225 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} &0,450 + 0,900 + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,8725 + 0,845 + \\ &+ 0,845 + 0,845 + 0,4225 \end{aligned} \right]} = -6,88^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{в\text{ ср}}^* = \frac{\left[\begin{aligned} &17,79 \cdot 0,450 + 16,15 \cdot 0,900 + 16,12 \cdot 0,935 + 17,55 \cdot 0,970 + \\ &+ 17,55 \cdot 0,935 + 16,12 \cdot 0,900 + 16,13 \cdot 0,8725 + 17,55 \cdot 0,845 + \\ &+ 17,57 \cdot 0,845 + 17,59 \cdot 0,845 + 18,70 \cdot 0,4225 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} &0,450 + 0,900 + 0,935 + 0,970 + 0,935 + 0,900 + 0,8725 + 0,845 + \\ &+ 0,845 + 0,845 + 0,4225 \end{aligned} \right]} = 17,05^{\circ}\text{C}.$$

Вычислена невязка величин между измеренными и рассчитанными в программе для ЭВМ значениями средних температур на наружной поверхности стены:

$$\delta_n = \frac{-7,08 + 6,88}{-7,08} \cdot 100 = 2,8 \, \%.$$

Также определена невязка величин между измеренными и рассчитанными в программе для ЭВМ значениями средних температур на внутренней поверхности стены:

$$\delta_v = \frac{17,65 - 17,05}{17,65} \cdot 100 = 3,4 \, \%.$$

Выводы. По итогам проведенного исследования и выполненных натурных измерений сделан вывод, что разработанная авторами программа для ЭВМ «Расчет температурных полей в толще ограждающей конструкции» верно производит расчеты с незначительными погрешностями, которыми можно пренебречь. Программу целесообразно применять для расчетов плоских температурных полей в толще строительных ограждающих конструкций взамен выполняемых в ручном режиме расчетов по методике К.Ф. Фокина, так как ПО значительно снижает трудозатраты и сокращает время на проведение таких исследований.

Список литературы

1. Корниенко, С.В. Совершенствование методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций / С.В. Корниенко. – DOI: 10.34910/ALF.13.1. // AlfaBuild. – 2020. – № 1(13). – С. 1–6.
2. Gagarin, V.G. Moisture regime of enclosing structures with different thickness of insulation layer / V.G. Gagarin, P.A. Khavanov, K.P. Zubarev. – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012017 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 896. – P. 012017.
3. Корниенко, С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций : дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.03 / Корниенко Сергей Валерьевич. – Волгоград, 2018. – 380 с.
4. Петров, А.С. Определение характера увлажнения ограждающих конструкций экспериментальным методом цветовой индикации / А.С. Петров, А.М. Юзмухаметов, В.Н. Куприянов, К.С. Андрейцева. – DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28 // Строительные материалы. – 2019. – № 6. – С. 24–28.
5. Gagarin, V.G. The position of the maximum wetting plane in building enclosing structures / V.G. Gagarin, P.A. Khavanov, K.P. Zubarev. – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012016// IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 896. – P. 012016.
6. Gagarin, V.G. Graphical Method for Determination of Maximum Wetting Plane Position in Enclosing Structures of Buildings / V.G. Gagarin, V.K. Akhmetov, K.P. Zubarev. – DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046.// IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 753. – P. 022046.
7. Kupriyanov, V.N. Dew point temperature as overwetting indicator of enclosing structures / V.N. Kupriyanov. – DOI: 10.1051/e3sconf/202127407002 // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 274. – P. 07002.
8. Корниенко, С.В. Уточнение расчетных параметров микроклимата помещений при оценке влагозащитных свойств ограждающих конструкций / С.В. Корниенко. – DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145 // Вестник МГСУ. – 2016. – № 11. – С. 132–145.
9. Petrov, A.S. Determination of Humidity Conditions of Enclosing Structures by the Color Indicator Method / A.S. Petrov, V.N. Kupriyanov. – DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064 // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463. – P. 022064.
10. Королева, Т.И. Методы расчета влажностного режима ограждающих конструкций зданий / Т.И. Королева, С.М. Мыскин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1 (50). – С. 64–71.
11. Мыскин, С.М. Исследование температурных полей неоднородной наружной стены с монолитным железобетонным каркасом / С.М. Мыскин, Т.И. Королева, М.А. Ивачев. – DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.20-38 // Строительство: наука и образование. – 2024. – Т. 14, вып. 4. – С. 20–38. – URL: <http://nso-journal.ru>.

References

1. Kornienko, S.V. Improving methods for calculating the temperature and humidity regime of enclosing structures / S.V. Kornienko. – DOI: 10.34910/ALF.13.1 // AlfaBuild. – 2020. – No. 1(13). – P. 1–6.
2. Gagarin, V.G. Moisture regime of enclosing structures with different thickness of insulation layer / V.G. Gagarin, P.A. Khavanov, K.P. Zubarev. – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012017 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 896. – P. 012017.
3. Kornienko, S.V. Improving the Energy Efficiency of Buildings by Improving the Methods for Calculating the Temperature and Humidity Conditions of Enclosing Structures :

Diss. Doctor of Sciences: 05.23.03 / Sergey Valerievich Kornienko. – Volgograd, 2018. – 380 p.

4. Petrov, A.S. Determining the nature of humidification of enclosing structures by the experimental method of color indication / A.S. Petrov, A.M. Yuzmukhametov, V.N. Kupriyanov, K.S. Andreytseva. – DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28 // Construction Materials. – 2019. – No. 6. – P. 24–28.

5. Gagarin, V.G. The position of the maximum wetting plane in building enclosing structures / V.G. Gagarin, P.A. Khavanov, K.P. Zubarev. – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012016// IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 896. – P. 012016.

6. Gagarin, V.G. Graphical Method for Determination of Maximum Wetting Plane Position in Enclosing Structures of Buildings / V.G. Gagarin, V.K. Akhmetov, K.P. Zubarev. – DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046.// IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 753. – P. 022046.

7. Kupriyanov, V.N. Dew point temperature as overwetting indicator of enclosing structures / V.N. Kupriyanov. – DOI: 10.1051/e3sconf/202127407002 // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 274. – P. 07002.

8. Kornienko, S.V. Clarification of the calculated parameters of the indoor microclimate when assessing the moisture-protective properties of enclosing structures / S.V. Kornienko. – DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.132-145 // Bulletin of MGSU. – 2016. – No. 11. – P. 132–145.

9. Petrov, A.S. Determination of Humidity Conditions of Enclosing Structures by the Color Indicator Method / A.S. Petrov, V.N. Kupriyanov. – DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022064 // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463. – P. 022064.

10. Koroleva, T.I. Methods for calculating the moisture regime of building enclosing structures / T.I. Koroleva, S.M. Myskin // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – No. 1 (50). – P. 64–71.

11. Myskin, S.M. Study of temperature fields of a heterogeneous external wall with a monolithic reinforced concrete frame / S.M. Myskin, T.I. Koroleva, M.A. Ivachev. – DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.20-38 // Construction: science and education. – 2024. – Vol. 14, issue 4. – P. 20–38. – URL: <http://nso-journal.ru>.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628: 004.85

DOI 10.54734/20722958_2026_3_97

АО «Водоснабжение и водоотведение»
Россия, 115054, г. Москва,
Большой Строченовский переулок, 7

Баженов Виктор Иванович,
доктор технических наук, профессор,
исполнительный директор
E-mail: bazhenov@pump.ru

Научно-исследовательский институт
строительной физики РААСН

Россия, 127238, г. Москва,
Локомотивный пр., 21

Примин Олег Григорьевич,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
E-mail: tepper2007@yandex.ru

JSC «Water and Wastewater»

Russia, 115054, Moscow,
7, Bolshoy Strochenovsky Lane

Bazhenov Victor Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor, Executive
Director
E-mail: bazhenov@pump.ru

Research Institute of Construction Physics of
the Russian Academy of Architecture and
Construction Sciences

Russia, 127238, Moscow,
21, Lokomotivny Ave.,

Primin Oleg Grigorievich,
Doctor of Sciences, Professor,
Chief Researcher
E-mail: tepper2007@yandex.ru

МАТРИЦА ВЫБОРА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД: АДАПТАЦИЯ К РОССИЙСКИМ УСЛОВИЯМ

В.И. Баженов, О.Г. Примин

Разработана матрица выбора алгоритмов машинного обучения для задач биологической очистки сточных вод, адаптированная к российским условиям эксплуатации. На основе анализа зарубежных и российско-евразийских исследований систематизированы ансамблевые методы (XGBoost, LightGBM, CatBoost, Random Forest), рекуррентные нейросети (LSTM, GRU), сверточные нейросети (CNN) и методы объяснимого ИИ (SHAP, LIME). Введены количественные пороги для оценки «российской специфики» (объем выборки, доля пропусков). Предложена балльная шкала сравнения алгоритмов по трем критериям: точность, работа с пропусками, интерпретируемость. Показано, что для большинства российских очистных сооружений оптимальным выбором являются ансамблевые методы градиентного бустинга (CatBoost, XGBoost), обеспечивающие приемлемую точность при ограниченных и неполных данных. Сформулированы рекомендации по выбору алгоритмов для пяти типовых задач: прогноз ХПК/БПК, прогноз притока, оптимизация аэрации, диагностика вспухания ила, распознавание микроорганизмов. Обоснована необходимость применения методов объяснимого ИИ (SHAP, LIME) как обязательного компонента внедряемых систем для преодоления барьера доверия со стороны технологического персонала.

Ключевые слова: биологическая очистка, искусственный интеллект, машинное обучение, градиентный бустинг, объяснимый искусственный интеллект, активный ил, российская специфика

MACHINE LEARNING ALGORITHM SELECTION MATRIX FOR BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT: ADAPTATION TO RUSSIAN CONDITIONS

V.I. Bazhenov, O.G. Primin

A machine learning (ML) algorithm selection matrix for biological wastewater treatment has been developed, adapted to Russian operating conditions. Based on an analysis of international and Russian-Eurasian studies, ensemble methods (XGBoost, LightGBM, CatBoost, Random Forest), recurrent neural networks (LSTM, GRU), convolutional neural networks (CNN), and explainable AI methods (SHAP, LIME) have been systematized. Quantitative thresholds for assessing «Russian specifics» (sample size, proportion of missing values) have been introduced. A scoring scale for comparing algorithms based on three criteria is proposed: accuracy, handling of missing values, and interpretability. It has been shown that for most Russian wastewater treatment plants, ensemble gradient boosting methods (CatBoost, XGBoost) are the optimal choice, providing acceptable accuracy with limited and incomplete data. Recommendations are formulated for selecting algorithms for five typical tasks: COD/BOD forecasting, influx forecasting, aeration optimization, sludge swelling diagnostics, and microorganism detection. The need for explainable AI methods (SHAP, LIME) as a mandatory component of implemented systems to overcome the trust barrier of process personnel is substantiated.

Keywords: biological treatment, artificial intelligence, machine learning, gradient boosting, explainable AI, activated sludge, Russian specifics

Введение. Биологическая очистка сточных вод представляет собой сложный динамический процесс, эффективность которого определяется множеством взаимосвязанных факторов: нестабильностью состава и расхода поступающих стоков, сезонными колебаниями температуры, непредсказуемым поведением микробных сообществ активного ила [1]. В этих условиях традиционные методы автоматизации, основанные на ПИД-регуляторах с фиксированными настройками и эмпирических зависимостях, оказываются недостаточно эффективными для поддержания стабильного нормативного качества очистки при минимальных затратах ресурсов [2].

За последние годы методы машинного обучения (МО) прочно входят в арсенал инструментов, применяемых для моделирования и оптимизации процессов водоотведения. Ансамблевые методы (XGBoost, LightGBM, CatBoost, Random Forest) демонстрируют высокую точность прогнозирования таких ключевых показателей, как ХПК, БПК и общий фосфор, составляя до 43 % всех применяемых алгоритмов в данной области [3, 4]. Глубокие нейронные сети (LSTM, GRU) успешно применяются для прогнозирования временных рядов качества воды и оптимизации режимов аэрации, что позволяет снизить выбросы закиси азота на 43 % [5]. Сверточные нейросети открывают возможности для автоматизации микроскопического контроля активного ила [1], а методы объяснимого ИИ (SHAP, LIME) становятся обязательным инструментом для верификации моделей и формирования доверия со стороны технологического персонала [6, 7].

В то же время прямое копирование западных решений в российских условиях наталкивается на серьезные препятствия. Исследования И.А. Гульшина [8] убедительно демонстрируют специфику отечественных очистных сооружений (ограниченный объем исторических данных, высокая доля пропусков в архивах, изношенность парка датчиков и дефицит квалифицированных кадров). Эти факторы делают критически важным не просто выбор «наиболее точного» алгоритма, а осознанный подбор модели, балансирующей между точностью прогноза, требованиями к данным и возможностью интерпретации результата для технолога, несущего ответственность за качество сброса.

Цель исследования – разработка и обоснование матрицы выбора алгоритмов машинного обучения, адаптированной к российским условиям эксплуатации биологических очистных сооружений. В отличие от существующих подходов предлагаемая матрица учитывает не только точность прогноза, но и практическую применимость в условиях ограниченных и неполных данных, характерных для большинства отечественных объектов.

Материалы и методы. В основу исследования положен анализ трех ключевых зарубежных работ, содержащих экспериментальные данные о применении различных алгоритмов МО в задачах биологической очистки.

Дикмен и др. (2025) [3] – исследование выполнено на реальных очистных сооружениях Стамбула (1075 записей, 65 признаков, 6 целевых переменных). Авторы провели сравнительный анализ ансамблевых методов (XGBoost, Random Forest, Gradient Boosting, LightGBM) и деревьев решений с использованием трех методов отбора признаков: SelectKBest, Mutual Information и Recursive Feature Elimination (RFE) с Random Forest. Для оценки качества моделей применялись метрики MAE, RMSE и R^2 .

Фрейшмидт и Кёстер (2025) [5] – исследование посвящено прогнозированию выбросов закиси азота (N_2O) в процессе биологической очистки. Авторы использовали нейросетевые модели (LSTM, GRU), обученные на данных механистического моделирования, в комбинации с генетическим алгоритмом для оптимизации режимов аэрации. Метод позволил снизить эмиссию N_2O на 43 %.

Насир и Ли (2024) [7] – работа, в которой детально проанализировано применение методов объяснимого ИИ (SHAP, LIME) для интерпретации прогнозов качества очистки. Показано, что результаты SHAP- и LIME-объяснений слабо зависят от выбора базовой модели (XGBoost или Random Forest), что критически важно для формирования доверия к «черным ящикам» машинного обучения.

Для оценки применимости алгоритмов в российских условиях дополнительно проанализированы три исследования, выполненные на территории РФ и стран Евразийского экономического союза:

Гульшин И.А. (2025) [8] – работа выполнена по данным очистных сооружений Московской области (140 записей по 15 параметрам) с дополнением лабораторного эксперимента (4303 записи). Автор провел сравнение линейных моделей, деревьев решений и алгоритмов градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM, CatBoost). Достоверность результатов И.А. Гульшина подтверждена международной публикацией [9], где на тех же данных получены идентичные показатели: CatBoost обеспечил SMAPE 9,1 % и ROC-AUC 1,0. Дополнительное исследование И.А. Гульшина и Н.А. Макиши [10] продемонстрировало эффективность ARIMA–LSTM, Prophet, CatBoost и XGBoost для прогнозирования БПК₅ в аэротенках, что согласуется с выводами о применимости ансамблевых методов для российских условий.

Балымова Е.С. и др. (2025) [11] – исследование по моделированию процесса биологической очистки сточных вод нефтехимического производства (4560 записей). Оптимальной признана модель Random Forest с коэффициентом детерминации 87–98 %.

Жылкыбаев Т.С. и др. (2025) [12] – работа выполнена на очистных сооружениях г. Семей (Республика Казахстан), где сравнивались модели MLP, SVR, Lasso и KNN для прогнозирования притока сточных вод. Наилучший результат показал MLP ($R^2 = 0,93$).

Для систематизации алгоритмов применялись методы сравнительного анализа по трем критериям: точность прогноза (на основе метрик MAE, R^2 , SMAPE), требовательность к данным (объем выборки, чувствительность к пропускам в архивах записей) и интерпретируемость (возможность объяснить решение технологу). Обоснование выбора критериев и алгоритмов для сопоставления подтверждено результатами обзорных исследований ансамблевых методов в гидрологии [13, 14].

Результаты и обсуждение.

1. Систематизация алгоритмов по критериям. На основе анализа зарубежных исследований и с учетом российской специфики разработана *матрица выбора алгоритмов*, представленная в табл. 1.

2. Количественная градация российской специфики. Для практической формализации российской специфики введены количественные пороги (уровни данных по объему выборки), характеризующие типовые условия эксплуатации очистных сооружений городов и поселений РФ на основе анализа данных, представленных в [8–12]. Выбор рекомендуемых алгоритмов основан на двух ключевых характе-

ристик данных, определяющих практическую применимость моделей в российских условиях: объеме выборки (количество накопленных исторических записей) и доле пропусков (полнота архивов) (табл. 2):

- *Уровень I (минимальный объем данных):* менее 500 записей, доля пропусков более 30 %. Характерен для малых очистных сооружений, где автоматизированный сбор данных отсутствует или ведется нерегулярно. CatBoost и XGBoost демонстрируют наилучшую устойчивость к пропускам и способность извлекать закономерности из ограниченных выборок [3, 8, 9].

- *Уровень II (средний объем данных):* 500–2000 записей, доля пропусков 10–30 %. Типичен для средних станций с частичной автоматизацией, где SCADA-архивы ведутся, но содержат значительные пробелы. Здесь важен баланс между точностью прогноза и прозрачностью модели. Random Forest обеспечивает хорошую точность, а его «прозрачная» логика (возможность проследить путь решения) позволяет технологу понимать причины прогноза, что критически важно для формирования доверия [11].

- *Уровень III (высокий объем данных):* более 2000 записей, доля пропусков менее 10 %. Достижим на КОС крупных и больших городов (например Москва, Московская область [8, 9], г. Семей [10]) с налаженным онлайн-мониторингом и регулярным ведением архивов. При наличии чистых и полных временных рядов глубокие нейросети (LSTM) и многослойные перцептроны (MLP) способны улавливать сложные нелинейные зависимости, недоступные более простым моделям, и давать максимальную точность прогноза [5, 12, 15, 16].

Т а б л и ц а 1

Сравнительная матрица алгоритмов машинного обучения

Алгоритм	Точность прогноза	Требования к данным	Интерпретируемость	Ограничения	Российская специфика применения
1	2	3	4	5	6
XGBoost	Высокая (MAE 6,25 для ХПК, MAE 1,59 для БПК) [3]	Средние (устойчив к пропускам, эффективен на малых выборках)	Средняя (SHAP) позволяет интерпретировать)	Чувствителен к переобучению при малых выборках; требует настройки гиперпараметров	Оптимален при ограниченных данных (уровень I). Согласно сравнительным исследованиям, входит в число наиболее эффективных алгоритмов для задач прогнозирования [13, 14]
LightGBM	Высокая, сопоставима с XGBoost [3]	Средние, более высокая скорость обучения	Средняя	Может давать сбой на категориальных признаках без предварительного кодирования	Предпочтителен при необходимости быстрого обучения на больших выборках (уровень II–III)
CatBoost	Высокая (SMAPE 9,1 % на российских данных) [8]	Средние, эффективно работает с категориальными признаками	Средняя (SHAP)	Медленнее XGBoost на больших данных	Идеален при наличии категориальных признаков (тип субстрата, точка ввода). Наилучшая устойчивость к пропускам [8, 9]
Random Forest	Высокая (R^2 87–98 % на данных КНИТУ-КАИ) [11]	Средние	Высокая (прозрачная логика, возможность отследить путь решения)	Медленнее бустинга на больших данных; может переобучаться при малых выборках	Хорошая базовая модель для диагностики состояний. Проста в интерпретации, что критически важно для формирования доверия технологов [11]

1	2	3	4	5	6
LSTM / GRU	Очень высокая на временных рядах (R^2 до 0,93 на казахстанских данных) [12]	Высокие (требуют чистых рядов за 2–3 года)	Низкая («черный ящик», сложно интерпретировать)	Требуют больших чистых выборок; склонны к переобучению	Применимы только на КОС крупных и больших городов с налаженным онлайн-мониторингом (уровень III). Без качественных данных результат непредсказуем [12]
CNN (для изображений)	Высокая (Dice >0,86) [1]	Высокие (требуют больших размеченных наборов изображений)	Средняя (Grad-CAM, карты активации)	Требуют размеченных наборов изображений; дороги в обучении	Перспективны для автоматизации микроскопии, но требуют создания российских баз изображений активного ила
MLP/SVR/ KNN / Lasso	Средняя – высокая (R^2 до 0,93 для MLP) [12]	Средние (эффективны при правильно подобранных признаках)	Средняя (зависит от модели)	Критически зависят от предобработки и масштабирования данных	Могут использоваться как альтернатива бустингу при наличии качественных данных и четкой постановке задачи. MLP показал хорошие результаты на чистых временных рядах [12]

Т а б л и ц а 2

Рекомендуемые алгоритмы в зависимости от объема и качества данных

Уровень данных	Объем выборки	Доля пропусков	Рекомендуемый алгоритм	Обоснование
I (минимальный)	< 500	> 30 %	CatBoost / XGBoost	Устойчивы к пропускам, эффективны на малых выборках [3, 8, 9]
II (средний)	500–2000	10–30 %	Random Forest	Хороший баланс точности и интерпретируемости [11]
III (высокий)	> 2000	< 10 %	LSTM / MLP	Требуют больших чистых выборок, дают высокую точность [5, 12, 15, 16]

Таким образом, не бывает «лучшего алгоритма в принципе». Бывает лучший алгоритм для *ваших данных*. Рекомендации по последовательности действий технолога достаточно просты:

- *Оцените свои данные.* Откройте архив станции: Сколько записей? Как часто они прерываются?
- *Выберите свой уровень* по табл. 2.
- *Следуйте табл. 2.* Если уровень I → принимайте CatBoost или XGBoost. Если уровень II → ваша модель Random Forest. Если уровень III → можно смело пробовать LSTM или MLP.
- *Не забывайте про доверие.* Модель работает только тогда, когда ей доверяет технолог. На уровнях I и II интерпретируемость не менее важна, чем точность. Именно поэтому Random Forest на уровне II – идеальный баланс. Уровень III – ваши данные готовы к серьезному МО (выбирайте LSTM или MLP).

3. Балльная оценка алгоритмов. Для обеспечения сопоставимости алгоритмов введена единая балльная шкала оценки по трем критериям (1 – наихудшее, 5 – наилучшее). Оценки присвоены на основе анализа работ [3, 5, 7–14] и экспертной интерпретации (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Сводная балльная оценка алгоритмов

Алгоритм	Точность прогноза	Работа с пропусками	Интерпретируемость	Суммарный балл
XGBoost	5	4	3	12
LightGBM	5	4	3	12
CatBoost	5	5	3	13
Random Forest	4	4	5	13
LSTM / GRU	5	2	1	8
CNN (изображения)	4	2	3	9
MLP	4	3	2	9
SVR	3	3	2	8
KNN	3	2	3	8
Lasso	3	3	4	10

П р и м е ч а н и е . CatBoost получил максимальный балл за работу с пропусками (5) благодаря встроенной обработке категориальных признаков и устойчивости к выбросам, подтвержденной в исследовании И.А. Гульшина [8, 9]. Международные исследования [17, 18] также подтверждают, что связка «CatBoost + SHAP» является эффективным инструментом для прогнозирования показателей очистки и анализа механизмов процесса. Random Forest лидирует по интерпретируемости (5) за счет прозрачной логики и возможности отследить путь решения, что особенно ценно для задач, где технологу необходимо понимать причины решения [11].

4. Рекомендации по выбору алгоритмов для типовых задач. На основе анализа источников [3, 5, 7–14] сформированы рекомендации по выбору алгоритмов для пяти ключевых задач управления биологической очисткой. Рекомендации в табл. 4 *не являются универсальными* для любого объема и качества данных. Они указывают на *наиболее эффективный алгоритм* для каждой задачи при условии, что данные соответствуют требованиям этого алгоритма.

Вывод для технолога: табл. 4 отвечает на вопрос «Какой алгоритм лучше всего подходит для моей задачи?» При этом табл. 2 отвечает на вопрос «Позволяют ли мои данные использовать этот алгоритм?» Следует *совместно* использовать табл. 2 и 4. Сначала по табл. 2 определите уровень своих данных, затем по табл. 4 выберите алгоритм, который:

- подходит для вашей задачи и при этом соответствует уровню ваших данных.

Т а б л и ц а 4

Рекомендации по выбору алгоритмов для типовых задач

Задача	Рекомендуемый алгоритм	Альтернатива	Обоснование (источник)	Необходимые условия для применения
1	2	3	4	5
Прогноз ХПК, БПК, общего фосфора	XGBoost / LightGBM	Random Forest	[3] показана наименьшая ошибка прогноза (MAE 6,25 для ХПК)	Данные уровня I–II (устойчивы к пропускам, работают на малых выборках)

1	2	3	4	5
Прогноз притока сточных вод (временные ряды)	MLP (при чистых данных)	LSTM (при больших выборках)	[12]: MLP достиг $R^2 = 0,93$. [15]: подтверждена эффективность MLP для прогнозирования притока ($R^2 = 0,87-0,90$) с интеграцией в системы управления. [16] – показано, что прогнозирование притока чувствительно к качеству данных	Данные уровня III (чистые временные ряды, малая доля пропусков)
Оптимизация режимов аэрации / снижение N_2O	Нейросети + генетический алгоритм	RL (обучение с подкреплением)	[5]: достигнуто снижение выбросов на 43 %	Данные уровня II–III (достаточный объем для обучения нейросети)
Диагностика нитчатого вспухания активного ила	CatBoost	XGBoost	[8, 9]: обосновано $ROC-AUC = 1,0$; $SMAPE = 9,1$ %	Данные уровня I–II (устойчив к пропускам, работает на малых выборках)
Распознавание микроорганизмов (микроскопия)	Random Forest	CNN	[11]: обосновано $R^2 = 87-98$ %; CNN требует больших баз изображений	Данные уровня II (средний объем, размеченные изображения)
Интерпретация решений (XAI)	SHAP / LIME (настройка)	–	[6, 7]: обосновано, что объяснения слабо зависят от базовой модели	Данные уровня I (SHAP / LIME объясняют прогноз даже на малой выборке)

Если данные уровня I, а задача требует LSTM – решение не сработает. И наоборот: если данные уровня III, а вы используете CatBoost – вы недополучите точность, которую могли бы достичь.

5. Роль объяснимого ИИ (XAI) в адаптации моделей. В российских условиях проблема доверия к ИИ стоит особенно остро. Одним из главных препятствий внедрения является скептицизм технологического персонала, привыкшего полагаться на собственный опыт и не доверяющего «черным ящикам». Операторы готовы использовать ИИ только тогда, когда понимают логику его решений и могут соотнести их с собственным опытом и технологическим регламентом. Это приводит к тому, что даже высокоточные модели, не снабженные механизмами интерпретации, остаются невостребованными – технолог не рискует принимать решение на основе непроверяемого прогноза, за который он несет персональную ответственность.

Методы объяснимого ИИ (SHAP, LIME) «вскрывают чёрный ящик», показывая вклад каждого фактора в прогноз. Для упрощения приведем пример некоторого заключения XAI: на 60 % прогноз превышения аммония обусловлен ростом концентрации на входе, на 30 % – падением температуры, на 10 % – снижением дозы ила. Это превращает «чёрный ящик» в «прозрачный», или «объяснимый».

Исследования [6, 7] демонстрируют, что SHAP- и LIME-объяснения слабо зависят от выбора базовой модели (XGBoost или Random Forest). Это означает, что интерпретации, получаемые от разных алгоритмов, согласованы между собой, что повышает доверие к ним. Более того, сравнение результатов feature selection и SHAP-анализа показало их высокую корреляцию, что позволяет использовать XAI не только для постфактум объяснений, но и для валидации моделей и выявления скрытых зависимостей.

Для российской практики это означает, что внедрение даже относительно простых моделей (например XGBoost) в комплексе с SHAP-дашбордами, визуализирующими причины решений, способно кардинально повысить приемлемость ИИ для технологов.

6. Валидация матрицы на российских и евразийских кейсах. Предлагаемая матрица выбора алгоритмов подтверждается результатами применения различных моделей на российских и евразийских объектах.

CatBoost (исследование И.А. Гульшина [8, 9]), SMAPE 9,1 %, ROC-AUC 1,0, демонстрирует оптимальность для задач регрессии и бинарной классификации при ограниченных данных. Автором сформулированы практические рекомендации по подготовке данных (удаление дубликатов, обработка пропусков методом Pairwise Deletion, использование робастного масштабирования), что особенно ценно для российских условий. Дополнительное исследование И.А. Гульшина и Н.А. Макиши [10] показало, что CatBoost и XGBoost входят в число наиболее эффективных алгоритмов для прогнозирования характеристик сточных вод в аэротенках, что подтверждает универсальность ансамблевых методов. Международные исследования [17, 18] также подтверждают высокую эффективность связки CatBoost и XGBoost с SHAP-анализом для прогнозирования и оптимизации сложных биологических процессов.

Random Forest (исследование КНИТУ-КАИ [11]), R^2 87–98 %, подтверждает эффективность для задач распознавания и классификации при наличии достаточного объема размеченных данных. Моделирование позволяет оценить условия функционирования активного ила под воздействием токсикантов, что дает возможность оператору принимать обоснованные решения о приеме сточных вод на очистку.

MLP (исследование Т.С. Жылкыбаева и др. [12]), R^2 0,93, показывает, что при наличии качественных временных рядов нейросетевые модели могут быть эффективны, но требуют более строгих условий по качеству данных. Полученные прогнозные данные интегрируются с SCADA-системой для оптимизации управления аэрацией. Группа канадских и китайских ученых [15] подтвердила, что MLP достигает $R^2 = 0,87–0,90$ для прогнозирования притока сточных вод, а интеграция прогнозов с системами управления позволяет снизить энергопотребление. Ирландские ученые [16] отметили, что выбор модели зависит от качества данных, что полностью согласуется с предложенной градацией уровней.

7. Составляющие экономического эффекта. Экономический эффект от внедрения рекомендуемых алгоритмов на типовой очистной станции производительностью 100 тыс. м³/сут складывается из трех основных компонентов, выявленных на основе анализа данных работ [5, 8, 12] и типовых эксплуатационных показателей:

1. *Снижения энергопотребления на аэрацию (10–15 %)*, которое достигается за счет интеллектуального управления аэрацией, позволяющего подавать кислород в точном соответствии с фактической потребностью микроорганизмов, а не по фиксированному графику [5]. Аэрация составляет до 70 % общего энергопотребления очистных сооружений, поэтому даже 10–15 % экономии дают значительный эффект.

2. *Сокращения реагентных затрат (8–12 %)*, которое достигается за счет точного прогнозирования состава поступающих сточных вод и предиктивного дозирования коагулянтов и флокулянтов [8]. Исключается перерасход реагентов в периоды низкой нагрузки и гарантируется достаточная доза в периоды пиковых нагрузок.

3. *Снижения рисков аварийных сбросов и штрафных санкций*, которое достигается благодаря раннему обнаружению аномалий (залповых сбросов, дрейфа датчиков, отклонений технологических параметров) и предиктивной диагностике состояния оборудования [12]. Это предотвращает выход оборудования из строя и сброс неочищенных стоков в водные объекты, что влечет за собой административные и экологические штрафы.

Выводы

1. На основе анализа зарубежных исследований и с учетом российской специфики разработана матрица выбора алгоритмов машинного обучения для задач биологи-

ческой очистки сточных вод. Матрица систематизирует алгоритмы по трем критериям: точность прогноза (на основе метрик MAE, R^2 , SMAPE), требовательность к данным (объем выборки, чувствительность к пропускам) и интерпретируемость (возможность объяснить решение технологу).

2. *Ансамблевые методы градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM, CatBoost) являются оптимальным выбором для большинства российских очистных сооружений.* Они обеспечивают приемлемую точность даже при наличии пропусков и выбросов (SMAPE 9,1 % в исследовании И.А. Гульшина [8, 9]), что критически важно для работы с «грязными» и разреженными данными, характерными для отечественной практики.

3. *XAI-инструменты (SHAP, LIME) должны стать обязательным компонентом внедряемых систем ИИ.* Их применение позволяет технологам понимать логику решений, верифицировать соответствие моделей физико-химическим закономерностям и формировать доверие к «черным ящикам» [6, 7].

4. *Random Forest остается хорошей базовой моделью для диагностики состояний.* Простота интерпретации (прозрачная логика, возможность отследить путь решения) делает ее предпочтительной для задач, где объяснимость критически важна [11].

5. *LSTM/GRU и CNN применимы только на крупных станциях с налаженным онлайн-мониторингом.* Высокая требовательность к чистоте и полноте данных (чистые ряды за 2–3 года) ограничивает их использование в российских условиях, где исторические архивы часто содержат пропуски и выбросы [5, 12, 15, 16].

6. *Модели MLP, SVR, Lasso, KNN могут использоваться как альтернатива бустингу при наличии качественных данных и четкой постановке задачи.* Однако их эффективность существенно зависит от предобработки данных и правильного подбора гиперпараметров [12, 15, 16].

7. *Необходима актуализация нормативно-методической базы.* Действующие строительные нормы и правила (СНиП, СП) и методики технологического расчета не учитывают возможность адаптивного управления очистными сооружениями на основе ИИ. Внедрение разработанной матрицы выбора алгоритмов и методов XAI требует разработки и утверждения соответствующих ГОСТов или изменений в существующие своды правил (в частности, СП 517.1325800, СП 32.13330), регламентирующих применение цифровых моделей, систем предиктивной аналитики и автоматизированного контроля технологических параметров.

8. *Практическая значимость разработанной матрицы заключается в возможности для технологов очистных сооружений обоснованно подбирать модели машинного обучения под конкретные производственные задачи – от прогнозирования качества очистки до диагностики состояния активного ила.* Результаты работы могут быть использованы при реконструкции действующих и проектировании новых очистных сооружений, а также при разработке образовательных программ для технологического персонала.

Список литературы

1. Capodaglio, A.G. Use, Potential, Needs, and Limits of AI in Wastewater Treatment Applications / A.G. Capodaglio, A. Callegari. – DOI: 10.3390/w17020170 // Water. – 2025. – Vol. 17, No. 2. – P. 170.
2. Sheik, A.G. Insights into the application of explainable artificial intelligence for biological wastewater treatment plants: Updates and perspectives / A.G. Sheik, A. Kumar, C.S. Srungavarapu, M. Azari, S.R. Ambati, F. Bux, A.K. Patan. – DOI: 10.1016/j.engappai.2024.110132 // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 144. – P. 110132.
3. Dikmen, F. AI-driven wastewater management through comparative analysis of feature selection techniques and predictive models / F. Dikmen, A. Demir, B. Ozkaya, M.O. Raza, J. Rasheed, T. Asuroglu, S. Alsubai. – DOI: 10.1038/s41598-025-07124-0 // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 25347.

4. Rodríguez López, L. A Bibliometric-Systematic Literature Review (B-SLR) of Machine Learning-Based Water Quality Prediction: Trends, Gaps, and Future Directions / L. Rodríguez López, J.A. Muñoz-Alegria, J. Núñez, R. Oyarzún, C.A. Chávez, J.L. Arumí. – DOI: 10.3390/w17202994 // *Water*. – 2025. – Vol. 17, No. 20. – P. 2994.
5. Freyschmidt, A. Novel approach for AI-based N₂O emission reduction in biological wastewater treatment relying on genetic algorithms and neural networks / A. Freyschmidt, S. Köster. – DOI: 10.2166/wst.2025.060 // *Water Science & Technology*. – 2025. – Vol. 91, No. 10. – P. 1172–1184.
6. Nasir, F.B. Application of explainable artificial intelligence and machine learning in wastewater treatment plants variable prediction: A comparative study of small and large-scale treatment plants / F.B. Nasir, J. Li. – DOI: 10.1039/D5VA00408J // *Environmental Science: Advances*. – 2026.
7. Nasir, F.B. Comparative Analysis of Machine Learning Models and Explainable Artificial Intelligence for Predicting Wastewater Treatment Plant Variables / F.B. Nasir, J. Li. – DOI: 10.21926/aer.2404020 // *Advances in Environmental and Engineering Research*. – 2024. – Vol. 5, No. 4. – P. 1–23.
8. Гульшин, И.А. Автоматизация системы управления процессами очистки сточных вод с помощью методов машинного обучения / И.А. Гульшин. – DOI: 10.22227/2311-1518.2025.1.96-103 // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. – 2025. – № 1. – С. 96–103.
9. Gulshin, I. Machine Learning Methods for the Prediction of Wastewater Treatment Efficiency and Anomaly Classification with Lack of Historical Data / I. Gulshin, O. Kuzina. – DOI: 10.3390/app142210689 // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 22. – P. 10689.
10. Gulshin, I. Predicting Wastewater Characteristics Using Artificial Neural Network and Machine Learning Methods for Enhanced Operation of Oxidation Ditch / I. Gulshin, N. Makisha. – DOI: 10.3390/app15031351 // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 3. – P. 1351.
11. Балымова, Е.С. Моделирование процесса биологической очистки сточных вод нефтехимического производства / Е.С. Балымова, А.Р. Новикова, Р.К. Закиров, Ф.Ю. Ахмадуллина. – DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-166-175 // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2025. – Т. 27, № 1(123). – С. 166–175.
12. Жылкыбаев, Т.С. Исследование работы интеллектуальных систем управления водоочистными сооружениями / Т.С. Жылкыбаев, А.Д. Золотов, Б.К. Копабаева, Н.К. Алгазинов, Д.А. Жумагажинов, Г.Ж. Шуйтенов. – DOI: 10.53360/2788-7995-2025-2(18)-7 // *Вестник Университета Шакарима. Технические науки*. – 2025. – № 2(18). – С. 57–70.
13. Zounemat-Kermani, M. Interpretable boosting algorithms for prediction and data imputation of River Sediment / M. Zounemat-Kermani, M. Kheimi. – DOI: 10.1016/j.asoc.2025.114378 // *Applied Soft Computing*. – 2026. – Vol. 187. – 114378.
14. Zounemat-Kermani, M. Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review / M. Zounemat-Kermani, O. Batelaan, M. Fadaee, R. Hinkelmann. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126266 // *Journal of Hydrology*. – 2021. – Vol. 598. – 126266.
15. Zhou, P. Online machine learning for stream wastewater influent flow rate prediction under unprecedented emergencies / P. Zhou, Z. Li, Y. Zhang, S. Snowling, J. Barclay. – DOI: 10.1007/s11783-023-1752-7 // *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. – 2023. – Vol. 17. – No. 12.
16. Giberti, M. Forecasting wastewater flows and pollutant loads: A comparison of data-driven models within the urban water system framework / M. Giberti, R.K. Dereli, M. Bahramian, D. Flynn, E. Casey. – DOI: 10.1016/j.jece.2024.113478 // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 12, No. 5. – P. 113478.
17. Saleem, M.A. Explainable machine learning methods for predicting water treatment plant features under varying weather conditions / M.A. Saleem, F. Harrou, Y. Sun. – DOI: 10.1016/j.rineng.2024.101930 // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 21. – P. 101930.

18. Jiang, J. Optimization of a Novel Engineered Ecosystem Integrating Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Sulfur Biotransformation for Saline Wastewater Treatment Using an Interpretable Machine Learning Approach / J. Jiang, X. Xiang, Q. Zhou, L. Zhou, X. Bi, S.K. Khanal [et al.]. – DOI: 10.1021/acs.est.4c03160 // *Environmental Science & Technology*. – 2024. – Vol. 58, No. 29. – P. 12989–12999.

References

1. Capodaglio, A.G. Use, Potential, Needs, and Limits of AI in Wastewater Treatment Applications / A.G. Capodaglio, A. Callegari. – DOI: 10.3390/w17020170 // *Water*. – 2025. – Vol. 17, No. 2. – P. 170.

2. Sheik, A.G. Insights into the application of explainable artificial intelligence for biological wastewater treatment plants: Updates and perspectives / A.G. Sheik, A. Kumar, C.S. Srungavarapu, M. Azari, S.R. Ambati, F. Bux, A.K. Patan. – DOI: 10.1016/j.engappai.2024.110132 // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2025. – Vol. 144. – P. 110132.

3. Dikmen, F. AI-driven wastewater management through comparative analysis of feature selection techniques and predictive models / F. Dikmen, A. Demir, B. Ozkaya, M.O. Raza, J. Rasheed, T. Asuroglu, S. Alsubai. – DOI: 10.1038/s41598-025-07124-0 // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – P. 25347.

4. Rodríguez López, L.A. Bibliometric-Systematic Literature Review (B-SLR) of Machine Learning-Based Water Quality Prediction: Trends, Gaps, and Future Directions / L. Rodríguez López, J.A. Muñoz-Alegría, J. Núñez, R. Oyarzún, C.A. Chávez, J.L. Arumí. – DOI: 10.3390/w17202994 // *Water*. – 2025. – Vol. 17, No. 20. – P. 2994.

5. Freyschmidt, A. Novel approach for AI-based N₂O emission reduction in biological wastewater treatment relying on genetic algorithms and neural networks / A. Freyschmidt, S. Köster. – DOI: 10.2166/wst.2025.060 // *Water Science & Technology*. – 2025. – Vol. 91, No. 10. – P. 1172–1184.

6. Nasir, F.B. Application of explainable artificial intelligence and machine learning in wastewater treatment plants variable prediction: A comparative study of small and large-scale treatment plants / F.B. Nasir, J. Li. – DOI: 10.1039/D5VA00408J // *Environmental Science: Advances*. – 2026.

7. Nasir, F.B. Comparative Analysis of Machine Learning Models and Explainable Artificial Intelligence for Predicting Wastewater Treatment Plant Variables / F.B. Nasir, J. Li. – DOI: 10.21926/aeer.2404020 // *Advances in Environmental and Engineering Research*. – 2024. – Vol. 5, No. 4. – P. 1–23.

8. Gulshin, I.A. Automation of the wastewater treatment process control system using machine learning methods / I.A. Gulshin. – DOI: 10.22227/2311-1518.2025.1.96-103 // *Biosphere compatibility: man, region, technology*. – 2025. – No. 1. – P. 96–103.

9. Gulshin, I. Machine Learning Methods for the Prediction of Wastewater Treatment Efficiency and Anomaly Classification with Lack of Historical Data / I. Gulshin, O. Kuzina. – DOI: 10.3390/app142210689 // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 22. – P. 10689.

10. Gulshin, I. Predicting Wastewater Characteristics Using Artificial Neural Network and Machine Learning Methods for Enhanced Operation of Oxidation Ditch / I. Gulshin, N. Makisha. – DOI: 10.3390/app15031351 // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 3. – P. 1351.

11. Balymova, E.S. Modeling of the process of biological treatment of wastewater from petrochemical production / E.S. Balymova, A.R. Novikova, R.K. Zakirov, F.Yu. Akhmadullina. – DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-166-175 // *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2025. – Vol. 27, No. 1(123). – P. 166–175.

12. Zhylykbaev, T.S. Study of the operation of intelligent control systems for water treatment facilities / T.S. Zhylykbaev, A.D. Zolotov, B.K. Kopabaeva, N.K. Algazinov, D.A. Zhumagazhinov, G.Zh. Shuytenov. – DOI: 10.53360/2788-7995-2025-2(18)-7 // *Bulletin of Shakarim University. Technical sciences*. – 2025. – No. 2(18). – P. 57–70.

13. Zounemat-Kermani, M. Interpretable boosting algorithms for prediction and data imputation of River Sediment / M. Zounemat-Kermani, M. Kheimi. – DOI: 10.1016/j.asoc.2025.114378 // Applied Soft Computing. – 2026. – Vol. 187. – 114378.

14. Zounemat-Kermani, M. Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review / M. Zounemat-Kermani, O. Batelaan, M. Fadaee, R. Hinkelmann. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126266 // Journal of Hydrology. – 2021. – Vol. 598. – 126266.

15. Zhou, P. Online machine learning for stream wastewater influent flow rate prediction under unprecedented emergencies / P. Zhou, Z. Li, Y. Zhang, S. Snowling, J. Barclay. – DOI: 10.1007/s11783-023-1752-7 // Frontiers of Environmental Science & Engineering. – 2023. – Vol. 17. – No. 12.

16. Giberti, M. Forecasting wastewater flows and pollutant loads: A comparison of data-driven models within the urban water system framework / M. Giberti, R.K. Dereli, M. Bahramian, D. Flynn, E. Casey. – DOI: 10.1016/j.jece.2024.113478 // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 12, No. 5. – P. 113478.

17. Saleem, M.A. Explainable machine learning methods for predicting water treatment plant features under varying weather conditions / M.A. Saleem, F. Harrou, Y. Sun. – DOI: 10.1016/j.rineng.2024.101930 // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 21. – P. 101930.

18. Jiang, J. Optimization of a Novel Engineered Ecosystem Integrating Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Sulfur Biotransformation for Saline Wastewater Treatment Using an Interpretable Machine Learning Approach / J. Jiang, X. Xiang, Q. Zhou, L. Zhou, X. Bi, S.K. Khanal [et al.]. – DOI: 10.1021/acs.est.4c03160 // Environmental Science & Technology. – 2024. – Vol. 58, No. 29. – P. 12989–12999.

Термины и определения

Термин	Определение	Краткое пояснение
1	2	3
ИИ (AI)	Искусственный интеллект	Общее название систем, способных выполнять интеллектуальные задачи
МО (ML)	Машинное обучение	Подмножество ИИ; алгоритмы, обучающиеся на данных без явного программирования
Бустинг	Градиентное усиление (boosting)	Последовательное усиление слабых моделей для получения сильного предиктора
RL	Reinforcement Learning	Обучение с подкреплением – метод, при котором агент обучается на основе обратной связи от среды
XAI	Explainable AI (Объяснимый ИИ)	Методы, позволяющие понять, почему модель приняла то или иное решение. Примечание: В отличие от «черного ящика», где результат есть, но логика непонятна, XAI показывает, какие именно факторы (например, повышение температуры, рост концентрации аммония) повлияли на прогноз
«чёрный ящик»		Модель МО, внутренний механизм работы которой настолько сложен, что человек (технолог, оператор, инженер) не может понять, почему модель приняла то или иное решение
LSTM	Long Short-Term Memory	Тип нейросети, эффективный для анализа временных рядов (прогноз качества воды, притока)
GRU	Gated Recurrent Unit	Упрощенная версия LSTM с меньшим числом параметров.
CNN	Convolutional Neural Network	Сверточная нейросеть; используется для анализа изображений (микроскопия ила).

1	2	3
SHAP	SHapley Additive exPlanations	Метод XAI, оценивающий вклад каждого параметра в прогноз модели
LIME	Local Interpretable Model-agnostic Explanations	Метод XAI, создающий локальные объяснения для отдельных прогнозов
Random Forest	Случайный лес	Ансамблевый алгоритм, строящий множество деревьев решений и усредняющий результат
XGBoost	Extreme Gradient Boosting	Алгоритм градиентного бустинга – один из самых эффективных для табличных данных
LightGBM	Light Gradient Boosting Machine	Реализация градиентного бустинга от Microsoft, оптимизированная для скорости
CatBoost	Categorical Boosting	Алгоритм бустинга, эффективно работающий с категориальными признаками
MLP	Multilayer Perceptron	Многослойный перцептрон – классическая нейросеть прямого распространения
SVR	Support Vector Regression	Регрессия на основе метода опорных векторов
KNN	K-Nearest Neighbors	Метод k-ближайших соседей для регрессии и классификации
Lasso	Least Absolute Shrinkage and Selection Operator	Линейная регрессия с L1-регуляризацией; обнуляет коэффициенты незначимых признаков
MAE	Mean Absolute Error	Метрика регрессии – средний модуль отклонения прогноза от факта
SMAPE	Symmetric Mean Absolute Percentage Error	Симметричная средняя абсолютная процентная ошибка
ROC-AUC	Receiver Operating Characteristic – Area Under Curve	Метрика качества бинарной классификации; площадь под ROC-кривой
R ²	Коэффициент детерминации	Метрика качества регрессии; доля изменчивости целевого показателя, объясненная моделью
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	Система диспетчерского управления и сбора данных

Институт химии твердого тела и
механохимии Сибирского отделения РАН
Россия, 630128, Новосибирск, Кутателадзе, 18,
тел.: (383) 332-40-02

Варенцов Валерий Константинович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: vkvarentsov@rambler.ru

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Кузина Валентина Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы», действительный
член Нью-Йоркской академии наук

*Institute of Solid and Mechanochemistry of
the Siberian Branch of RAS*
Russia, 630128, Novosibirsk, 18, Kutateladze St.,
tel.: (383) 332-40-02

Varentsov Valery Konstantinovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: vkvarentsov@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Kuzina Valentina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Information and
Computing Systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Koshev Aleksander Nikolaevich,
Doctor of Chemical Sciences, Professor of the
Department «Information and Computing
Systems», Full member of the New York
Academy of Sciences

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00135,
<https://rscf.ru/project/25-21-00135/>.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИОНОВ ЦЕРИЯ КАК ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРООКИСЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ОБЕЗВРЕЖИВАНИИ СТОЧНЫХ ВОД

В.К. Варенцов, В.В. Кузина, А.Н. Кошев

Приведены методы определения концентраций ионов Ce^{3+} , Ce^{4+} в реакции окисления ионов церия при решении экологических проблем очистки сточных вод и переработки промышленных отходов. Проведены полярографические исследования электродных реакций окисления Ce^{3+} и восстановления Ce^{4+} в растворе серной кислоты. Представлены основанные на преобразовании уравнения диффузии математические модели, позволяющие рассчитывать концентрации ионов металлов, участвующих в окислительно-восстановительных процессах. Показана эффективность применения экспериментальных и математических методов для определения концентраций ионов окислительно-восстановительной реакции $Ce^{3+} = Ce^{4+} + e$. Обоснованы целесообразность совместного использования приведенных методов и их соответствие.

Ключевые слова: обезвреживание сточных вод, электроокисление органических соединений, концентрация ионов Ce^{3+} и Ce^{4+} , поляризационная кривая, математическое моделирование

DETERMINING CERIUM ION CONCENTRATIONS AS PROCESS PARAMETERS OF THE ELECTROOXIDATION OF ORGANIC COMPOUNDS DURING WASTEWATER TREATMENT

V.K. Varentsov, V.V. Kuzina, A.N. Koshev

Methods for calculating the concentrations of Ce^{3+} and Ce^{4+} ions in oxidation reaction of cerium ions at solving environmental problems of wastewater treatment and industrial waste recycling are

presented. Polarographic studies of the electrode reactions of Ce^{3+} oxidation and Ce^{4+} reduction in a sulfuric acid solution are conducted. Mathematical models based on the transformation of the diffusion equation are presented, allowing the calculation of the concentrations of metal ions involved in oxidation-reduction processes. The effectiveness of using experimental and mathematical methods for determining the ion concentrations of the oxidation-reduction reaction $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$ is demonstrated. The feasibility of combining these methods and their compatibility is substantiated.

Keywords: wastewater treatment, electrooxidation of organic compounds, Ce^{3+} and Ce^{4+} ion concentration, polarization curve, mathematical modeling

Использование реакции окисления ионов церия для решения экологических проблем очистки сточных вод и переработки промышленных отходов, а также в гидрометаллургической технологии извлечения редкоземельных элементов определяет необходимость изучения электрохимического процесса, основу которого составляет реакция $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$ [1]. Электроокисление Ce^{3+} используется при обезвреживании органических соединений, таких, как блескообразующие добавки и поверхностно-активные вещества, присутствующие в промышленных сточных водах гальванических производств. В подобных процессах церий выступает в роли высокореакционного реагента, взаимодействующего с органическими соединениями благодаря высокой окислительной способности, определяемой стандартным окислительно-восстановительным потенциалом реакции, 1,61 В. Задача электроокисления Ce^{3+} , в том числе электрохимическими методами, рассмотрена в ряде публикаций [2–9]. Поэтому определение параметров процесса электроокисления ионов Ce^{3+} , обеспечивающих высокую эффективность генерации ионов Ce^{4+} , как и их определение полярографическим методом, является актуальной задачей электрохимической технологии.

Анодная и катодная плотности тока реакции $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$ пропорциональны концентрациям ионов трехвалентного и четырехвалентного церия соответственно [10]. Известно также [10], что эффективность процесса зависит от степени перемешивания электролита, которая определяет механизм процесса, лимитируемого диффузией при потенциалах, далеких от равновесного. Однако при приближении к равновесному потенциалу процесс дополняется параллельной реакцией выделения кислорода, что, естественно, усложняет механизм реакции. Из вышеуказанного следует, что при использовании реакции $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$, обеспечивающей эффективное обезвреживание токсичных веществ растворов, требуется контроль концентраций ионов Ce^{3+} , Ce^{4+} в растворе электролита.

Для решения задачи определения концентраций ионов трех- и четырехзарядной формы церия в электролите проведены полярографические исследования¹ электродных реакций окисления Ce^{3+} и восстановления Ce^{4+} в растворе серной кислоты с использованием платинового электрода с обновляемой в исследуемом растворе поверхностью и каломельным электродом сравнения [2]. Диаметр платинового электрода составлял 0,5 мм [11, 12]. По результатам исследования изучена возможность определения концентрации Ce^{3+} и Ce^{4+} полярографическим методом.

Анодные поляризационные кривые представлены на рис. 1. Достаточно четко определяется площадка предельного тока реакции окисления $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$, которая соответствует значениям потенциала электрода в интервале 1,35–1,5 В.

На рис. 2 приведен график зависимости плотности предельного тока реакции окисления от концентрации ионов Ce^{3+} в 1 М растворе серной кислоты.

Экспериментально были получены поляризационные кривые при разных значениях концентрации серной кислоты в электролите в интервале от 0,25 М до 1 М. Исследования показали отсутствие влияния концентрации серной кислоты на результаты полярографических измерений процесса окисления Ce^{3+} до формы Ce^{4+} . Такой вывод позволяет утверждать, что полученные поляризационные кривые могут использоваться для определения концентрации ионов Ce^{3+} в исследуемом растворе.

¹ Экспериментальные исследования проводились профессором В.К. Варенцовым совместно с В.И. Варенцовой и Бушаковым И.Д. в Институте химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН.

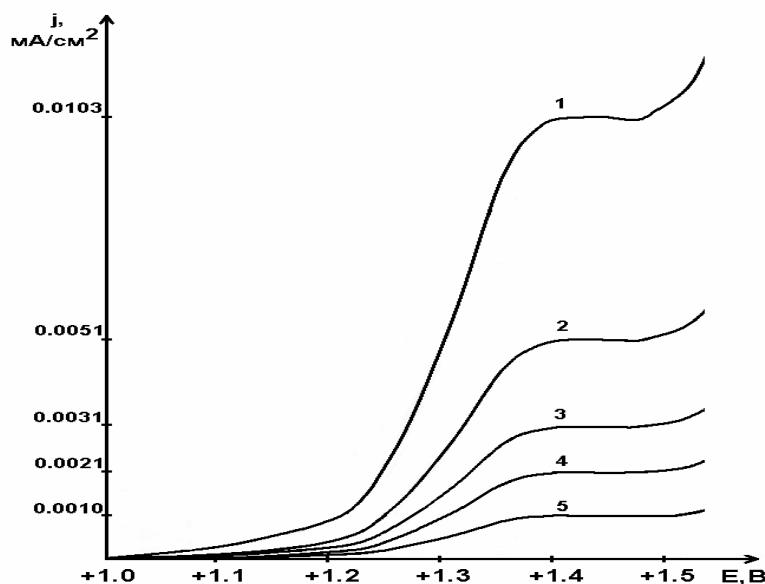


Рис. 1. Поляризационные кривые электродной реакции $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$ в 1 М растворе серной кислоты при концентрации Ce^{3+} : 1 – 10 г/л; 2 – 5 г/л; 3 – 3 г/л; 4 – 2 г/л; 5 – 1 г/л. Скорость развертки потенциала – $V = 50$ мВ/с

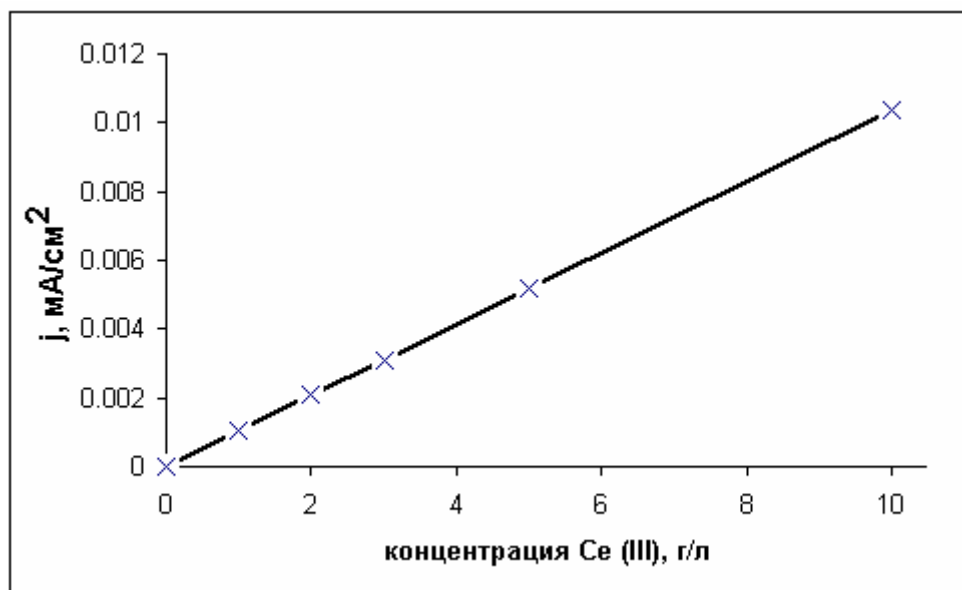


Рис. 2. Зависимость плотности предельного тока от концентрации Ce^{3+} в 1 М растворе серной кислоты

Полярографический метод определения концентрации трехзарядного церия достаточно точен, однако для его реализации необходимо выполнить определенный объем исследований, что не всегда удобно при проведении быстрых экспресс-анализов с целью контроля ионов Ce^{3+} в обрабатываемых растворах. Для выполнения расчетов концентрации трехвалентного церия в экспресс-анализах на основе поляризационных кривых предлагается использовать разработанные нами математические модели и вычислительные методы, основы которых опубликованы, например, в работах [13, 14].

Математическая модель хроновольтамперометрических процессов в простом электролите представляет собой параболическое уравнение диффузии с соответствующими начальными и граничными условиями на функцию концентрации $C(x, \tau)$,

распределенной в интервале, соответствующем диффузионному слою толщиной δ , $0 \leq x \leq \delta$, и во времени:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$C(x, 0) = C_0; \quad C(\delta, \tau) = C_0; \quad \frac{\partial C}{\partial x}(0, \tau) = \frac{i(\tau)}{zFD}, \quad (2)$$

где C_0 – концентрация Ce^{3+} в глубине раствора; $i(\tau)$ – плотность поляризующего тока на электроде, связанная с потенциалом электрода $E(\tau)$ уравнением

$$i(\tau) = i_0 \left(\frac{C(0, \tau)}{C_0} e^{\frac{\alpha z F}{RT}(E(\tau) - E_{j0})} - e^{\frac{(\alpha-1)zF}{RT}(E(\tau) - E_0)} \right). \quad (3)$$

Здесь α – коэффициент переноса; z – валентность разряжающегося иона в растворе; D – коэффициент диффузии; F , R , T – число Фарадея, универсальная газовая постоянная и абсолютная температура процесса.

Необходимо по известным электрохимическим параметрам и константам определить C_0 – концентрацию церия(III) – в объеме раствора таким образом, чтобы теоретическая кривая, вычисленная по уравнениям (1) – (3), и экспериментальная (см. рис. 1) отличались друг от друга на минимальную величину во всех точках τ_j на всем временном интервале вольтамперометрии $0 \leq \tau_j \leq T_0, j = 1, 2, \dots, n$.

В качестве критерия минимизации примем следующее соотношение [13]:

$$S\left(\frac{1}{C_0}\right) = \sum_{j=1}^n \left\{ i_0 \left(\frac{C(0, \tau_j)}{C_0} \cdot e^{\frac{\alpha z F}{RT}(E(\tau_j) - E_0)} - e^{\frac{(\alpha-1)zF}{RT}(E(\tau_j) - E_0)} \right) - i_j \right\}^2 \rightarrow \min_{C_0}. \quad (4)$$

Линеаризация вольтамперометрической кривой ($E(\tau)$, $i(\tau)$) на интервалах $[\tau_j, \tau_{j+1}]$ позволяет представить искомые функции $i(\tau)$ и $C(x, \tau)$ в виде следующих сумм [13, 14]:

$$i(\tau) = i_1 \psi_1(x, \tau) + \sum_{k=2}^{n-1} i_k (\psi_{2k-2} + \psi_{2k-1}) + i_n \psi_{2(n-1)}, \quad (5)$$

$$C(x, \tau) = C_0 + i_1 \varphi_1(x, \tau) + \sum_{k=2}^{n-1} i_k (\varphi_{2k-2} + \varphi_{2k-1}) + i_n \varphi_{2(n-1)}, \quad (6)$$

в которых функции φ_k определяются из решения уравнений:

$$\frac{\partial \varphi_k}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x^2}; \quad \varphi_k(x, 0) = 0; \quad \varphi_k(\delta, \tau) = 0; \quad \frac{\partial \varphi_k}{\partial x}(0, \tau) = \frac{\psi_k(\tau)}{zFD}, \quad (7)$$

а функции $\psi_k(\tau)$ имеют следующий вид [13]:

$$\psi_{2k-1}(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{для } \forall \tau \notin [\tau_{k+1}, \tau_k]; \\ \text{возрастает от 0 до 1 на интервале} & [\tau_k, \tau_k + \Delta\tau]; \\ \text{убывает от 1 до 0 на интервале} & [\tau_k + \Delta\tau, \tau_{k+1}]; \end{cases} \quad (8)$$

$$\psi_{2k}(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{для } \forall \tau \notin [\tau_{k+1}, \tau_k]; \\ \text{возрастает от 0 до 1 на интервале} & [\tau_k, \tau_{k+1} - \Delta\tau]; \\ \text{убывает от 1 до 0 на интервале} & [\tau_{k+1} - \Delta\tau, \tau_{k+1}]. \end{cases} \quad (9)$$

Обозначим $\xi=1/C_0$. Минимум функции $S(\xi)$ будем искать из решения уравнения $\partial S(\xi)/\partial \xi=0$. В результате совместного решения этого уравнения и уравнений (5)–(9) получены формулы [13] для вычисления значения концентрации C_0 , соответствующего искомой концентрации Ce^{3+} в электролите. Алгебраические выражения для вычисления C_0 в данной работе не приводятся в силу их достаточно громоздкого вида.

По описанному методу проведены численные расчеты концентрации ионов церия с использованием линеаризованных форм поляризационных кривых 1, 2 (см. рис. 1), соответствующих окислительно-восстановительному процессу $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$ (рис. 3). Для выполнения расчетов была использована интегрированная система математических вычислений MathCad. Численные значения электрохимических параметров и констант выбраны в соответствии с данными, опубликованными в справочнике по электрохимии под редакцией А.М. Сухотина [15]: $z = 1$; $E_0 = +1,61$ В; $D = 0,62 \cdot 10^{-5}$ см²/с; $F = 96500$; $i_0 = 10^{-2} - 10^{-4}$ А/см²; $\alpha = 0,5$; $R = 8,1$; $T = 298$; $V = 50$ мВ/с.

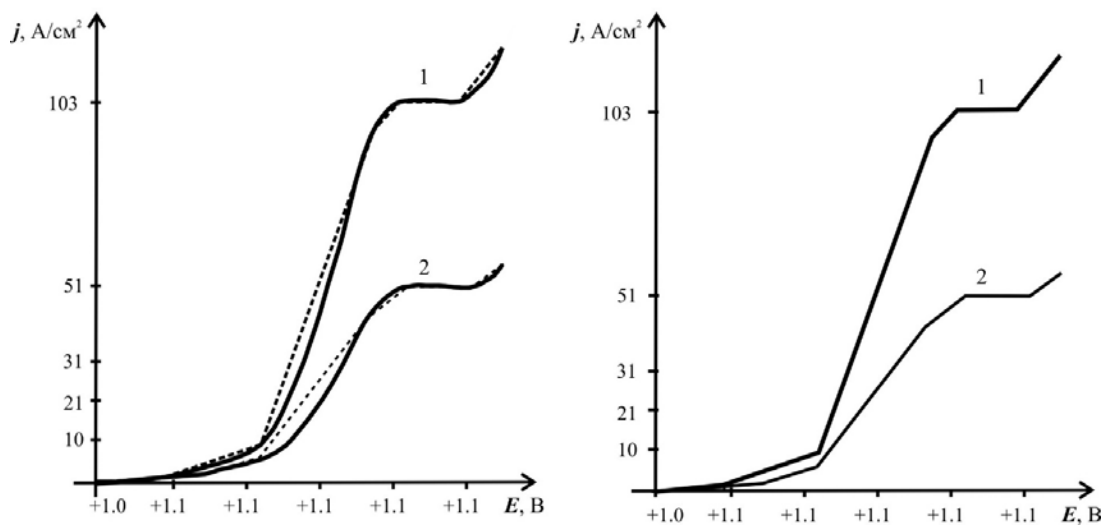


Рис. 3. Линеаризованные поляризационные кривые электродной реакции $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$ в 1 М растворе серной кислоты при концентрации $\text{Ce}^{3+}(C_0)$:
1 – 10 г/л; 2 – 5 г/л

В результате расчетов по приведенной математической модели для процесса $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$ с соответствующей процессу поляризационной кривой 1 определена концентрация ионов Ce^{3+} , равная 10,7 г/л, кривой 2 – 4,1 г/л.

Таким образом, результаты расчетов хорошо коррелируют с истинными значениями концентраций электролитов 1 и 2, равными 10 и 5 г/л соответственно.

Приведенные и использованные в статье экспериментальный и математический методы определения концентраций ионов окислительно-восстановительной реакции $\text{Ce}^{3+} = \text{Ce}^{4+} + e$ могут быть использованы для определения концентраций и других параметров электродных процессов в различных электрохимических системах.

Выводы.

1. Для определения концентраций ионов трех- и четырехзарядной формы церия в серно-кислом электролите проведены полярографические исследования электродных реакций окисления ионов Ce^{3+} и восстановления ионов Ce^{4+} . Показано наличие четко определенных площадок предельного тока на анодных поляризационных кривых, что позволяет использовать полученные поляризационные кривые для определения концентрации ионов Ce^{3+} в исследуемом растворе.

2. Получен график зависимости плотности предельного тока от концентрации Ce^{3+} в 1 М растворе серной кислоты, представляющий собой прямую линию, что свидетельствует о пропорциональной зависимости концентрации ионов Ce^{3+} от величины предельного тока реакции окисления.

3. Построена математическая модель, приведены алгоритм и метод расчета концентрации Ce^{3+} в объеме серно-кислого электролита. Выполнены численные расчеты и их анализ, показано достаточное соответствие результатов расчетов и экспериментов.

1. Поздеев, С.С. Электрохимическое получение ионов Ce(IV) для применения в процессе очистки сточных вод от органических примесей / С.С. Поздеев, Е.С. Кондратьева, А.Ф. Губин // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2014. – Т. 22, № 4. – С. 37–39.
2. Варенцова, В.И. Перспективы использования углеродных волокнистых электродов для интенсификации процесса электрогенерации Ce(IV) в сернокислых растворах Ce(III) / В.И. Варенцова, В.К. Варенцов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2009. – № 3. – С. 257–264.
3. Органическая электрохимия : в 2 кн. / под ред. М. Бейзера, Х. Лунда ; пер. с англ. Г.П. Гириной [и др.] ; под ред. В.А. Петросяна, Л.Г. Феоктистова. – Москва : Химия, 1988. – Кн. 2. – С. 470–1023: ил. – Библиогр. в конце гл. – ISBN 5-7245-0608-4.
4. Седнева, Т.А. Электроокисление церия(III) в азотнокислых растворах редкоземельных элементов / Т.А. Седнева // Журнал прикладной химии. – 2005. – Т. 78. – С. 928–932.
5. Юрасова, О.В. Исследования по извлечению церия из растворов концентратов редкоземельных металлов электрохимическим и экстракционным методами / О.В. Юрасова, Т.А. Харламова, А.А. Семенов [и др.] // Известия высших учебных заведений. – Цветная металлургия. – 2016. – № 4. – С. 34–41.
6. Халипова, О.С. Адсорбционные свойства оксида церия(IV) / О.С. Халипова, С.А. Кузнецова, В.В. Козик // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 74–77.
7. Гордеев, А.А. Кинетика окисления нитрата церия(III) пероксидом водорода в процессе получения золя диоксида церия / А.А. Гордеев // Вестник Томского государственного университета. – Химия. – 2023. – № 29. – С. 48–59.
8. Логинов, А.В. Синтез станната церия / А.В. Логинов, А.И. Апарнев // Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение YOUNG ISC 2024. Тезисы докладов Всерос. молодежной науч. конф. с междунар. участием. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 93–94.
9. Venkatesan, J. CdZnS Solid solution supported $\text{Ce}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ pyrochlore photocatalyst that proves to be an efficient candidate towards the removal of organic pollutants / Venkatesan J. [et. al.] // Separation and Purification Technology. – 2019. – Vol. 224. – P. 405–422.
10. Феттер, К. Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – Москва : Химия, 1967. – 856 с.
11. Клетеник, Ю.Б. Датчик с обновляемым металлическим электродом для автоматического электроанализа растворов / Ю.Б. Клетеник, Р.Ю. Бек, Л.Ю. Полякин, А.П. Замятин // Известия СО АН СССР. Серия химических наук. – 1985. – Т. 2, № 1. – С. 93–97.
12. Скворцова, Л.И. Обновление in situ рабочей поверхности твёрдых индикаторных электродов и их применение в электроанализе / Л.И. Скворцова, Т.П. Александрова, В.А. Тарасова [и др.] // Журн. аналит. химии. – 2005. – Т. 60, № 12. – С. 1284–1295.
13. Кошев, А.Н. Моделирование и расчет концентрации электроактивного компонента в процессе электролиза / А.Н. Кошев, В.В. Кузина // Управление большими системами. – 2011. – Вып. 33. – С.233–253.
14. Кузина, В.В. Математические модели в задачах вольтамперометрического анализа / В.В. Кузина, А.П. Замятин, А.Н. Кошев // Экологические системы и приборы. – 2006. – № 8. – С. 37–42.
15. Справочник по электрохимии / под ред. А.М. Сухотина. – Ленинград : Химия, 1981. – 488 с.

1. Pozdeev, S.S. Electrochemical Production of Ce(IV) Ions for Application in Wastewater Treatment Processes to Remove Measured Impurities / S.S. Pozdeev, E.S. Kondratieva, A.F. Gubin // *Galvanotechnics and Surface Treatment*. – 2014. – Vol. 22. – No. 4. – P. 37–39.
2. Varentsova, V.I. Prospects for the use of carbon fiber electrodes to intensify the process of electroregeneration of Ce(IV) in sulfuric acid solutions of Ce(III) / V.I. Varentsova, V.K. Varentsov // *Chemistry for Sustainable Development*. – 2009. – No. 3. – P. 257–264.
3. Organic Electrochemistry : in 2 books / edited by M. Beizer, H. Lund ; translated from English by G.P. Girina [et al.] ; edited by V.A. Petrosyan, L.G. Feoktistov. – Moscow : Chemistry, 1988. – Book 2. – P. 470–1023: ill. – Bibliography at the end of the chapter. – ISBN 5-7245-0608-4.
4. Sedneva, T.A. Electrooxidation of cerium(III) in solutions of rare earth nitrates / T.A. Sedneva // *Journal of Applied Chemistry*. – 2005. – Vol. 78. – P. 928–932.
5. Yurasova, O.V. Studies on the extraction of cerium from solutions of rare earth metal concentrates by electrochemical and extraction methods / O.V. Yurasova, T.A. Kharlamova, A.A. Semenov [et al.] // *News of higher educational institutions. – Non-ferrous metallurgy*. – 2016. – No. 4. – P. 34–41.
6. Khalipova, O.S. Adsorption properties of cerium(IV) oxide / O.S. Khalipova, S.A. Kuznetsova, V.V. Kozik // *Polzunovsky Bulletin*. – 2013. – No. 1. – P. 74–77.
7. Gordeev, A.A. Kinetics of cerium(III) nitrate oxidation with hydrogen peroxide during the production of cerium dioxide sol / A.A. Gordeev // *Bulletin of Tomsk State University. – Chemistry*. – 2023. – No. 29. – P. 48–59.
8. Loginov, A.V. Synthesis of cerium stannate / A.V. Loginov, A.I. Aparnev // *Functional Materials: Synthesis. Properties. Application. YOUNG ISC 2024. Abstracts of the All-Russian Youth Scientific Conference with International Participation*. – St. Petersburg, 2024. – P. 93–94.
9. Venkatesan, J. CdZnS Solid solution supported Ce₂Sn₂O₇ pyrochlore photocatalyst that proves to be an efficient candidate towards the removal of organic pollutants / Venkatesan J. [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2019. – Vol. 224. – P. 405–422.
10. Fetter, K. Electrochemical kinetics / K. Fetter. – Moscow : Chemistry, 1967. – 856 p.
11. Kletenik, Yu.B. Sensor with a renewable metal electrode for automatic electroanalysis of solutions / Yu.B. Kletenik, R.Yu. Bek, L.Yu. Polyakin, A.P. Zamyatin // *Bulletin of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Series of Chemical Sciences*. 1985. – Vol. 2, No. 1. – P. 93–97.
12. Skvortsova, L.I. In situ renewal of working surfaces of solid indicator electrodes and their use in electroanalysis / L.I. Skvortsova, T.P. Aleksandrova, V.A. Tarasova [et al.] // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2005. – Vol. 60, № 12. – P. 1284–1295.
13. Koshev, A.N. Modeling and calculation of the concentration of the electroactive component in the electrolysis process / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // *Control of large systems*. – 2011. – Issue 33. – P. 233–253.
14. Kuzina, V.V. Mathematical models in problems of voltammetric analysis / V.V. Kuzina, A.P. Zamyatin, A.N. Koshev. // *Ecological systems and devices*. – 2006. – No. 8. – P. 37–42.
15. Handbook of Electrochemistry / edited by A.M. Sukhotin. – Leningrad : Chemistry, 1981. – 488 p.

УДК 697.341

DOI 10.54734/20722958_2026_3_117

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Леонтьев Виктор Александрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогасоснабжение
и вентиляция»
E-mail: leontievva@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Leontev Viktor Aleksandrovich,
Candidate of Science, Associate Professor
of the Department «Heat and Gas supply and
ventilation»
E-mail: leontievva@rambler.ru

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ: БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД

В.А. Леонтьев

Рассмотрена задача оценки надёжности системы теплоснабжения населённого пункта с учётом неопределённости эксплуатационных факторов и технического состояния элементов системы. Обоснована целесообразность применения байесовского подхода как альтернативы традиционным детерминированным методам расчёта надёжности. Предложена вероятностная модель, основанная на объединении априорных нормативных оценок и фактических данных эксплуатационного мониторинга. Выполнена численная оценка надёжности системы теплоснабжения городского поселения. Результаты подтверждают возможность использования байесовского подхода при разработке и актуализации схем теплоснабжения для выявления критических элементов и обоснования мероприятий по повышению надёжности.

Ключевые слова: схема теплоснабжения; система теплоснабжения; тепловые сети; надёжность; байесовский метод; вероятность отказа

USING A BAYESIAN MODEL TO ASSESS THE RELIABILITY OF HEAT SUPPLY SCHEMES IN POPULATED AREAS

V.A. Leontev

The problem of assessing the reliability of the heat supply system of a human settlement is considered, taking into account the uncertainty of operational factors and the technical condition of the system elements. The expediency of using the Bayesian approach as an alternative to traditional deterministic reliability calculation methods is substantiated. A probabilistic model based on combining a priori regulatory estimates and actual operational monitoring data is proposed, and a numerical assessment of the reliability of the urban settlement's heat supply system is performed. The results confirm the possibility of using the Bayesian approach in the development and updating of heat supply schemes to identify critical elements and justify measures to improve reliability.

Keywords: heat supply scheme; heat supply system; heating networks; reliability; Bayesian method; probability of failure

Надёжная работа системы теплоснабжения является одним из ключевых условий устойчивого социально-экономического развития населённых пунктов. Система теплоснабжения должна обеспечивать потребителям стабильное, экономически обоснованное и экологически допустимое теплоснабжение в течение всего отопительного периода и в долгосрочной перспективе. Нарушения функционирования систем теплоснабжения приводят к существенным социальным, экономическим и технологическим последствиям, что обуславливает необходимость обоснованной оценки их надёжности.

В отечественной и зарубежной научной литературе проблема надёжности систем теплоснабжения рассматривается преимущественно в трёх направлениях: детерминированное расчётное обоснование режимов, вероятностный анализ отказов элементов и оптимизационное моделирование развития систем.

Анализ действующих схем теплоснабжения и практики их разработки показывает, что оценка надёжности чаще всего осуществляется в рамках нормативных требований и базируется на фиксированных расчётных параметрах тепловых нагрузок, климатических условий и коэффициентов резервирования. Подобный подход, как отмечается в ряде исследований, приводит к формированию формализованных показателей надёжности без учёта реальной динамики технического состояния оборудования и эксплуатационной статистики отказов. В частности, в работах, посвящённых анализу состояния систем теплоснабжения и проблем их модернизации, подчёркивается необходимость совершенствования методов оценки устойчивости функционирования с учётом фактических условий эксплуатации [1, 2].

Значительное внимание уделяется вопросам повышения эффективности и оптимизации структуры распределённых систем теплоснабжения. В исследованиях Стенникова, Постникова и Медниковой [1] рассматриваются методические положения по формированию эффективных и надёжных распределённых систем, при этом надёжность включается в систему критериев оптимизации развития. В более поздних работах [2] надёжность анализируется в контексте технологических и организационных инноваций, а также интеграции новых источников тепловой энергии. Однако указанные исследования ориентированы преимущественно на структурно-функциональную оптимизацию и не формируют инструмента адаптивного уточнения вероятностных характеристик на основе текущих эксплуатационных данных.

Вероятностные методы анализа отказов тепловых сетей активно развиваются в рамках классической теории надёжности. Предлагаются методы оценки интенсивности отказов с учётом физического износа [3, 4], рассматриваются подходы к вероятностной оценке надёжности инженерных систем [5]. Эти методы позволяют получить статистические характеристики безотказности отдельных элементов, однако, как правило, используют либо ретроспективные данные, либо нормативные усреднённые показатели. Механизм формального объединения априорных нормативных оценок и вновь поступающей эксплуатационной информации при разработке и актуализации схем теплоснабжения остаётся недостаточно разработанным.

В зарубежных исследованиях байесовские методы получили широкое распространение при калибровке моделей тепловых сетей и прогнозировании тепловых нагрузок. Так, в [6, 7] описывается применение байесовской калибровки параметров физико-энергетических моделей для повышения точности прогнозирования спроса в системах централизованного теплоснабжения. В данных работах байесовский подход используется для учёта неопределённости параметров и адаптации моделей к фактическим данным. Однако фокус исследований сосредоточен преимущественно на задачах прогнозирования и параметрической идентификации, а не на оценке интегральной надёжности схем теплоснабжения как стратегического документа развития [8].

Ряд отечественных авторов используют метод Байеса в проектировании [9], однако применение байесовского подхода непосредственно к задаче оценки надёжности схем теплоснабжения населённых пунктов в системном виде в научной литературе практически не представлено.

Таким образом, анализ существующих исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. При разработке схем теплоснабжения преимущественно используются детерминированные методы расчёта надёжности.
2. Вероятностные подходы применяются в основном для оценки отказов отдельных элементов и системно не используются при разработке схем.
3. Оптимизационные модели учитывают надёжность как критерий, но не используют механизм адаптивного уточнения вероятностей на основе эксплуатационного мониторинга.

4. Байесовские методы активно применяются в задачах калибровки и прогнозирования, однако для оценки надёжности схем теплоснабжения населённых пунктов мало используются [10].

Следовательно, сохраняется научно-методический разрыв между наличием эксплуатационных данных о фактических отказах элементов системы и процедурой расчётной оценки надёжности схем теплоснабжения. В условиях высокой неопределённости технического состояния тепловых сетей и изменчивости эксплуатационных режимов требуется метод, обеспечивающий формализованное объединение априорной нормативной информации и эмпирических данных.

Одним из наиболее простых и при этом математически строгих инструментов решения данной задачи является байесовский подход, позволяющий динамически уточнять вероятностные характеристики отказов элементов системы по мере накопления статистики эксплуатации. В отличие от традиционных методов, байесовская модель обеспечивает адаптивность оценки надёжности и может быть интегрирована в процедуру разработки и актуализации схем теплоснабжения.

Указанные обстоятельства обусловили выбор направления настоящего исследования.

В рамках исследования надёжность системы теплоснабжения населённого пункта рассматривается как интегральная характеристика, отражающая совокупность технического состояния источников тепловой энергии, тепловых сетей и теплопотребляющих установок, а также организационно-технологических условий их эксплуатации. Количественная оценка надёжности основана на определении вероятности обеспечения заданной тепловой нагрузки потребителей в течение отопительного периода.

Система теплоснабжения населённого пункта представляет собой иерархическую инженерную систему, включающую источники тепловой энергии, магистральные и распределительные тепловые сети, а также тепловые пункты и потребителей тепловой энергии. Обобщённая структурная схема системы теплоснабжения представлена на рис. 1.

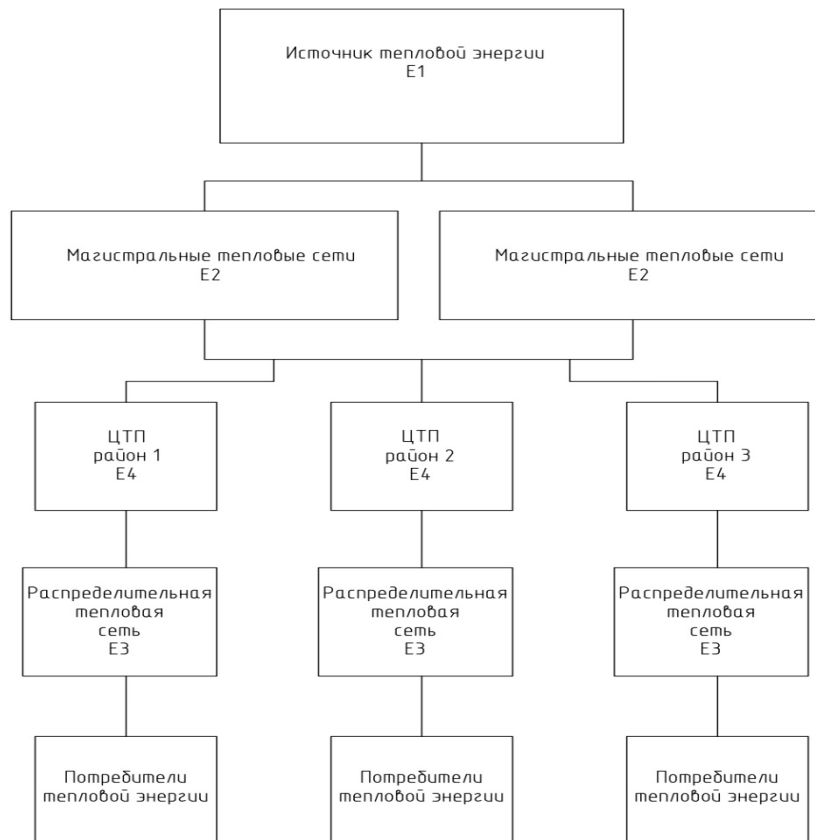


Рис. 1. Структурная схема системы теплоснабжения населённого пункта

Каждый из элементов системы характеризуется собственной вероятностью отказа, обусловленной техническим состоянием оборудования, сроком эксплуатации и условиями функционирования. Рассмотрим следующие группы элементов системы теплоснабжения: источники тепловой энергии, магистральные тепловые сети, распределительные тепловые сети и тепловые пункты.

Под отказом элемента системы в рамках настоящего исследования понимается событие, приводящее к невозможности выполнения данным элементом заданных функций. Для критических элементов системы теплоснабжения отказ рассматривается как эквивалентный нарушению теплоснабжения потребителей в течение отопительного периода.

Вероятностная структура системы теплоснабжения представлена в виде иерархии отказов, в которой событие нарушения теплоснабжения F формируется в результате отказа одного или нескольких критических элементов системы. К таким элементам относятся источники тепловой энергии (F_1), магистральные тепловые сети (F_2), распределительные тепловые сети (F_3) и тепловые пункты (F_4).

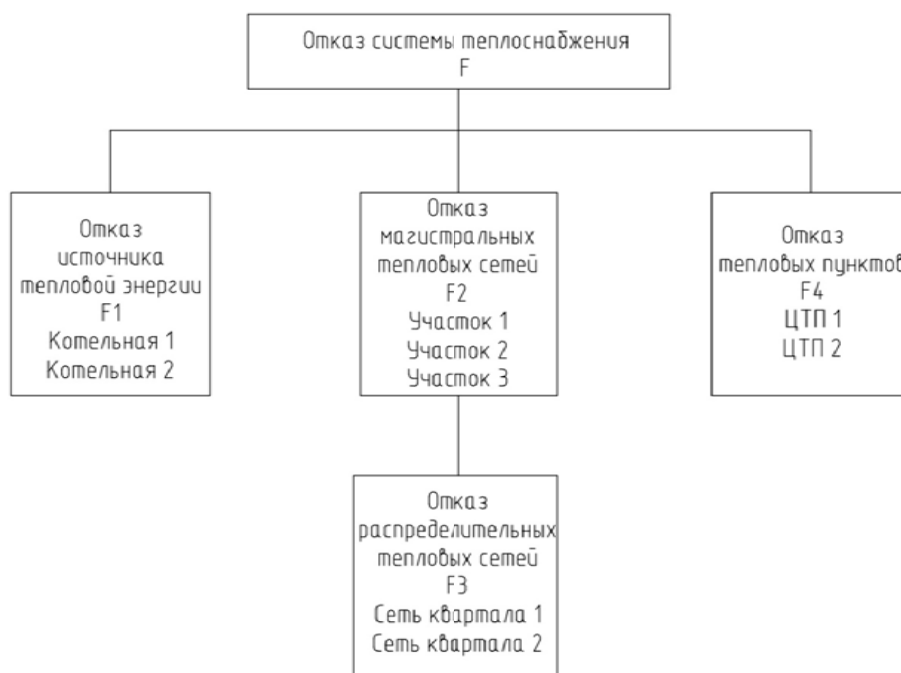


Рис. 2. Вероятностная структура отказов системы теплоснабжения

Вероятности указанных событий могут уточняться на основе эксплуатационных данных с использованием байесовского подхода.

Нарушение теплоснабжения рассматривается как случайное событие F , наступающее при отказе хотя бы одного критического элемента системы:

$$F = F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup F_4, \quad (1)$$

где F_1 – отказ источников тепловой энергии; F_2 – отказ магистральных тепловых сетей; F_3 – отказ распределительных тепловых сетей; F_4 – отказ центральных и индивидуальных тепловых пунктов.

Данная формализация соответствует принципам анализа надёжности систем теплоснабжения, изложенным в СП 124.13330 «Тепловые сети».

Априорные вероятности отказов элементов системы формируются на основе нормативно-методических требований, отраслевых статистических данных и информации, содержащейся в материалах схемы теплоснабжения, включая сроки эксплуатации оборудования и степень его физического износа.

С учётом анализа схемы теплоснабжения рассматриваемого населённого пункта приняты следующие априорные вероятности отказов за один отопительный период:

$P(F_1) = 0,05$ – для источников тепловой энергии;

$P(F_2) = 0,12$ – для магистральных тепловых сетей;

$P(F_3) = 0,18$ – для распределительных тепловых сетей;

$P(F_4) = 0,07$ – для центральных и индивидуальных тепловых пунктов.

Принятые значения находятся в пределах диапазонов, характерных для систем теплоснабжения с высокой степенью физического износа тепловых сетей и ограниченном резервированием источников тепловой энергии [7–9].

Для уточнения вероятностей отказов используется байесовский подход. Пусть B_i – событие фиксации аварийной ситуации, связанной с отказом i -го элемента системы в течение отопительного периода. Тогда апостериорная вероятность отказа определяется по формуле Байеса:

$$P(F_i | B_i) = \frac{P(B_i | F_i) P(F_i)}{P(B_i)}. \quad (2)$$

В рамках иллюстративного примера принято допущение, что условная вероятность регистрации аварийной ситуации при отказе критического элемента равна единице:

$$P(B_i | F_i) = 1. \quad (3)$$

Данное допущение принято исключительно для демонстрации метода и не ограничивает общность предложенного подхода.

На основе эксплуатационного мониторинга установлено, что аварийные ситуации наблюдались:

- на магистральных тепловых сетях – в 40 % отопительных периодов;
- на распределительных тепловых сетях – в 55 % отопительных периодов;
- на источниках тепловой энергии – в 10 % отопительных периодов.

Тогда

$$P(F_2 | B_2) = \frac{0,12}{0,40} = 0,30, P(F_3 | B_3) = \frac{0,18}{0,55} \approx 0,33. \quad (4)$$

При допущении статистической независимости отказов элементов интегральная вероятность безотказной работы системы в течение отопительного периода определяется как

$$R = \prod_{i=1}^4 (1 - P^*(F_i)). \quad (5)$$

Для рассматриваемого примера

$$R \approx 0,95 \cdot 0,70 \cdot 0,67 \cdot 0,93 \approx 0,42.$$

Полученное значение $R \approx 0,42$ означает, что вероятность безотказной работы рассматриваемой схемы теплоснабжения составляет менее 50 %. Это указывает на серьёзные риски нарушения теплового режима в отопительный период, что требует пересмотра проектных решений, реконструкции сетей и усиления системы резервирования.

Таким образом, фактическая вероятность отказов сетевых элементов существенно превышает нормативно принимаемые значения, что указывает на недооценку рисков при традиционном детерминированном подходе.

В ы в о д ы .

1. Предложенный подход показывает, что использование только нормативных показателей дает низкую достоверность оценки надежности системы теплоснабжения, объединение априорных оценок с фактической эксплуатационной информацией отражает достоверное состояние тепловой сети и делает модель адаптивной к изменениям технического состояния сети, что подтверждает целесообразность применения байесовского подхода для оценки надёжности систем теплоснабжения. Более того, такая модель адаптируется по мере накопления новых эксплуатационных данных к изменению технического состояния сети.

2. Полученные в результате исследования апостериорные вероятности отказов и интегральные показатели надёжности демонстрируют критически уязвимые участки тепловой сети и обосновывают мероприятия по повышению резервирования и модернизации инфраструктуры.

3. В перспективе байесовский подход может служить основой для разработки интеллектуальных инструментов управления и мониторинга схем теплоснабжения населенных пунктов, что способствует повышению безопасности, надёжности, экономической эффективности схем теплоснабжения, оперативной корректировке планов их развития и модернизации.

Список литературы

1. Стенников, В.А. Методы и модели формирования и обоснования эффективности и надежности централизованно-распределенных теплоснабжающих систем / В.А. Стенников, И.В. Постников, Е.Е. Медникова. – DOI: 10.31857/S0002331024050017 // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2024. – №5. – С.3–14.
2. Stennikov, V.A. Reliability Challenges of District Heating Systems in the Context of Technological and Organizational Innovations / V.A. Stennikov, I.V. Postnikov. – DOI: 10.25729/esr.2025.03.0004 // Energy Systems Research. – 2025. – Vol. 8, No. 3. – P. 32–41.
3. Пашенцев, А.И. Идентификация и интерпретация оценки надежности тепловой сети / А.И. Пашенцев. – DOI: 10.37279/2519-4453-2020-1-138-146 // Экономика строительства и природопользования. – 2020. – № 1(74). – С. 138–146.
4. Иванова, Е.О. Аварии на системах теплоснабжения: вероятностная оценка развития последствий отказов на тепловой сети / Е.О. Иванова, А.В. Мишурный. – DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.4.74 // Технологии гражданской безопасности. – 2022. – № 4(74). – С. 48–50.
5. Горшков, А.С. Износ и повреждение тепловых сетей. Решение проблемы качества и надежности энергоснабжения / А.С. Горшков, П.П. Рымкевич // Энергосбережение. – 2019. – № 4. – С. 50–52.
6. Chen, S. District Heat Demand Prediction Using artificial neural network with data of sample buildings / S. Chen, Ren Yaxing, D. Friedrich, Z. Yu, J. Yu. – DOI:10.46855/energy-proceedings-3010 // International Conference on Applied Energy. – Aug 12-15, 2019.
7. Chen, S. District Heating Network Demand Prediction Using a Bayesian Calibration Method / S. Chen, D. Friedrich, Z. Yu, J. Yu. – DOI:10.3390/en12183408 // University of Edinburgh Research Explorer University of Edinburgh Research Explorer. – 2019. – 12(18):3408.
8. Шарапов, В.И. Модернизация теплофикационных систем городов: цели и практика / В.И. Шарапов., М.Е. Орлов, М.М. Замалеев, П.Е. Чаукин. – DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-3-184-191 // Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – 11(3). – 184–191.
9. Абдуллазянов, Э.Ю. Использование метода Байеса при проектировании объектов энергетики / Э.Ю. Абдуллазянов, М.А. Закирова, И.Н. Гарькин, Л.С. Сабитов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. Теплоэнергетика. – 2024. – Т.16, №1(61) – С.3–8.

10. Аверьянов, В. Методика планового повышения качества отопления городов на основании критериальной оценки данных тепловых вводов / В. Аверьянов, П. Пташкин, А. Дерговица, Д. Кравченко, А. Горшков // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – №3. – С. 131–139. – URL: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2025-3-131-139>

References

1. Stennikov, V.A. Methodological provisions to the formation and the ensuring of efficiency and reliability of district-distributed heating systems / V.A. Stennikov, I.V. Postnikov, E.E. Mednikova. – DOI: 10.31857/S0002331024050017 // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika. – 2024. – No. 5. – P. 3–14.
2. Stennikov, V.A. Reliability Challenges of District Heating Systems in the Context of Technological and Organizational Innovations / V.A. Stennikov, I.V. Postnikov. – DOI: 10.25729/esr.2025.03.0004 // Energy Systems Research. – 2025. – Vol. 8, No. 3. – P. 1–xx.
3. Pashentsev, A.I. Identification and interpretation of the thermal network reliability assessment / A.I. Pashentsev. – DOI 10.37279/2519-4453-2020-1-138-146 // Construction economic and environmental management. – 2020. – № 1(74). – С. 138–146.
4. Ivanova, E.O. Accidents on Heat Supply Systems: Probabilistic Assessment of the Heating Network Failures Consequences Development / E.O. Ivanova, A.V. Mishurny. – DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.4.74 // Civil Security Technology. – 2022. – Vol. 19, No. 4(74). – P. 48–50.
5. Gorshkov, A.S. Wear and Damage of Heating Networks. Solving the Problem of Energy Supply Quality and Reliability / A.S. Gorshkov, P.P. Rymkevich // Energy Saving. – 2019. – №4. – P. 50–52.
6. Chen, S. District Heat Demand Prediction Using artificial neural network with data of sample buildings / S. Chen, Ren Yaxing, D. Friedrich, Z. Yu, J. Yu. – DOI:10.46855/energy-proceedings-3010 // International Conference on Applied Energy. – Aug 12-15, 2019.
7. Chen, S. District Heating Network Demand Prediction Using a Bayesian Calibration Method / S. Chen, D. Friedrich, Z. Yu, J. Yu. – DOI:10.3390/en12183408 // University of Edinburgh Research Explorer University of Edinburgh Research Explorer. – 2019. – 12(18):3408.
8. Sharapov, V.I. Modernization for cogeneration and district heating systems in urban areas: objectives and practice / V.I. Sharapov, M.E. Orlov, M.M. Zamaleev, P.E. Chaukin // Safety and Reliability of Power Industry. – 2018. – №11(3). – P.184–191. – URL: <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-184-191>.
9. Abdullazyanov, E.Yu. Using the bayesian method in designing energy facilities / E.Yu. Abdullazyanov, M.A. Zakirova, I.N. Garkin, L.S. Sabitov // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. – 2024. – 16. – 1(61). – P. 3–8.
10. Averyanov, V. Methodology for Planned Improvement of the Quality of Heating in Cities Based on Criteria-Based Assessment of Heat Input Data / V. Averyanov, P. Ptashkin, A. Dergovitsa, D. Kravchenko, A. Gorshkov. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-131-139 // Academia. Architecture and Construction. – 2025. – No. 3. – P. 131–139.

УДК 697.921.452

DOI 10.54734/20722958_2026_3_124

*Луганский государственный университет
имени Владимира Даля*Россия, 291034, Луганск,
кв. Молодежный, д. 20а,
тел.: +7 (8572) 344828**Малыгина Оксана Александровна,**
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
«Проектирование и технологии
строительства»
E-mail: oksalita@mail.ru**Соколов Владимир Ильич,**
доктор технических наук, профессор,
заместитель директора института
строительства, архитектуры и жилищно-
коммунального хозяйства
E-mail: sokolov.snu.edu@gmail.com*Lugansk Vladimir Dahl State University*Russia, 291034, Lugansk,
20a, Molodezhny Bl.,
tel.: +7 (8572) 344828**Malygina Oksana Aleksandrovna,**
Candidate of Sciences, Senior Lecturer of
Department «Design and Technologies of
Construction»
E-mail: oksalita@mail.ru**Sokolov Vladimir Il'yich,**
Doctor of Sciences, Professor, Deputy
Director of Institute «Construction,
Architecture and Housing and Communal
Services»
E-mail: sokolov.snu.edu@gmail.comИсследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 26-19-00006, <https://rscf.ru/project/26-19-00006/>

ВЛИЯНИЕ РЕАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ НА КАЧЕСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ

О.А. Малыгина, В.И. Соколов

Изучено влияние реальных свойств звеньев системы автоматического управления воздушным отоплением с интегрирующим регулятором и гибкой обратной связью на качество регулирования. На основе моделирования переходных процессов сформулировано условие, при котором гибкую обратную связь можно рассматривать как идеальное дифференцирующее звено. Для учета ограничения максимальной тепловой мощности системы воздушного отопления рассмотрено ограничение выходного сигнала интегрирующего регулятора как сверху максимальной величиной дополнительного нагрева приточного воздуха, так и снизу величиной возможного его охлаждения. Учет данных ограничений отражен введением в структурную схему нелинейного звена типа «зона насыщения». Показано, что наличие ограничений тепловой мощности системы может привести к значительному уменьшению ее быстродействия.

Ключевые слова: воздушное отопление, система автоматического управления, интегрирующий регулятор, гибкая обратная связь, зона насыщения, переходный процесс

THE INFLUENCE OF LINKS REAL PROPERTIES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR AIR HEATING ON REGULATION QUALITY

O.A. Malygina, V.I. Sokolov

The paper considers the influence of the links real properties of the automatic control system for air heating with integrating controller and flexible feedback on the regulation quality. Based on the modeling of transient processes, the condition is formulated under which the differentiating link inertia can be neglected in the studies, and the flexible feedback can be considered as an ideal differentiating link. To account for the limitation of the maximum thermal capacity of air heating system, the output signal of the integrating regulator is limited both from above by the maximum amount of additional heating of the supply air and from below by the amount of possible cooling. The presence of limitations at the integrating controller output is reflected in the structural scheme of the

automatic control system by introducing the nonlinear saturation zone link. Significant limitation of the maximum temperature of supply air can lead to significant decrease of the system response speed.

Keywords: air heating, automatic control system, integrating regulator, flexible feedback, saturation zone, transition process

Введение и актуальность задачи. В настоящее время для обеспечения теплового режима зданий и сооружений широкое распространение получило воздушное отопление [1, 2], или отопительно-вентиляционные системы (ОВС). Малая тепловая инерционность обеспечивает такие основные преимущества воздушного отопления, как быстрый прогрев помещений, равномерное распределение тепла без холодных зон, а также возможность зонирования теплового режима и индивидуальной регулировки температуры в отдельных помещениях. В теплый период года ОВС могут осуществлять кондиционирование воздуха.

Дальнейшее расширение применения воздушного отопления в современных условиях требует повышения его эффективности путем сокращения потребляемой мощности за счет снижения потерь энергии, связанных с процессами регулирования аэротермодинамических характеристик [3, 4]. Это может быть достигнуто разработкой систем автоматического управления (САУ), обеспечивающих улучшение показателей качества регулирования на основе алгоритмов и методов оптимального управления.

Анализ литературных источников. В САУ воздушным отоплением возможны следующие три вида регулирования температурного режима [5, 6]: системы с постоянным расходом и переменной температурой приточного воздуха; системы с переменным расходом приточного воздуха определенной температуры; смешанные (комбинированные или двухконтурные) системы. Наиболее распространенными являются системы регулирования (или стабилизации) температуры в помещении по каналу изменения температуры приточного воздуха (так называемое качественное управление). Пример такой система приведен на рис. 1. Здесь САУ воздушным отоплением построена на базе системы приточной вентиляции с калорифером и регулятором температуры РТ [7, 8]. Заданный температурный режим в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения контролируется датчиком температуры ДТ.

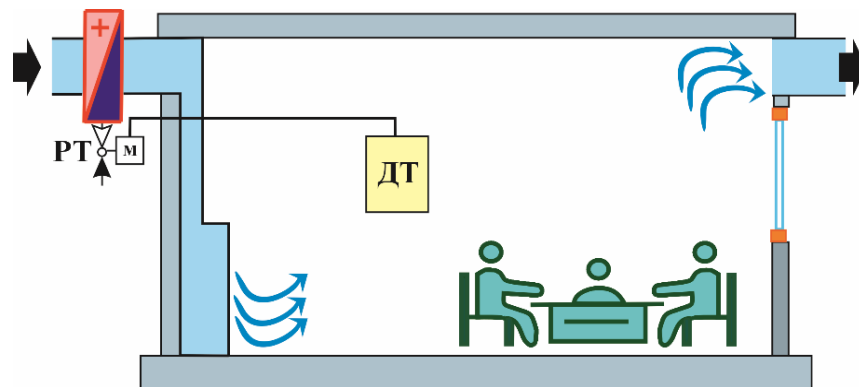


Рис. 1. САУ воздушным отоплением с регулятором температуры

Поддержание заданного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону обеспечивается автоматическими регуляторами. Чаще всего используются регуляторы с линейными и нелинейными законами регулирования [5, 9]. Типовыми примерами нелинейных регуляторов являются двухпозиционные и трехпозиционные регуляторы температуры. Регуляторы с линейным законом регулирования подразделяются на следующие основные виды: пропорциональные (П-регуляторы); интегральные (И-регуляторы); пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы); пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы).

Качество процесса регулирования обычно оценивается по переходной характеристике. Основными показателями качества регулирования САУ являются: установившаяся ошибка; время переходного процесса (время регулирования); перерегулирование; колебательность процесса [9, 10]. На практике часто требования к качеству работы САУ задаются не в виде величин отдельных показателей качества, а в виде характера реализации оптимального режима регулирования.

Исследованиями авторов показана возможность повышения качества регулирования ОВС за счет повышения быстродействия при допустимой величине перерегулирования и отсутствии ошибки регулирования путем использования интегрального регулятора (И-регулятора) температуры приточного воздуха и гибкой обратной связи (ГОС) по температуре в рабочей зоне обслуживаемого помещения. Однако применение такого подхода к улучшению показателей качества регулирования должно учитывать как ограничение максимальной тепловой мощности системы воздушного отопления, так и невозможность реализации идеального дифференцирующего звена, каким является ГОС [11, 12].

Целью работы является исследование влияния реальных свойств звеньев системы автоматического управления воздушным отоплением на качество регулирования температуры в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения.

Материалы и результаты исследования. Считая объект управления (обслуживаемое помещение) тепловой емкостью с сосредоточенными параметрами, структурную схему САУ воздушным отоплением по каналу управления с И-регулятором и гибкой обратной связью можно представить в следующем виде (рис. 2).

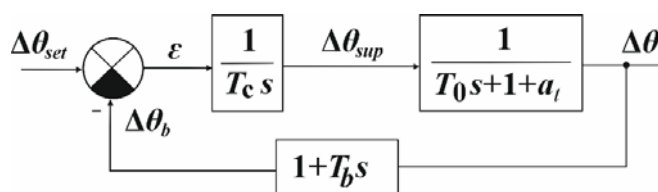


Рис. 2. Структурная схема САУ воздушным отоплением с интегральным регулятором и гибкой обратной связью

Обозначения на рис. 2: s – переменная Лапласа; отклонение $\Delta\theta_{sup}$ температуры приточного воздуха θ_{sup} и отклонение $\Delta\theta$ температуры в рабочей зоне θ от их значений в условно стационарном режиме соответственно θ_{0sup} и θ_0 ,

$$\Delta\theta_{sup} = \theta_{sup} - \theta_{0sup}; \Delta\theta = \theta - \theta_0; \quad (1)$$

$\Delta\theta_{set}$ – заданное изменение температуры в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения; T_0 – постоянная времени объекта управления (обслуживаемого помещения), определяемая кратностью воздухообмена; a_t – безразмерный коэффициент, учитывающий теплопотери; T_c – постоянная времени И-регулятора; T_b – постоянная времени ГОС; $\Delta\theta_b$ – сигнал обратной связи; ошибка управления $\varepsilon = \Delta\theta_{set} - \Delta\theta_b$.

Согласно структурной схеме (см. рис. 2), получаем передаточную функцию САУ воздушным отоплением:

$$W(s) = \frac{\frac{1}{T_c s} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1 + a_t}}{1 + \frac{1}{T_c s} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1 + a_t} \cdot (1 + T_b s)}, \quad (2)$$

или

$$W(s) = \frac{1}{T_c T_0 s^2 + (T_c + T_c a_t + T_b) s + 1}. \quad (3)$$

На рис. 3 в качестве примера сопоставлен переходный процесс для температуры в рабочей зоне для САУ воздушным отоплением с интегральным регулятором и гибкой обратной связью с переходным процессом без САУ. Расчеты проведены в пакете прикладных программ MATLAB для значений постоянной времени объекта управления $T_0=1$ ч, безразмерного коэффициента, учитывающего теплопотери, $a_t=1$, постоянной времени И-регулятора $T_c=0,1$ ч и постоянной времени ГОС $T_b=0,2$ ч. Как видно, использование интегрального регулятора температуры приточного воздуха и гибкой обратной связи по температуре в рабочей зоне обслуживаемого помещения позволяет повысить качество регулирования ОВС за счет повышения быстродействия при допустимой величине перерегулирования и отсутствии ошибки регулирования.

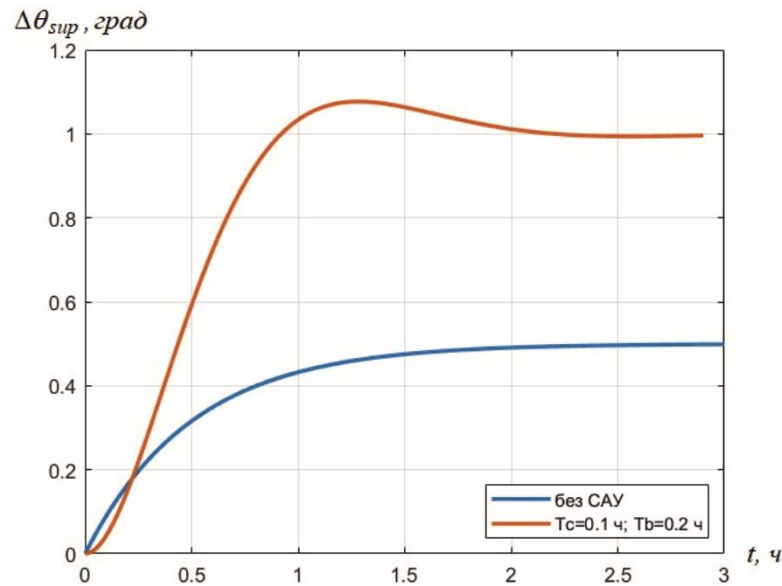


Рис. 3. Переходные процессы для температуры в рабочей зоне

Ограничение максимальной тепловой мощности системы воздушного отопления приводит к тому, что выходной сигнал И-регулятора тоже является ограниченным, причем ограниченным сверху максимальной величиной дополнительного нагрева приточного воздуха и ограниченным снизу величиной возможного охлаждения.

Но прежде чем выполнять исследование по влиянию ограничения максимальной тепловой мощности, проведем оценку влияния инерционности ГОС на качество регулирования САУ воздушным отоплением. С этой целью в обратной связи САУ рассматриваем реальное (инерционное) дифференцирующее звено с постоянной времени T_{0b} в знаменателе передаточной функции, как показано на рис. 4.

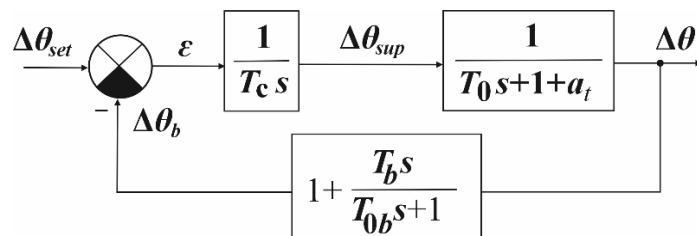


Рис. 4. Структурная схема САУ воздушным отоплением с интегральным регулятором и реальной (инерционной) ГОС

Тогда передаточная функция замкнутой системы будет равна:

$$W(s) = \frac{\frac{1}{T_c s} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1 + a_t}}{1 + \frac{1}{T_c s} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1 + a_t} \cdot \left(1 + \frac{T_b s}{T_{0b} s + 1}\right)}, \quad (4)$$

или после упрощения

$$W(s) = \frac{T_{0b} s + 1}{T_0 T_c T_{0b} s^3 + (T_0 T_c + T_c T_{0b} + T_c T_{0b} a_t) s^2 + (T_c + T_c a_t + T_{0b} + T_b) s + 1}. \quad (5)$$

В пакете прикладных программ MATLAB выполнены расчеты переходных процессов в САУ воздушным отоплением для различных значений T_{0b} в диапазоне значений постоянной времени И-регулятора $T_c = 0,03 \dots 0,3$ ч и постоянной времени ГОС $T_b = 0,1 \dots 0,4$ ч, при постоянной времени объекта управления $T_0 = 1$ ч и безразмерном коэффициенте, учитывающем теплопотери, $a_t = 1$. Расчеты показали, что инерционность ГОС существенно не влияет на переходный процесс при значении T_{0b} не более T_b (расхождение выходного сигнала не более 10 %). Пример расчета переходных процессов для $T_c = 0,1$ и $T_b = 0,2$ показан на рис. 5.

Технические средства реализации ГОС более чем на порядок могут удовлетворять отмеченным выше требованиям по инерционности дифференцирующего звена, поэтому в дальнейших исследованиях рассматриваем в структурной схеме САУ воздушным отоплением идеальное дифференцирующее звено при выполнении условия

$$T_{0b} \leq 0,1 T_b. \quad (6)$$

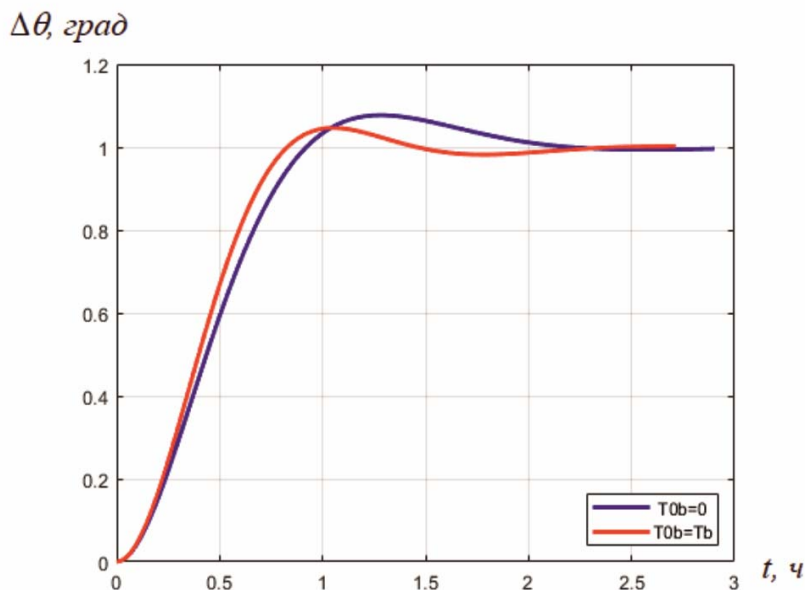


Рис. 5. Переходные процессы в САУ воздушным отоплением

Как отмечено выше, для учета ограничения максимальной тепловой мощности системы воздушного отопления необходимо рассмотреть ограничение выходного сигнала И-регулятора как сверху максимальной величиной дополнительного нагрева приточного воздуха $\Delta\theta_{sup,max}$, так и снизу величиной возможного его охлаждения $\Delta\theta_{sup,min}$.

Поясним сказанное следующими рассуждениями. Пусть воздушным отоплением в осенне-весенний период в обслуживаемом помещении поддерживается условно стационарная температура $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ за счет подачи приточного воздуха температурой

$\theta_{0sup}=30^{\circ}\text{C}$. Теперь считаем, что система воздушного отопления может нагреть приточный воздух до температуры $\theta_{sup,max}=50^{\circ}\text{C}$, обеспечивая температуру в рабочей зоне $\theta_{max}=30^{\circ}\text{C}$. В то же время полагаем, что совсем без нагрева температура приточного воздуха составит $\theta_{sup,min}=10^{\circ}\text{C}$, что приведет к снижению температуры в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения до $\theta_{min}=10^{\circ}\text{C}$. Тогда для данной системы воздушного отопления ограничения на выходе И-регулятора составят $\Delta\theta_{sup,max}=20^{\circ}\text{C}$ и $\Delta\theta_{sup,min}=-20^{\circ}\text{C}$.

Наличие ограничений на выходе И-регулятора можно отразить в структурной схеме САУ введением нелинейного звена типа «зона насыщения», как показано на рис. 6.

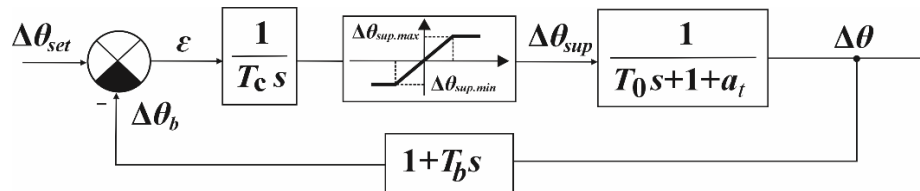


Рис. 6. Структурная схема САУ воздушным отоплением с нелинейным звеном типа «зона насыщения»

Результаты моделирования переходных процессов в САУ воздушным отоплением при различных скачках заданного изменения температуры в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения $\Delta\theta_{set}$ ($+5^{\circ}\text{C}$, $+8^{\circ}\text{C}$ и $+10^{\circ}\text{C}$) представлены на рис. 7, 8. На рис. 7 показано изменение во времени температуры приточного воздуха $\Delta\theta_{sup}$, а на рис. 8 – изменение температуры в рабочей зоне $\Delta\theta$. Расчеты выполнены при постоянной времени И-регулятора $T_c=0,1$ ч, постоянной времени ГОС $T_b=0,2$ ч, значениях постоянной времени объекта управления $T_0=1$ ч, безразмерного коэффициента, учитывающего теплопотери, $a_t=1$ и верхнего ограничения температуры приточного воздуха $\Delta\theta_{sup,max}=20^{\circ}\text{C}$.

Как показывают результаты расчетов, влияние нелинейности типа «зона насыщения» на переходные процессы в САУ зависит от величины входного сигнала $\Delta\theta_{set}$. В большей степени это отражается на характере изменения температуры приточного воздуха $\Delta\theta_{sup}$ (рис. 7), что приводит к изменению качества регулирования выходного параметра $\Delta\theta$ (рис. 8). Как можно заметить, большее значение скачка входного сигнала дает более выраженный апериодический характер переходного процесса и уменьшение быстродействия системы (увеличение длительности переходного процесса).

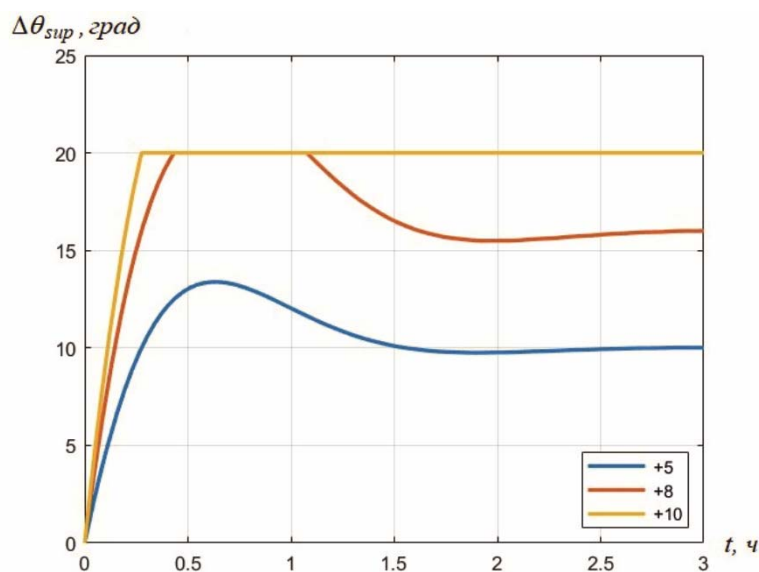


Рис. 7. Изменение температуры приточного воздуха для различных скачков заданного изменения температуры в рабочей зоне

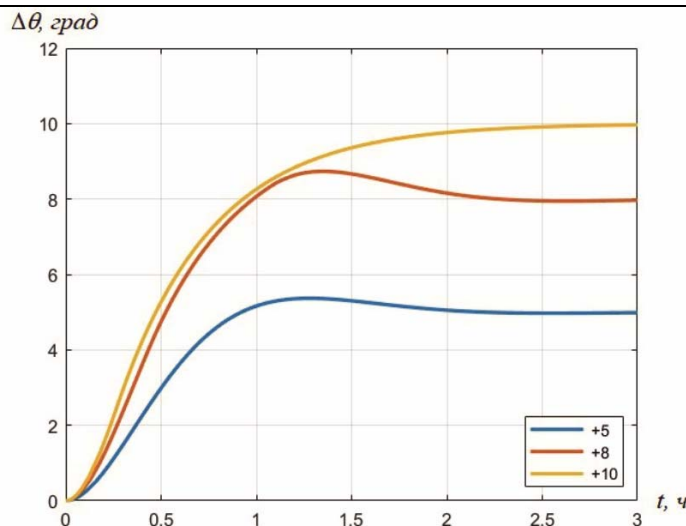


Рис. 8. Изменение температуры в рабочей зоне для различных скачков заданного ее изменения

Таким образом, при разработке САУ воздушным отоплением следует рекомендовать проведение анализа и оценки влияния реальных характеристик системы, и в первую очередь ограничения ее тепловой мощности, на показатели качества регулирования температуры в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения. Существенное ограничение максимальной температуры приточного воздуха может привести к значительному уменьшению быстродействия САУ.

Выводы.

1. Изучено влияние реальных свойств звеньев системы автоматического управления воздушным отоплением с интегрирующим регулятором и гибкой обратной связью на качество регулирования. Для проведения исследований отопительно-вентиляционная система как объект автоматического управления упрощенно представлена апериодическим звеном первого порядка. В рассмотрение введены постоянная времени, определяемая кратностью воздухообмена, и безразмерный коэффициент, учитывающий теплопотери.

2. На основе моделирования переходных процессов сформулировано условие, при котором в исследованиях можно пренебречь инерционностью дифференцирующего звена, а гибкую обратную связь рассматривать как идеальное дифференцирующее звено.

3. Для учета ограничения максимальной тепловой мощности системы воздушного отопления рассмотрено ограничение выходного сигнала интегрирующего регулятора как сверху максимальной величиной дополнительного нагрева приточного воздуха, так и снизу величиной возможного его охлаждения. Наличие ограничений на выходе интегрирующего регулятора отражено в структурной схеме системы автоматического управления введением нелинейного звена типа «зона насыщения». Как показали результаты расчетов, влияние данной нелинейности на переходные процессы зависит от величины входного сигнала – заданного изменения температуры в значимой (рабочей) зоне обслуживаемого помещения. Сначала это проявляется на характере изменения температуры приточного воздуха, а затем приводит к изменению качества регулирования выходного параметра – температуры в рабочей зоне. Большее значение величины скачка входного сигнала дает более выраженный апериодический характер переходного процесса и уменьшение быстродействия системы.

4. Рекомендовано при разработке систем автоматического управления воздушным отоплением проведение анализа и оценки влияния реальных характеристик системы, и в первую очередь ограничения ее тепловой мощности, на показатели качества регулирования температуры в рабочей зоне, так как существенное ограничение

максимальной температуры приточного воздуха может привести к значительному уменьшению быстродействия системы.

Список литературы

1. Howell, R. Principles of heating ventilating and air conditioning / Ronald H. Howell. – Atlanta : ASHRAE, 2017. – 594 p.
2. Свистунов, В.М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства / В.М. Свистунов, Н.К. Пушняков. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 423 с.
3. Ерёмкин, А.И. Методика исследования надежности и энергетической эффективности систем теплоснабжения / А.И. Ерёмкин, Е.Г. Ежов, В.А. Леонтьев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2 (47). – С. 109–117.
4. Математическое моделирование температурных и скоростных полей в конвективных потоках от нагретой поверхности отопительного прибора / В.В. Кузина, А.И. Ерёмкин, А.Н. Кошев, И.К. Пономарева. – DOI:10.54734/20722958_2025_1_183 // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1(62). – С. 183–191.
5. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов, Г.В. Нимич. – Киев : Аванпост-Прим, 2005. – 560 с.
6. Ifa, S. Ventilation system performance in a heated room testing the indoor air quality and thermal comfort / S. Ifa, Z. Dris. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00923-6> // Indoor Air Quality: Control, Health Implications and Challenges. – Cham : Springer, 2022. – P. 77–100.
7. Судак, В. Системы VAV. Краткое описание / В. Судак, Я. Хендигер. – Краков : SMAY, 2009. – 80 с.
8. Surin, V. Combined system development of heat ventilation air condition temperature control by fuzzy logic controller / V. Surin, Y. Troyanovsky, D. Maskaev, I. Tarasenko, M. Boldin. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/2/022026> // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 869. – 022026.
9. Dorf, R. Modern Control Systems / R. Dorf, R. Bishop. – Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2011. – 1082 p.
10. Соколов, В.И. Экспертная оценка экономической эффективности теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях / В.И. Соколов, О.А. Малыгина. – DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2025.10.48-54> // Промышленное и гражданское строительство. – 2025. – № 10. – С. 48–54.
11. Методы классической и современной теории автоматического управления. Том. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 654 с.
12. Малыгина, О.А. Управление отопительно-вентиляционными системами с помощью интегрального регулятора и гибкой обратной связи / О.А. Малыгина, В.И. Соколов. – DOI: 10.33622/0869-7019.2026.04.65-72 // Промышленное и гражданское строительство. – 2026. – № 4. – С. 65–72.

References

1. Howell, R. Principles of heating ventilating and air conditioning / Ronald H. Howell. – Atlanta : ASHRAE, 2017. – 594 p.
2. Svistunov, V.M. Heating, Ventilation, and Air Conditioning of Agricultural and Housing and Communal Services Facilities / V.M. Svistunov, N.K. Pushnyakov. – St. Petersburg : Politekhnik, 2007. – 423 p.
3. Eremkin, A.I. Methodology for Researching the Reliability and Energy Efficiency of Heating Systems / A.I. Eremkin, E.G. Ezhov, and V.A. Leontiev // Regional Architecture and Engineering. – 2021. – No. 2 (47). – P. 109–117.

4. Mathematical Modeling of Temperature and Velocity Fields in Convective Flows from a Heated Surface of a Heating Device / V.V. Kuzina, A.I. Eremkin, A.N. Koshev, and I.K. Ponomareva. – DOI 10.54734/20722958_2025_1_183 // Regional Architecture and Engineering. – 2025. – No. 1(62). – P. 183–191.
5. Automation of ventilation and air conditioning systems / E.S. Bondar, A.S. Gordienko, V.A. Mikhailov, G.V. Nimich. – Kiev : Avanpost-Prim, 2005. – 560 p.
6. Ifa, S. Ventilation system performance in a heated room testing the indoor air quality and thermal comfort / S. Ifa, Z. Dris. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00923-6> // Indoor Air Quality: Control, Health Implications and Challenges. – Cham : Springer, 2022. – P. 77–100.
7. Sudak, V. VAV systems. A brief description / V. Sudak, Ya. Hendiger. – Krakow : SMAY, 2009. – 80 p.
8. Surin, V. Combined system development of heat ventilation air condition temperature control by fuzzy logic controller / V. Surin, Y. Troyanovsky, D. Maskaev, I. Tarasenko, M. Boldin. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/2/022026> // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 869. – 022026.
9. Dorf, R. Modern Control Systems / R. Dorf, R. Bishop. – Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2011. – 1082 p.
10. Sokolov, V. I. Expert Assessment of the Economic Efficiency of Thermal Insulation Materials in Enclosing Structures / V. I. Sokolov, O.A. Malygina. – DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2025.10.48-54> // Industrial and Civil Engineering. – 2025. – No. 10. – P. 48–54.
11. Methods of Classical and Modern Automatic Control Theory. Vol. 1. Mathematical Models, Dynamic Characteristics, and Analysis of Automatic Control Systems / Edited by K.A. Pupkov and N.D. Yegupov. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2004. – 654 p.
12. Malygina O. A. Regulation quality of heating-ventilating systems by using integrated controller and flexible feedback / O.A. Malygina, V.I. Sokolov. – DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2026.04.65-72> // Industrial and Civil Engineering. – 2026. – No. 4. – P. 65–72.

УДК 66.045.126

DOI 10.54734/20722958_2026_3_133

Вологодский государственный университет
Россия, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15,
тел.: +7 (8172) 72-46-45

Павлов Михаил Васильевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Теплогазоводоснабжение»
E-mail: pavlovmv@vogu35.ru

Карпов Денис Федорович,
старший преподаватель кафедры
«Теплогазоводоснабжение»
E-mail: karpovdf@vogu35.ru

ООО «Северная сбытовая компания»

Россия, 160000, г. Вологда,
ул. Зосимовская, д. 49,
тел.: +7 (8172) 23-15-15

Жукова Валерия Павловна,
специалист
E-mail: ranel19@yandex.ru

Vologda State University
Russia, 160000, Vologda, 15, Lenin St.,
tel.: +7 (8172) 72-46-45

Pavlov Mikhail Vasil'evich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department «Heat,
Gas and Water Supply»
E-mail: pavlovmv@vogu35.ru

Karpov Denis Fedorovich,
Senior Lecturer of the Department «Heat, Gas
and Water Supply»
E-mail: karpovdf@vogu35.ru

LLC «Northern Sales Company»

Russia, 160000, Vologda,
49, Zosimovskaya St.,
tel.: +7 (8172) 23-15-15

Zhukova Valeriya Pavlovna,
Specialist
E-mail: ranel19@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В ПЛАСТИНЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, В.П. Жукова

При выполнении конструкторского теплового и гидравлического расчета рекуперативных теплообменных аппаратов главным вопросом на начальном этапе проектирования остается выбор скорости движения греющего и нагреваемого теплоносителей. В нормативных документах обычно приводятся конкретные значения скоростей потоков без каких-либо инженерных и технико-экономических обоснований.

Определена скорость движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике, при которой достигаются минимальные капитальные вложения на приобретение, установку и обслуживание теплообменного оборудования для нужд отопления или горячего водоснабжения в текущих ценах за расчетный период времени.

Итоговое уравнение для вычисления оптимальной скорости движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике, полученное по результатам нахождения экстремума (минимума) целевой функции, включает в себя такие важные технические, эксплуатационные и экономические показатели, как расчетная производительность теплообменной установки, массовые расходы греющего и нагреваемого теплоносителей, накипеобразование и эффективность работы насосного оборудования, первоначальные капитальные вложения, текущий тариф на электрическую энергию и др.

Ключевые слова: греющий теплоноситель, нагреваемый теплоноситель, пластинчатый теплообменник, оптимальная скорость, оптимизационная задача

DETERMINATION OF THE OPTIMAL FLOW VELOCITY OF HEAT TRANSFER FLUIDS IN A PLATE HEAT EXCHANGER

M.V. Pavlov, D.F. Karpov, V.P. Zhukova

When performing the thermal and hydraulic design calculations of recuperative heat exchangers, one of the principal tasks at the initial stage of engineering design is the selection of the flow velocities of the heating and heated fluids. Regulatory documents typically provide fixed velocity values without any accompanying engineering or techno-economic justification.

The flow velocity of heat-transfer fluids in a plate heat exchanger at which the total capital expenditures for the procurement, installation and maintenance of heat-exchange equipment for heating or domestic hot water supply applications reach their minimum in current prices over the designated calculation period is determined.

The final equation for calculating the optimal flow velocity of heat transfer fluids in a plate heat exchanger, obtained by determining the extremum (minimum) of the objective function, incorporates key technical, operational and economic parameters. These include the design thermal capacity of the heat exchange system, the mass flow rates of the heating and heated fluids, fouling (scale formation) effects, the efficiency of pumping equipment, initial capital investment costs, the current electricity tariff and other relevant factors.

Keywords: heating fluid, heated fluid, plate heat exchanger, optimal velocity, optimization problem.

Введение. Проектирование пластинчатых теплообменников, в которых греющим и нагреваемым теплоносителями является вода (водо-водяные теплообменники), связано с выполнением конструкторского теплового и гидравлического расчета. В тепловом расчете определяется требуемая площадь поверхности нагрева теплообменника, в гидравлическом расчете – потери давления для греющего и нагреваемого теплоносителей. В соответствии с СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов» определение необходимого типоразмера водоподогревателя осуществляется на основе оптимальной скорости движения теплоносителей. Для секционных (скоростных) кожухотрубных водо-водяных подогревателей оптимальная скорость воды в трубках составляет 1,0 м/с. По действующим нормам оптимальная скорость воды в каналах пластинчатых теплообменников равна 0,4 м/с. Указанные скорости теплоносителей принимаются для всех случаев одинаковыми, а выбор конкретных числовых значений в нормативном документе никак не поясняется. Пункт в нормативном документе со следующей формулировкой: «при расчете пластинчатого водоподогревателя оптимальная скорость принимается исходя из получения таких же потерь давления в установке по нагреваемой воде, как при применении кожухотрубного водоподогревателя – $100 \div 150$ кПа» – также не вносит большой ясности в данный вопрос. Сама по себе скорость движения теплоносителей является важной величиной, которая напрямую влияет на результат как теплового, так и гидравлического расчета. Ситуация усложняется тем, что это два взаимоисключающих фактора: увеличение скорости движения теплоносителей, с одной стороны, приведет к уменьшению требуемой площади поверхности нагрева теплообменника (тепловой расчет), а с другой стороны – к росту потерь давления (гидравлический расчет), и наоборот.

Повышение эффективности работы теплообменных аппаратов является важным научно-техническим направлением, напрямую связанным с вопросами энергосбережения и экологической безопасности. Сюда можно отнести оребрение теплопередающей поверхности [1] и подобные рационализаторские решения [2], использование в качестве греющего теплоносителя высокотеплопроводной наножидкости [3, 4], интенсификацию процессов теплообмена [5] и выбор режимных параметров работы теплообменного аппарата [6]. Нахождение оптимальных геометрических параметров теплообменника и применение турбулизаторов различных конфигураций могут значительно повысить теплопередачу между греющим и нагреваемым теплоносителями (до 18 % без существенного увеличения потерь давления) [7].

Благодаря гофрированной поверхности пластинчатые теплообменники являются более совершенным и высокоэффективным теплообменным оборудованием по сравнению с секционными кожухотрубными водо-водяными подогревателями. Данные теплообменники обладают высоким коэффициентом теплопередачи и, как следствие, имеют компактную конструкцию [8]. Так, например, в работе [9] отмечено, что коэффициент теплопередачи пластинчатого теплообменника достигает своего максимального значения при угле гофрирования пластин 50° . В то же время рассматриваемые теплообменные аппараты более подвержены техническим неисправностям, так как металлические пластины теплообменника имеют малую толщину (не более 1 мм), что

приводит в ходе его эксплуатации к образованию трещин и сквозных отверстий, а также к загрязнению и забиванию межпластинчатых каналов [10, 11].

Помимо внедрения различных технических решений в области проектирования теплообменных аппаратов, не менее важным направлением является разработка новых методов и методик определения оптимальной скорости движения теплоносителей, от величины которой зависят тепловая производительность и размеры теплообменников [12].

В статье [13] на примере трубчатого теплообменника предложен вариант определения оптимальной скорости движения теплоносителей исходя из минимальных годовых денежных затрат. Авторы публикации отмечают, что несмотря на общепринятое значение оптимальной скорости воды в трубках 1,0 м/с, выбрать теплообменный аппарат с заданной скоростью движения теплоносителя проблематично по причине дискретности типоразмеров теплообменников. Как следствие, диапазон оптимальных значений скоростей воды в трубках должен быть расширен от 0,7 до 1,0 м/с, что соответствует максимальной эффективности теплообменных аппаратов.

Оптимальная скорость движения нагреваемой воды в трубках секционных (скоростных) кожухотрубных водо-водяных подогревателей также может зависеть от соотношения максимальных тепловых нагрузок на нужды горячего водоснабжения и отопления. В статье [14] отмечено, что при соотношении тепловых нагрузок $\psi = 0,2$ для скорости нагреваемой воды в трубках 0,8 м/с суммарные потери напора по сетевой воде составляют около 13 м вод. ст. В данном случае авторы публикации предлагают ориентироваться на скорость греющей воды в межтрубном пространстве теплообменника, которая не должна превышать 1,0 м/с. При условии $\psi = 1,0$ рекомендуемая скорость нагреваемой воды в трубках теплообменного аппарата составляет 0,7 м/с.

На основе решения оптимизационной задачи предлагается формула для вычисления оптимальной массовой скорости движения воздуха в калорифере, которая учитывает следующие параметры: долю затрат на ремонты, определяемую в зависимости от количества смен работы калориферной установки; коэффициент полезного действия (КПД) вентиляторной установки; температуры теплоносителя и нагреваемого воздуха; суммарную площадь поверхности калориферов; продолжительность работы калориферов в течение календарного года; стоимость электрической энергии [15].

Нахождение оптимальной скорости движения теплоносителей связано не только с проектированием водо-водяных теплообменных аппаратов, но и с выполнением конструкторского расчета элементов котельного агрегата. Оптимальные скорости движения топочных газов и воздуха в воздухоподогревателях могут быть вычислены на основе технико-экономических расчетов, исходя из минимальных затрат на приобретение и эксплуатацию инженерного оборудования. В статье [16] приводятся расчетные уравнения для определения оптимальных значений скоростей топочных газов и воздуха при шахматном и коридорном расположении трубок в пучке.

Определение оптимальной скорости движения теплоносителей возможно также для рекуперативных теплообменных аппаратов, где греющей средой выступают высокотемпературные промышленные стоки. В статье [17] приводятся уравнения для вычисления скорости движения как холодного теплоносителя внутри труб, так и горячих промстоков в межтрубном пространстве теплообменника. При оптимальных скоростях движения теплоносителей в теплоутилизаторе коэффициент теплопередачи достигает максимального значения, что обеспечивает минимальные денежные затраты на приобретение дополнительного теплообменного оборудования.

Оптимальная скорость движения теплоносителя может быть использована при проектировании или технико-экономической оценке эффективности работы существующих грунтовых теплообменников в эксплуатируемых теплонасосных системах. Согласно результатам научных исследований [18], оптимальная скорость движения теплоносителя должна повышаться в случае уменьшения внутреннего диаметра трубок вертикального грунтового теплообменника, а также при увеличении глубины

скважины и росте средней за отопительный сезон линейной плотности теплового потока.

Цель исследования – определение скорости движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике, при которой достигаются минимальные капитальные вложения на приобретение, установку и обслуживание теплообменного оборудования для нужд отопления или горячего водоснабжения в текущих ценах за расчетный период времени.

Материалы и методы исследований. Для решения оптимизационной задачи на рис. 1 представлена расчетная схема пластинчатого теплообменника.

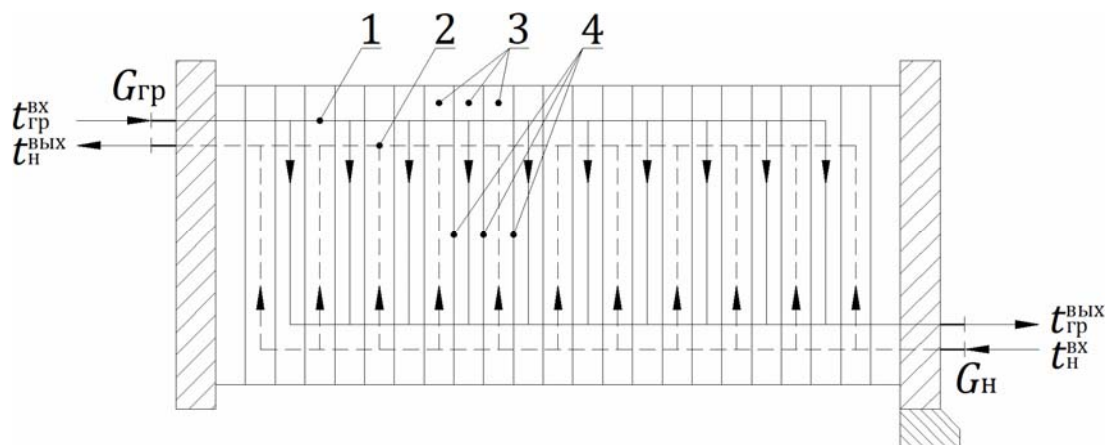


Рис. 1. Расчетная схема пластинчатого теплообменника:

1 – греющий теплоноситель; 2 – нагреваемый теплоноситель; 3 – каналы; 4 – пластины

Согласно рис. 1, греющий теплоноситель 1 с известным массовым расходом $G_{гр}$ равномерно распределяется по каналам 3, двигаясь сверху вниз между пластинами 4 теплообменного аппарата. Расчетная температура греющего теплоносителя 1 на входе в пластинчатый теплообменник составляет $t_{гр}^{вх}$, на выходе – $t_{гр}^{вых}$. Нагреваемый теплоноситель 2 с известным массовым расходом $G_{н}$ также равномерно распределяется по каналам 3, двигаясь снизу вверх между пластинами 4 теплообменного аппарата. Известно, что расчетная температура нагреваемого теплоносителя 2 на входе в пластинчатый теплообменник составляет $t_{н}^{вх}$, на выходе – $t_{н}^{вых}$. Схема компоновки пластинчатого водоподогревателя принята симметричной.

Определение скорости движения теплоносителей W в пластинчатом теплообменнике сводится к решению оптимизационной задачи. При этом на этапе определения оптимальной скорости $W_{опт}$ предполагается, что скорости движения греющего и нагреваемого теплоносителей между собой равны, т.е. $W_{гр} = W_{н}$. Очевидно, что при выполнении тепловых и гидравлических расчетов теплообменных аппаратов, как правило, встречается случай $G_{гр} \neq G_{н}$, и при симметричной компоновке пластинчатого водоподогревателя (суммарные площади сечений межпластинчатых каналов, в которых попеременно движутся в противоположных направлениях греющий 1 и нагреваемый 2 теплоносители, равны между собой, т.е. $f_{гр} = f_{н}$), строго говоря, $W_{гр} \neq W_{н}$. Тем не менее только в случае равенства скоростей движения греющего и нагреваемого теплоносителей ($W_{гр} = W_{н}$) достигается максимальная интенсивность теплообмена в рекуперативных теплообменных аппаратах и, как следствие, требуется минимальная поверхность нагрева водоподогревательной установки.

Проанализируем ситуацию с выбором оптимальной скорости движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике. Как отмечено ранее, согласно требованиям

СП 41-101-95, на предварительном этапе расчета оптимальная скорость воды в каналах пластинчатого теплообменника должна составлять $W_{\text{опт}} = 0,4 \text{ м/с}$. Если для рассматриваемых условий задаться более высокой скоростью движения теплоносителей (случай $W > W_{\text{опт}}$), то это приведет к закономерному увеличению потерь давления ΔP . Как следствие, возрастут затраты электрической энергии на работу сетевого и циркуляционного насосов, предназначенных для транспортировки соответственно греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей. С другой стороны, с увеличением скорости движения теплоносителей W в результате турбулизации потоков возрастут коэффициенты теплоотдачи от греющего теплоносителя 1 к поверхностям пластин 4 (α_1) и от поверхностей пластин 4 к нагреваемому теплоносителю 2 (α_2). Это, в свою очередь, приведет к росту коэффициента теплопередачи k , что в итоге, согласно уравнению теплопередачи, позволит установить пластинчатый теплообменник с меньшей площадью поверхности нагрева F . Рассматривая обратный случай, т. е. задавшись меньшей скоростью движения теплоносителей W (случай $W < W_{\text{опт}}$), получим диаметрально противоположный результат: уменьшение потерь давления ΔP и увеличение требуемой площади поверхности нагрева пластинчатого теплообменника F .

Исходя из вышеизложенных рассуждений, формула для определения денежных затрат на установку и эксплуатацию пластинчатого теплообменника в течение календарного года с учетом тепловой и гидравлической составляющих будет иметь общий вид (см. рис. 1):

$$З \approx F\Pi_F + k_3 \left(\frac{G_{\text{гр}} \Delta P_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} \eta_{\text{сн}}} + \frac{G_{\text{н}} \Delta P_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}} \eta_{\text{цн}}} \right) \Delta z T_{\text{э}}, \text{ руб.}, \quad (1)$$

где F – требуемая площадь поверхности нагрева пластинчатого теплообменника, м^2 ; Π_F – цена 1 м^2 поверхности нагрева водоподогревателя, руб./м^2 , которая включает в себя стоимость инженерного оборудования, а также денежные затраты на проектные, строительно-монтажные и пуско-наладочные работы, т.е. суммарные капитальные вложения; k_3 – коэффициент запаса мощности, который учитывает случайные перегрузки электродвигателей насосов и в среднем принимается равным $1,1 \div 1,3$; $G_{\text{гр}}$ и $G_{\text{н}}$ – массовые расходы соответственно греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей, кг/с ; $\Delta P_{\text{гр}}$ и $\Delta P_{\text{н}}$ – потери давления в пластинчатом теплообменнике соответственно для греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей, Па ; $\rho_{\text{гр}}$ и $\rho_{\text{н}}$ – плотность воды соответственно при средней температуре греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей, кг/м^3 ; $\eta_{\text{сн}}$ – коэффициент полезного действия (КПД) сетевого насоса; $\eta_{\text{цн}}$ – коэффициент полезного действия (КПД) циркуляционного насоса; Δz – продолжительность эксплуатации пластинчатого теплообменника в течение календарного года, с ; $T_{\text{э}}$ – тариф на электрическую энергию, руб./Дж .

После математических преобразований уравнение (1) примет более развернутый вид:

$$\begin{aligned} З \approx & \frac{Q_{\text{max}} \Pi_F}{\beta \Delta t_{\text{ср}}} \left[\frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{W^{0,73}} \left(\frac{1}{A(t_{\text{гр}}^{\text{ср}})} + \frac{1}{A(t_{\text{н}}^{\text{ср}})} \right) \right] + \\ & + k_3 \left(\frac{G_{\text{гр}} \Phi_{\text{гр}} B(t_{\text{гр}}^{\text{ср}})}{\rho_{\text{гр}} \eta_{\text{сн}}} + \frac{G_{\text{н}} \Phi_{\text{н}} B(t_{\text{н}}^{\text{ср}})}{\rho_{\text{н}} \eta_{\text{цн}}} \right) W^{1,75} \Delta z T_{\text{э}}, \text{ руб.}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $Q_{\max}$ – расчетная тепловая мощность пластинчатого теплообменника (максимальный тепловой поток для рассматриваемой системы теплоснабжения здания), Вт; β – коэффициент, учитывающий уменьшение коэффициента теплопередачи из-за термического сопротивления накипи и загрязнений на пластинах 4, в зависимости от качества воды принимается равным $0,70 \div 0,85$; $\Delta t_{\text{ср}}$ – среднелогарифмический температурный напор или расчетная разность температур между греющим 1 и нагреваемым 2 теплоносителями, °С; $\delta_{\text{ст}}$ и $\lambda_{\text{ст}}$ – соответственно толщина, м, и коэффициент теплопроводности материала пластины 4, Вт/(м·К). Например, в соответствии с требованиями СП 41-101-95, коэффициент теплопроводности стали при отсутствии технических данных может быть принят равным 58 Вт/(м·К); W – скорость движения греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей в каналах 3 пластинчатого теплообменника, м/с; $A(t_{\text{гр}}^{\text{ср}})$ и $A(t_{\text{н}}^{\text{ср}})$ – теплообменные коэффициенты, зависящие от типа выбранных пластин 4 (табл. 1); $\varphi_{\text{гр}}$ и $\varphi_{\text{н}}$ – коэффициенты, учитывающие накипеобразование. По данным СП 41-101-95, для греющего теплоносителя $\varphi_{\text{гр}} = 1,0$, для нагреваемого теплоносителя в случае отсутствия опытных данных $\varphi_{\text{н}} = 1,5 \div 2,0$; $B(t_{\text{гр}}^{\text{ср}})$ и $B(t_{\text{н}}^{\text{ср}})$ – гидравлические коэффициенты, зависящие от типа выбранных пластин 4 (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты А (верхнее число) и Б (нижнее число)

Средняя температура теплоносителя $t_{\text{ср}}$, °С	Тип пластины		
	0,3р	0,6р	0,5Пр
30	13200	17648	17648
	137700	91800	91800
40	14220	19012	19012
	134100	89400	89400
50	15186	20303	20303
	130500	87000	87000
60	16098	21523	21523
	126900	84600	84600
70	16957	22671	22671
	123300	82200	82200
80	17762	23747	23747
	119700	79800	79800
90	18513	24750	24750
	116100	77400	77400
100	19210	25682	25682
	112500	75000	75000
110	19853	26542	26542
	108900	72600	72600

П р и м е ч а н и е . Средняя температура теплоносителя численно равна $t_{\text{ср}} = 0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})$.

Как видно из уравнения (2), искомая величина Z при заданных геометрических, тепловых и гидравлических условиях является функцией одной переменной – скорости движения теплоносителей W . Для определения экстремума функции

$3 = 3(W)$ (минимума или максимума) найдем ее первую производную и приравняем полученный результат к нулю, т. е. $\frac{d3}{dW} = 0$:

$$\begin{aligned} 0,73 \frac{Q_{\max} \Pi_F}{\beta \Delta t_{\text{cp}}} \left(\frac{1}{A(t_{\text{гр}}^{\text{cp}})} + \frac{1}{A(t_{\text{н}}^{\text{cp}})} \right) \frac{1}{W^{1,73}} = \\ = 1,75 k_3 \left(\frac{G_{\text{гр}} \varphi_{\text{гр}} B(t_{\text{гр}}^{\text{cp}})}{\rho_{\text{гр}} \eta_{\text{сн}}} + \frac{G_{\text{н}} \varphi_{\text{н}} B(t_{\text{н}}^{\text{cp}})}{\rho_{\text{н}} \eta_{\text{цн}}} \right) W^{0,75} \Delta z T_{\text{эз}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение (3) после окончательных математических преобразований может быть записано в приближенном виде:

$$W_{\text{опт}} \approx 0,705 \left[\frac{Q_{\max} \Pi_F}{\beta \Delta t_{\text{cp}} k_3 \Delta z T_{\text{эз}}} \cdot \frac{\frac{1}{A(t_{\text{гр}}^{\text{cp}})} + \frac{1}{A(t_{\text{н}}^{\text{cp}})}}{\frac{G_{\text{гр}} \varphi_{\text{гр}} B(t_{\text{гр}}^{\text{cp}})}{\rho_{\text{гр}} \eta_{\text{сн}}} + \frac{G_{\text{н}} \varphi_{\text{н}} B(t_{\text{н}}^{\text{cp}})}{\rho_{\text{н}} \eta_{\text{цн}}}} \right]^{0,4}, \text{ м/с}. \quad (4)$$

Результаты исследований. Рассмотрим решение уравнения (4) на примере конструкторского теплового и гидравлического расчета пластинчатого теплообменника, предназначенного для нужд отопления жилого здания в городе Вологде (Российская Федерация).

Исходные данные для выполнения расчета:

1. Тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания. Строительный объем отапливаемой части здания $V = 12500 \text{ м}^3$. Усредненная температура внутреннего воздуха принята равной $t_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$. Расчетная температура наружного воздуха для условий города Вологды, согласно данным СП 131.13330.2025 «Строительная климатология», равна $t_{\text{н,р}} = -32^\circ\text{C}$. Тогда для заданных климатических условий региона строительства максимальная тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания по укрупненным показателям составит $Q_{\max} = 314,3 \text{ кВт}$.

2. Массовые расходы теплоносителей на нужды отопления жилого здания. Расчетные температуры греющего теплоносителя на входе и на выходе из пластинчатого теплообменника соответственно равны: $t_{\text{гр}}^{\text{вх}} = 130^\circ\text{C}$ и $t_{\text{гр}}^{\text{вых}} = 80^\circ\text{C}$ (по требованиям СП 41-101-95 величина $t_{\text{гр}}^{\text{вых}}$ принимается на $5 \div 10^\circ\text{C}$ выше температуры воды в обратном трубопроводе системы отопления $t_{\text{н}}^{\text{вх}}$ при расчетной температуре наружного воздуха $t_{\text{н,р}}$). Средняя плотность греющего теплоносителя (воды) $\rho_{\text{гр}} \approx 955,1 \text{ кг/м}^3$. Расчетные температуры нагреваемого теплоносителя на входе и на выходе из пластинчатого теплообменника соответственно равны: $t_{\text{н}}^{\text{вх}} = 70^\circ\text{C}$ и $t_{\text{н}}^{\text{вых}} = 95^\circ\text{C}$. Средняя плотность нагреваемого теплоносителя (воды) $\rho_{\text{н}} \approx 970,4 \text{ кг/м}^3$. Тогда по уравнению теплового баланса массовые расходы греющего и нагреваемого теплоносителей соответственно равны: $G_{\text{гр}} = 1,5 \text{ кг/с}$ и $G_{\text{н}} = 3,0 \text{ кг/с}$.

3. Параметры пластинчатого теплообменника. Толщина и коэффициент теплопроводности стальной пластины приняты соответственно равными $\delta_{\text{ст}} = 0,001 \text{ м}$ и $\lambda_{\text{ст}} = 58 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Средний логарифмический температурный напор $\Delta t_{\text{cp}} \approx 20,0^\circ\text{C}$. Согласно табл. 1, теплообменные и гидравлические коэффициенты для

типа пластин $0,3p$ при значениях $t_{гр}^{cp} = 105^{\circ}\text{C}$ и $t_n^{cp} = 82,5^{\circ}\text{C}$ соответственно равны:

$$A(t_{гр}^{cp}) \approx 19538, \quad B(t_{гр}^{cp}) \approx 110700, \quad A(t_n^{cp}) \approx 17954 \quad \text{и} \quad B(t_n^{cp}) \approx 118800.$$

Коэффициенты, учитывающие накипеобразование, приняты равными $\varphi_{гр} = 1,0$ и $\varphi_n = 1,75$. Коэффициент, учитывающий понижение теплопередачи между греющим и нагреваемым теплоносителями из-за термического сопротивления накипи, $\beta = 0,80$. Суммарные капитальные вложения на приобретение, установку и обслуживание пластинчатого теплообменника для нужд отопления жилого здания на момент выполнения расчета приблизительно составляли $\Pi_F = 63500 \text{ руб./м}^2$.

4. Параметры эксплуатации насосного оборудования. Продолжительность отопительного сезона для города Вологды, по данным СП 131.13330.2025, составляет $n_{o,c} = 224$ сут. Коэффициент запаса мощности для обоих насосов принят одинаковым $k_3 = 1,2$. Коэффициент полезного действия (КПД) сетевого насоса $\eta_{сн} = 63,0\%$. Коэффициент полезного действия (КПД) циркуляционного насоса $\eta_{цн} = 29,0\%$. Тариф на электрическую энергию на момент выполнения расчета $T_{э} = 8,22 \text{ руб./ (кВт} \cdot \text{ч)}$.

С учетом исходных данных оптимальная скорость движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике в соответствии с формулой (4) составила $W_{опт} \approx 0,7 \text{ м/с}$, что почти в два раза превышает оптимальную скорость, регламентированную требованиями СП 41-101-95 ($W_{опт} = 0,4 \text{ м/с}$).

На рис. 2 представлен график зависимости денежных затрат на установку и эксплуатацию пластинчатого теплообменника в течение календарного года от скорости движения теплоносителей.

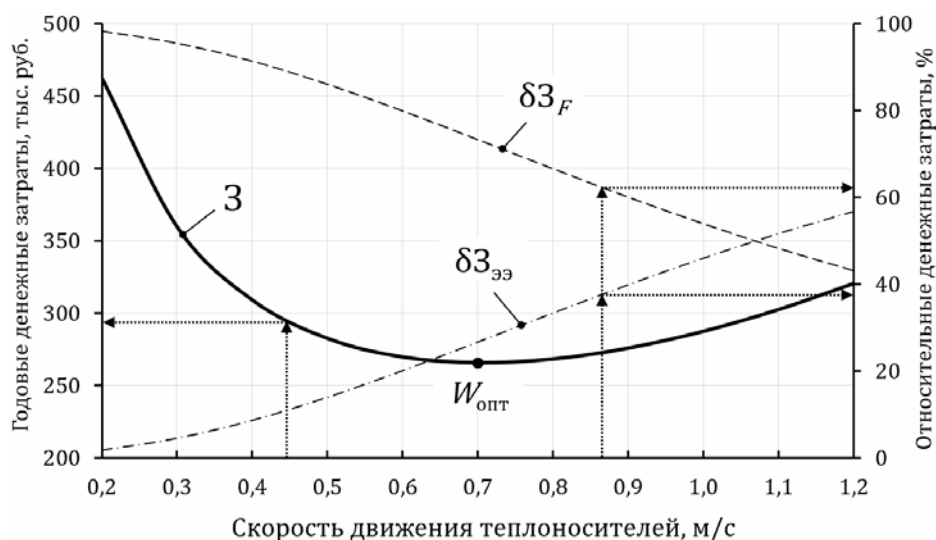


Рис. 2. Денежные затраты на установку и эксплуатацию пластинчатого теплообменника в зависимости от скорости движения теплоносителей:

δZ_F и $\delta Z_{э}$ – относительные затраты соответственно на капиталовложения и электроэнергию, %

Как видно из рис. 2, скорость движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике при $W_{опт} = 0,7 \text{ м/с}$ действительно проходит через точку минимума функции $Z = Z(W)$ (графическое подтверждение точки минимума). Как показали результаты программных вычислений, $\frac{d^2 Z}{dW^2} > 0$, что является аналитическим подтверждением точки минимума.

Скорости движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике ниже оптимального значения ($W < W_{\text{опт}}$) приведут к увеличению требуемой площади поверхности нагрева и, как следствие, станут причиной роста денежных затрат на приобретение и установку теплообменного оборудования:

$$W \downarrow \rightarrow \alpha_1 \downarrow (\alpha_2 \downarrow) \rightarrow k \downarrow \rightarrow F \uparrow \rightarrow Z_F \uparrow. \quad (5)$$

В случае $W < W_{\text{опт}}$ годовые денежные затраты на электрическую энергию, которая расходуется на транспортировку греющей и нагреваемой воды, наоборот, снизятся, так как

$$W \downarrow \rightarrow \Delta P_{\text{гр}} \downarrow (\Delta P_{\text{н}} \downarrow) \rightarrow N_{\text{сн}} \downarrow (N_{\text{цн}} \downarrow) \rightarrow Z_{\text{э}} \downarrow, \quad (6)$$

где $N_{\text{сн}}$ и $N_{\text{цн}}$ – потребляемая электрическая мощность соответственно сетевого и циркуляционного насосов, Вт.

Для сравнения приведем некоторые результаты программных вычислений, согласно уравнению (2): при $W = 0,4$ м/с – $Z = 308,9$ тыс. руб. ($\delta Z_F = 91,4\%$ и $\delta Z_{\text{э}} = 8,6\%$); при $W = 0,7$ м/с – $Z = 265,7$ тыс. руб. ($\delta Z_F = 73,3\%$ и $\delta Z_{\text{э}} = 26,7\%$); при $W = 1,2$ м/с – $Z = 320,5$ тыс. руб. ($\delta Z_F = 43,2\%$ и $\delta Z_{\text{э}} = 56,8\%$).

Исходя из того что при $W > W_{\text{опт}}$ суммарные денежные затраты Z меняются не с такой высокой скоростью (см. рис. 2), как в случае $W < W_{\text{опт}}$, можно сказать о преобладающем влиянии на величину Z изначальных капитальных вложений на приобретение и установку пластинчатого теплообменника (Z_F) в сравнении с годовым потреблением электрической энергии насосным оборудованием ($Z_{\text{э}}$).

Увеличение скорости движения теплоносителей (случай $W > W_{\text{опт}}$), очевидно, приведет к диаметрально противоположным результатам, т.е.

$$W \uparrow \rightarrow \alpha_1 \uparrow (\alpha_2 \uparrow) \rightarrow k \uparrow \rightarrow F \downarrow \rightarrow Z_F \downarrow; \quad (7)$$

$$W \uparrow \rightarrow \Delta P_{\text{гр}} \uparrow (\Delta P_{\text{н}} \uparrow) \rightarrow N_{\text{сн}} \uparrow (N_{\text{цн}} \uparrow) \rightarrow Z_{\text{э}} \uparrow. \quad (8)$$

В табл. 2 представлены значения оптимальной скорости движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике $W_{\text{опт}}$ в зависимости от таких определяющих факторов, как укрупненная стоимость 1 м^2 поверхности нагрева теплообменного оборудования и тарифа на электрическую энергию $T_{\text{э}}$.

Т а б л и ц а 2

Оптимальная скорость движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике

$T_{\text{э}},$ руб./кВт·ч)	Укрупненная стоимость теплообменного оборудования C_F , руб./м ²									
	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000	90000	100000
5	0,41	0,54	0,64	0,72	0,79	0,84	0,90	0,95	0,99	1,02
7	0,36	0,48	0,56	0,63	0,69	0,74	0,79	0,83	0,87	0,91
10	0,31	0,41	0,49	0,54	0,60	0,64	0,68	0,72	0,75	0,79
12	0,29	0,38	0,45	0,51	0,55	0,60	0,63	0,67	0,70	0,73
15	0,27	0,35	0,41	0,46	0,51	0,54	0,58	0,61	0,64	0,67

Представим основные результаты конструкторского теплового и гидравлического расчета пластинчатого теплообменника (тип выбранной пластины в соответствии с табл. 1 – 0,3р) при заданных исходных данных (п р и м е ч а н и е : технические параметры пластинчатого теплообменника приведены при оптимальных условиях, т. е. для $W_{гр} = W_n = W_{опт} = 0,7$ м/с):

1. Коэффициент теплопередачи пластинчатого теплообменника при расчетных коэффициентах теплоотдачи $\alpha_1 = 15150$ Вт/(м²·К) и $\alpha_2 = 13920$ Вт/(м²·К) имеет значение $k = 5160$ Вт/(м²·К).

2. Требуемая площадь поверхности нагрева пластинчатого теплообменника составила $F = 3,05$ м².

3. Потери давления для греющего теплоносителя $\Delta P_{гр} = 60,2$ кПа, для нагреваемого теплоносителя – $\Delta P_n = 64,6$ кПа.

Выводы. 1. На начальном этапе проектирования пластинчатых теплообменников определение оптимальной скорости движения теплоносителей позволяет учитывать ряд важных технических и экономических показателей, таких, как: максимальный тепловой поток на систему теплоснабжения здания, численно равный тепловой мощности теплообменного аппарата; массовые расходы греющего и нагреваемого теплоносителей; стоимость теплообменного оборудования, включая проектные, монтажные и пусконаладочные работы; тариф на электрическую энергию и др.

2. При максимальной тепловой нагрузке на нужды отопления жилого здания $Q_{\max} = 314,3$ кВт, а также расчетных массовых расходах теплоносителей $G_{гр} = 1,5$ кг/с и $G_n = 3,0$ кг/с вычислена оптимальная скорость движения потоков $W_{опт} = 0,7$ м/с. В этом случае при заданных исходных данных денежные затраты на установку и эксплуатацию пластинчатого теплообменника за отопительный период года достигнут минимального значения и составят 265,7 тыс. руб. (в долевом соотношении капитальные вложения на установку оборудования – 73,3 %, денежные затраты на электрическую энергию – 26,7 %). Для сравнения при $W = 0,4$ м/с денежные затраты равны 308,9 тыс. руб. (соответственно 91,4 % и 8,6 %), а при $W = 1,2$ м/с – 320,5 тыс. руб. (соответственно 43,2 % и 56,8 %).

3. Предложенное уравнение для определения оптимальной скорости движения теплоносителей является универсальным и может применяться при проектировании пластинчатых теплообменников (для выполнения конструкторского теплового и гидравлического расчета), в которых греющим и нагреваемым теплоносителями является вода.

Список литературы

1. Алхасова, Д.А. Расчет повышения эффективности скважинного теплообменника продольным оребрением теплопередающей поверхности / Д.А. Алхасова, М.Г. Алишаев // Теплоэнергетика. – 2009. – № 11. – С. 69–74.
2. Янчук, В.М. Повышение эффективности теплообменников подогревателей газа газораспределительной станции за счет использования труб с внутренним оребрением / В.М. Янчук, И.В. Шишкин, П.А. Кузьбожев, А.В. Сальников // Вести газовой науки. – 2020. – № S1 (43). – С. 87–92.
3. Mezaache, A. Heat transfer analysis of nanofluid flow with entropy generation in a corrugated heat exchanger channel partially filled with porous medium / A. Mezaache, F. Mebarek-Oudina, H. Vaidya, Y. Fouad. – DOI: 10.1002/htj.23149 // Heat Transfer. – 2024. – Vol. 53, Iss. 8. – P. 4625–4647.

4. Saraf, A.K. Application of nanofluids under laminar flow regime in heat exchangers – a review / A.K. Saraf, R. Goyal, A.F. Yusop. – DOI: 10.1007/s42452-025-07726-3 // Discover Applied Sciences. – 2025. – Vol. 7. – 1154.
5. Кондрашов, Н.П. Повышение эффективности процесса теплопередачи пластинчато-ребристого теплообменника / Н.П. Кондрашов, М.Г. Лагуткин // Евразийский союз ученых. – 2019. – № 3 (60). – С. 6–13.
6. Калашников, А.М. Классификация и сравнительная оценка методов повышения эффективности теплообменников для системы рекуперации тепловых потерь технологического оборудования / А.М. Калашников. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-8-11-18 // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 8. – С. 11–18.
7. Barmavatu, P. Critical review of heat exchangers for thermal energy storage (TES) and conservation systems / P. Barmavatu, P. Rani, M.K. Das, S.A. Deshmukh. – DOI: 10.1007/s10973-025-14408-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2025. – Vol. 150. – P. 10609–10626.
8. Biswas, S. Heat transfer and fluid flow analysis in a corrugated plate heat exchanger / S. Biswas, M.I. Inam, P.C. Roy. – DOI: 10.38032/scse.2025.1.20 // Proceedings of 7th International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering (ICMIEE2024) – Part I. – 2025. – Vol. 1. – P. 107–112.
9. Sreedevi, K.N.V. Optimization of heat flow parameters of corrugated plate heat exchanger with CuO nanoparticle / water as working fluid / K.N.V. Sreedevi, S.N. Sarada. – DOI: 10.14445/23488360/IJME-V12I9P103 // SSRG International Journal of Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 12, Iss. 9. – P. 29–36.
10. Sun, H. Failure analysis of corrosion perforation of heat exchanger plate / H. Sun, Y. Wang, J. Zhong, K. Guan. – DOI: 10.1007/s11668-025-02149-z // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2025. – Vol. 25. – P. 885–893.
11. Berce, J. Local temperature distribution of a plate heat exchanger undergoing crystallization fouling / J. Berce, M. Zupančič, M. Može, I. Golobič. – DOI: 10.1007/s00231-025-03593-1 // Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 61. – 68.
12. Taler, D. Experimental-numerical method for determining heat transfer correlations in the plate-and-frame heat exchanger / D. Taler, E. Ziolkowska, J. Taler, T. Sobota, M. Jaremkiewicz, M. Marcinkowski, T. Cieřlik. – DOI: 10.3390/en18174760 // Energies. – 2025. – No. 18 (17). – 4760.
13. Рафальская, Т.А. Определение оптимальных расчетных скоростей теплоносителей в трубках и межтрубном пространстве теплообменника / Т.А. Рафальская, Д.В. Зубков. – DOI: 10.32683/978-5-7795-0944-2-2022-163-169 // Актуальные вопросы архитектуры и строительства – материалы XV Международной научно-технической конференции. – Новосибирск, 2022. – С. 163–169.
14. Рафальская, Т.А. Определение оптимальных скоростей и температур теплоносителей для двухступенчатых схем теплообменников горячего водоснабжения / Т.А. Рафальская, Р.В. Чупин. – DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-86-102 // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 8 (788). – С. 86–102.
15. Еремкин, А.И. Экономическая эффективность энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / А.И. Еремкин, Т.И. Королева, Г.В. Данилин, В.В. Бызеев, А.Г. Аверкин. – Москва : АСВ, 2008. – 184 с.
16. Сугиров, Ж.У. К расчету оптимального соотношения скоростей рабочих сред в теплообменниках / Ж.У. Сугиров, С.М. Оспанова, М.К. Суйменова, Г.И. Есболай, А.И. Избасар // Вестник науки Южного Казахстана. – 2022. – № 1 (17). – С. 58–61.
17. Пелевин, Ф.В. Проблемные аспекты применения рекуперативных теплообменников в процессах утилизации горячих промышленных стоков / Ф.В. Пелевин, В.И. Тимченко, А.Г. Илиев // Вестник Ассоциации вузов туризма и сервиса. – 2008. – № 4. – С. 84–88.
18. Безродный, М.К. Оптимальные условия работы вертикальных грунтовых теплообменников для теплонасосных систем теплоснабжения / М.К. Безродный,

References

1. Alkhasova, D.A. Calculating the gain in the efficiency of a borehole heat exchanger due to furnishing its heat-transfer surface with longitudinal finning / D.A. Alkhasova, M.G. Alishaev // *Thermal Engineering*. – 2009. – No. 11. – P. 69–74.
2. Yanchuk, V.M. Enhancing the efficiency of gas heater heat exchangers at gas distribution stations through the use of internally finned tubes / V.M. Yanchuk, I.V. Shishkin, P.A. Kuz'bozhev, A.V. Sal'nikov // *Gas Science Bulletin*. – 2020. – No. S1 (43). – P. 87–92.
3. Mezaache, A. Heat transfer analysis of nanofluid flow with entropy generation in a corrugated heat exchanger channel partially filled with porous medium / A. Mezaache, F. Mebarek-Oudina, H. Vaidya, Y. Fouad. – DOI: 10.1002/htj.23149 // *Heat Transfer*. – 2024. – Vol. 53, Iss. 8. – P. 4625–4647.
4. Saraf, A.K. Application of nanofluids under laminar flow regime in heat exchangers – a review / A.K. Saraf, R. Goyal, A.F. Yusop. – DOI: 10.1007/s42452-025-07726-3 // *Discover Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 7. – 1154.
5. Kondrashov, N.P. Improving the efficiency of the process of heat transfer of plate-ribbed heat exchanger / N.P. Kondrashov, M.G. Lagutkin // *Eurasian Union of Scientists*. – 2019. – No. 3 (60). – P. 6–13.
6. Kalashnikov, A.M. Classification and comparative evaluation of methods for increasing the efficiency of heat exchangers for the heat loss recovery system of technological equipment / A.M. Kalashnikov. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-8-11-18 // *News of the Tula State University. Technical Sciences*. – 2021. – No. 8. – P. 11–18.
7. Barmavatu, P. Critical review of heat exchangers for thermal energy storage (TES) and conservation systems / P. Barmavatu, P. Rani, M.K. Das, S.A. Deshmukh. – DOI: 10.1007/s10973-025-14408-0 // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2025. – Vol. 150. – P. 10609–10626.
8. Biswas, S. Heat transfer and fluid flow analysis in a corrugated plate heat exchanger / S. Biswas, M.I. Inam, P.C. Roy. – DOI: 10.38032/scse.2025.1.20 // *Proceedings of 7th International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering (ICMIEE2024) – Part I*. – 2025. – Vol. 1. – P. 107–112.
9. Sreedevi, K.N.V. Optimization of heat flow parameters of corrugated plate heat exchanger with CuO nanoparticle / water as working fluid / K.N.V. Sreedevi, S.N. Sarada. – DOI: 10.14445/23488360/IJME-V12I9P103 // *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*. – 2025. – Vol. 12, Iss. 9. – P. 29–36.
10. Sun, H. Failure analysis of corrosion perforation of heat exchanger plate / H. Sun, Y. Wang, J. Zhong, K. Guan. – DOI: 10.1007/s11668-025-02149-z // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2025. – Vol. 25. – P. 885–893.
11. Berce, J. Local temperature distribution of a plate heat exchanger undergoing crystallization fouling / J. Berce, M. Zupančič, M. Može, I. Golobič. – DOI: 10.1007/s00231-025-03593-1 // *Heat and Mass Transfer*. – 2025. – Vol. 61. – 68.
12. Taler, D. Experimental-numerical method for determining heat transfer correlations in the plate-and-frame heat exchanger / D. Taler, E. Ziolkowska, J. Taler, T. Sobota, M. Jaremkiewicz, M. Marcinkowski, T. Cieřlik. – DOI: 10.3390/en18174760 // *Energies*. – 2025. – No. 18 (17). – 4760.
13. Rafalskaya, T.A. Determination of the optimal design flow velocities of heat transfer fluids in the tubes and shell side of a heat exchanger / T.A. Rafalskaya, D.V. Zubkov. – DOI: 10.32683/978-5-7795-0944-2-2022-163-169 // *Topical issues of architecture and construction. Proceedings of the 15th International scientific and technical conference*. – Novosibirsk, 2022. – P. 163–169.
14. Rafalskaya, T.A. Determination of optimal speeds and temperatures of heat carriers for two-stage schemes of heat exchangers for hot water supply / T.A. Rafalskaya,

R.V. Chupin. – DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-86-102 // News of Higher Educational Institutions. Construction. – 2024. – No. 8 (788). – P. 86–102.

15. Eremkin, A.I. Economic efficiency of energy conservation in heating, ventilation, and air-conditioning systems / A.I. Eremkin, T.I. Koroleva, G.V. Danilin, V.V. Byzeev, A.G. Averkin. – Moscow : ACU, 2008. – 184 p.

16. Sugirov, Zh.U. Toward the determination of the optimal velocity ratio of working media in heat exchangers / Zh.U. Sugirov, S.M. Ospanova, M.K. Sujmenova, G.I. Esbolaj, A.I. Izbasar // South Kazakhstan Science Herald. – 2022. – No. 1 (17). – P. 58–61.

17. Pelevin, F.V. Recuperative heat exchanger for the recycling of the hot industrial liquid-waste drain / F.V. Pelevin, V.I. Timchenko, A.G. Iliev // Universities for Tourism and Service Association Bulletin. – 2008. – No. 4. – P. 84–88.

18. Bezrodny, M.K. Optimal working conditions of vertical ground heat exchangers for heat pump heating systems / M.K. Bezrodny, N.A. Prytula, R.V. Perevortkin // Energy: economics, technologies, ecology. – 2014. – No. 4 (38). – P. 34–42.

УДК 622.691.4:662.76

DOI 10.54734/20722958_2026_3_146

Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, Саратов, ул.
Политехническая 77, тел. (8452) 99-88-93

Осипова Наталия Николаевна,

доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Теплогасоснабжение
и нефтегазовое дело»

E-mail: osnat75@mail.ru

Культьев Святослав Геннадиевич,

аспирант кафедры «Теплогасоснабжение
и нефтегазовое дело»

E-mail: svyatoslav@kultyaev.ru

Yuri Gagarin State Technical University of
Saratov

Russia, 410054, Saratov, 77,
Politechnicheskaya St., tel. (8452) 99-88-93

Osipova Nataliya Nikolaevna,

Doctor of Sciences, Associate professor, Head
of the Department «Heat and Gas Supply and
Oil and Gas Business»

E-mail: osnat75@mail.ru

Kultiaev Svyatoslav Gennadyevich,

Postgraduate student of the Department «Heat
and Gas Supply and Oil and Gas Business»

E-mail: svyatoslav@kultyaev.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БУТАНА ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Н.Н. Осипова, С.Г. Культьев

Исследован процесс смешения бутана с воздухом в рекомендованном соотношении для обеспечения параметров горючей смеси для систем газоснабжения потребителей. Разработана система создания газозвоздушной смеси на основе бутана с учётом его физико-химических свойств, обеспечивающая получение смеси в незначительных объёмах, характерной для жилищно-коммунальных объектов. Для исключения конденсации паровой фазы в процессе дросселирования предусмотрено использование естественной испарительной способности ёмкости хранения и искусственной регазификации газа. Дана принципиальная схема системы создания газозвоздушной смеси: блок подготовки воздуха, блок подготовки газа к смешению при получении газа в режиме естественной или искусственной регазификации, блок смешения газа с воздухом. Приведены данные экспериментальной апробации разработанной системы.

Ключевые слова: газоснабжение жилищно-коммунальных объектов, бутан, газозвоздушная смесь, двухступенчатое дросселирование, подготовка воздуха

PRODUCING A BUTANE-BASED GAS-AIR MIXTURE FOR GAS SUPPLY SYSTEMS

N.N. Osipova, S.G. Kultiaev

The process of mixing butane with air in the recommended ratio to ensure the parameters of the combustible mixture for consumer gas supply systems has been studied. A system for producing a gas-air mixture based on butane has been developed, taking into account its physical and chemical properties, ensuring the production of a mixture in small volumes, typical for housing and communal facilities. To prevent condensation of the vapor phase during the throttling process, the natural evaporation capacity of the storage tank and artificial regasification of the gas are used. A schematic diagram of a gas-air mixture production system is presented: an air preparation unit, a gas preparation unit for mixing during gas production in natural or artificial regasification mode, and a gas-air mixing unit. The data of experimental testing of the developed system are presented.

Keywords: gas supply to housing and communal facilities, butane, gas-air mixture, two-stage throttling, air preparation

Введение. В настоящее время бесперебойное снабжение энергетическими ресурсами (газовым топливом) принимает глобальный характер во всем мире. Миграция населения, стихийные бедствия и катаклизмы, аварийные ситуации, выход из строя источников генерации централизованных систем приводят к чрезвычайным ситуа-

циям, требующим моментального реагирования и восстановления энергообеспечения населения. В этом случае решением проблемы может стать перевод потребителей на резервное топливо. Источником резервного топлива, заменяющего природный сетевой газ могут служить сжиженные углеводородные газы, а также газовоздушные смеси на их основе [1-6].

При рассмотрении результатов научных исследований по созданию газозвдуш- ных смесей на основе сжиженного углеводородного газа и организации систем газоснабжения на его основе, выполненных К.В. Быстровой [4], ассоциацией World LPG Association (WLPGA) [5], Н.И. Никитиным [7], А.П. Клименко [8], Н.И. Преоб- раженским [9], компанией Algas-SDI [10], было отмечено, что решения предложены с ориентацией на компонент сжиженного углеводородного газа – пропан, так как начало регазификации пропана осуществляется от температуры минус 42 °С, с минимальным избыточным давлением паров от 0,1 МПа в холодный период года и с избыточным давлением в сосудах регазификации и хранения 1,6 МПа при нагреве до макси- мальных температур (до плюс 45 °С) в теплый период времени года, что позволяет рекомендовать пропан к применению практически во всех климатических зонах.

В то же время, так как на территории РФ в соответствии с ГОСТ 34858 приме- няется сжиженный углеводородный газ на основе смесей компонентов пропана и бутана в различном соотношении в зависимости от сезона года с содержанием бутана в смеси от 35 % (пропан технический) до более 60 % (бутан технический), газовая фракция сжиженного углеводородного газа будет содержать бутан в газообразном состоянии. Использование рекомендаций, разработанных для режимов эксплуатации систем газоснабжения на базе пропана, при наличии бутановых фракций приводит к завышению параметров по производительности системы газоснабжения и некоррект- ному определению действительного избыточного давления, что может вызвать после- дующую конденсацию газозвдушной смеси в трубопроводах.

Исследования, проведенные авторами и представленные в публикациях [11, 12], позволили определить состав газозвдушной смеси на основе бутана, соответствующ- ий требованиям взаимозаменяемости горючих газов по числу Воббе, точке росы получаемой смеси, максимальной скорости распространения пламени при сжигании газозвдушной смеси. Также в публикациях представлены результаты исследования по созданию условий для обеспечения требуемого избыточного давления в емкостях хранения при колебаниях температуры жидкой фазы газа в процессе естественной регазификации и формирования оптимальных уровней заполнения жидкой фазой с учетом объёмного расширения газа при подземной и наземной установке емкостей. Таким образом, проведенные авторами исследования показали, что бутан как само- стоятельный источник энергоснабжения может быть применен в различных клима- тических регионах при обосновании систем газоснабжения.

Таким образом, целью исследования является разработка системы создания газозвдушной смеси на основе бутана с учетом его физико-химических свойств, исключающей использование трубки Вентури и обеспечивающей получение смеси в незначительных объемах, характерной для коммунально-бытового снабжения потре- бителей.

Задачи исследования при создании схемы смешения бутана с воздухом:

- максимально использовать естественную испарительную способность бутана в резервуаре хранения;
- обеспечить возможность искусственной регазификации бутана при отсутствии естественной испарительной способности газа;
- исключить конденсацию водяных паров при смешении бутана с воздухом в узлах редуцирования и смесеобразования;
- обеспечить необходимое соотношение газа с воздухом в узле смесеобразования.

Предметом исследования является система создания газозвдушной смеси на основе бутана для использования в автономных, резервных или временных системах газоснабжения жилищно-коммунальных объектов.

Объектом исследования является процесс смешения газа с воздухом в рекомендованном соотношении для обеспечения параметров горючей смеси для систем газоснабжения потребителей.

Разработка системы получения газозвушной смеси. Для получения газозвушной смеси авторами разработана система, включающая блок подготовки воздуха, блок подготовки газа к смешению при получении газа в режиме естественной или искусственной регазификации, блок смешения газа с воздухом. Принципиальная схема системы получения газозвушной смеси представлена на рис. 1.

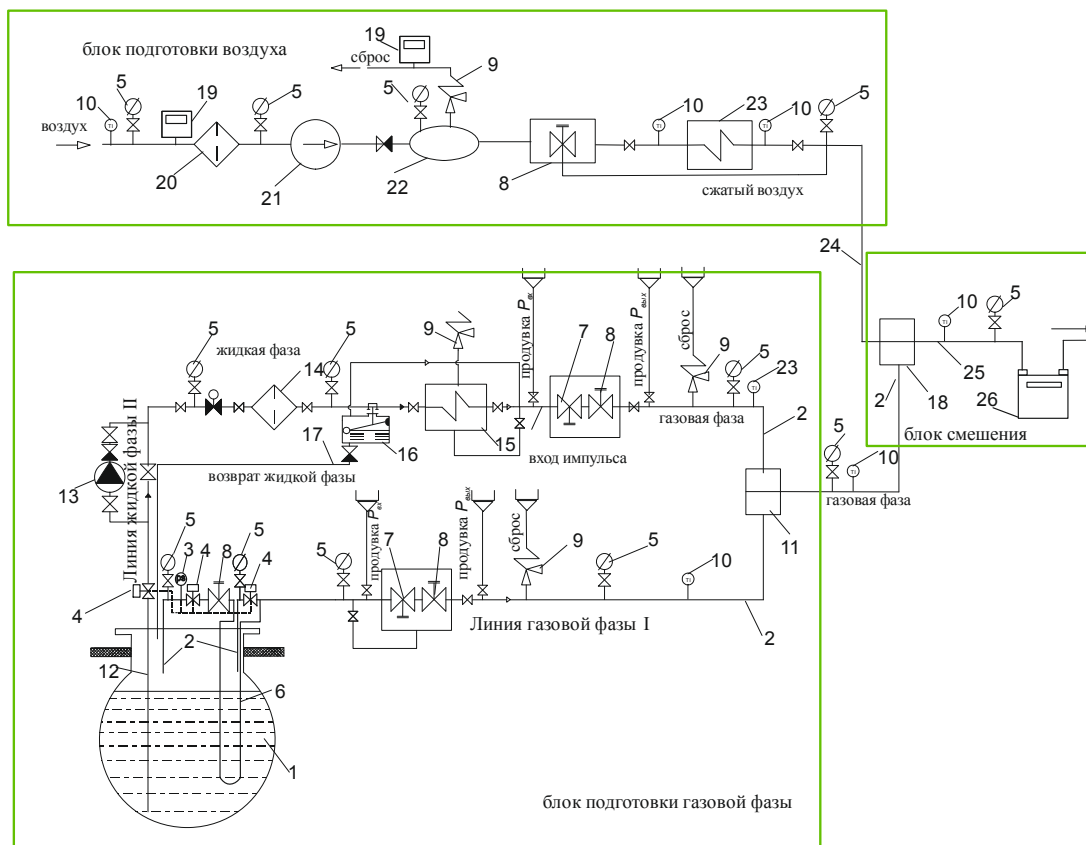


Рис. 1. Схема системы смешения бутана с воздухом:

- 1 – подземный резервуар; 2 – трубопровод паровой фазы; 3 – реле давления; 4 – клапан газовой фазы; 5 – манометр; 6 – трубопровод промежуточного нагрева; 7 – предохранительный запорный клапан; 8 – регулятор давления; 9 – предохранительный сбросной клапан; 10 – термометр; 11 – трехходовой смесительный клапан; 12 – трубопровод жидкой фазы; 13 – насос; 14 – фильтр жидкостный; 15 – испаритель; 16 – уровнемер с поплавковым регулятором уровня жидкости; 17 – трубопровод сброса жидкой фазы; 18 – пропорциональный клапан смесеобразования; 19 – счетчик расхода воздуха; 20 – фильтр воздушный; 21 – компрессор; 22 – ресивер; 23 – воздушонагреватель; 24 – трубопровод сжатого воздуха; 25 – трубопровод газозвушной смеси к потребителю; 26 – счетчик газовый

Систему подготовки газа выбирают на основании наличия контролируемого манометром (5) необходимого давления в подземном резервуаре (1) и осуществляют попеременной работой многофункциональных клапанов отбора паровой и жидкой фаз (4), переключаемых с помощью сигнала от реле давления (3).

Из-за наличия значительного снижения давления на линии подготовки газа с естественной регазификацией, обуславливающего конденсацию паровой фазы и образование кристаллогидратов в регуляторах давления, было выбрано двухступенчатое редуцирование газовой фазы с промежуточным нагревом паров бутана между ступенями редуцирования в самом резервуаре. Двухступенчатое редуцирование газа предусматривает снижение давления бутана в регуляторе давления (8) первой ступени

редуцирования с выходным средним давлением в диапазоне давлений от 1,6 до 0,2 МПа и регуляторе давления (8) второй ступени редуцирования с выходным низким давлением в диапазоне от 0,2 МПа до 2-5 кПа. Понижение давления первой ступени ограничивают величиной 0,2 МПа и затем производят нагрев газа в трубопроводе промежуточного нагрева (6) с длиной, принимаемой из условия возврата температуры газа на линию изотермы за счет теплообмена трубопровода с жидкой фазой газа в подземном резервуаре, равной значению изотермы перед началом процесса дросселирования. Далее газ подают в регулятор давления (8) второй ступени редуцирования и снижают давление до 2-5 кПа. Подготовленная таким способом паровая фаза по трубопроводу (2) через трехходовой смесительный клапан (11) подается в блок смешения с пропорционирующим клапаном смесеобразования (18).

При уменьшении давления в подземном резервуаре (1) ниже 0,01 МПа клапаны (4) на линии газовой фазы I закрываются, и через клапан отбора жидкой фазы (4) и трубопровод (12) насосом (13) подается жидкая фаза бутана в систему подготовки газа с искусственной регазификацией через жидкостный фильтр (14), где жидкую фазу газа очищают от механических примесей и затем испаряют в испарителе (15). Уровень заполнения испарителя (15) жидкой фазой регулируют уровнемером с поплавковым клапаном (16), исключающим переполнение испарителя жидкой фазой, который заблокирован с электродвигателем насоса (13), регулирующим подачу жидкости в систему, и трубопроводом сброса жидкой фазы (17) в резервуар (1). Для исключения выпадения конденсата в летний период года и образования ледяных и гидратных пробок в зимний период в трубопроводе жидкой фазы системы с искусственной регазификацией газ нагревают в испарителе (15) до температуры плюс 20 °С. Затем понижают давление газа в регуляторе давления (8) до заданной величины в 2-5 кПа и подают в трехходовой смесительный клапан (11) для последующего смешения подготовленного газа с воздухом в пропорционирующем клапане смесеобразования (18).

Одновременно с подготовкой газа, осуществляемой естественным или искусственным способом регазификации, проводят подготовку воздуха для смешения. Воздух для смешения с паровой фазой сжиженного газа измеряют счетчиком расхода воздуха (19), очищают от механических примесей в воздушном фильтре (20), затем компрессором (21) воздух подают в ресивер (22), снижают давление в регуляторе давления (8), нагревают в воздухонагревателе (23) и подают по трубопроводу сжатого воздуха (24) в пропорционирующий клапан смесеобразования (18) для смешения с подготовленным газом. При одновременной работе нескольких потребителей ресивер (22) используют как накопитель сжатого воздуха для снятия пиковых нагрузок и обеспечивают стабильную подачу сжатого воздуха в систему. При превышении заданного давления в ресивере (22) для его выравнивания часть воздуха сбрасывается через сбросной клапан (9) с измерением его количества через счетчик (19).

Корректную работу оборудования системы подготовки газа по линии естественной и искусственной регазификации, а также подготовки воздуха на всех этапах контролируют манометрами давления (5). При превышении давления в системе срабатывают предохранительные клапаны (9), стравливающие порции газа или воздуха до достижения заданных параметров давления.

Смешение газа с воздухом предусматривается в пропорционирующем клапане (18), разработанном авторами (рис. 2).

Для получения смеси паров сжиженных газов с воздухом с заданными параметрами в пропорционирующий клапан (18) через штуцер (27) в мембранную полость (28) подают подготовленный газ, который, имея избыточное давление, оказывает воздействие на мембрану (30), смещая ее в полость (29), изменяя положение пружины (31). Одновременно через импульсные отверстия (32) в импульсной трубке (33) перераспределяют избыточное давление из мембранной полости (29) в полость (28), давление в полостях (29) и (28) выравнивается, пружина (31) сжимается, открывая штуцер для прохода воздуха (34), смещая клапан расхода воздуха (35) и создавая давление на клапаны (36) для прохода газа в камеру смешения (37). Перемещение мембраны (30) регулирует площадь открытия сечения воздушного штуцера (34) клапаном (35), через

который воздух поступает в пропорционирующий клапан (18) и через клапаны (38) в камеру смешения (37). Затем газовоздушную смесь подают через штуцер выхода газовой смеси (39) в трубопровод газовой смеси к потребителю (25), контролируя температуру термометром (10) и давление манометром (5), а расход – газовым счетчиком (26).

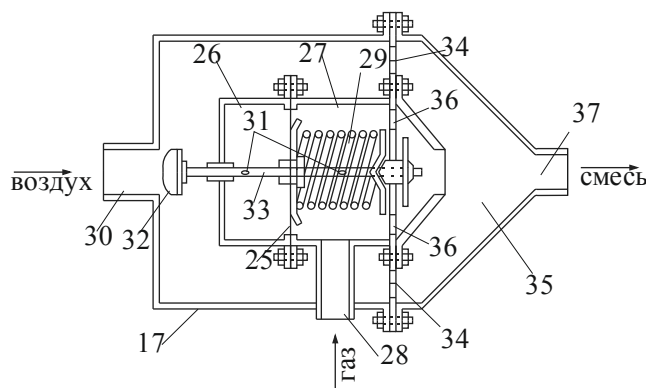


Рис. 2. Пропорционирующий клапан смешения:

- 27 – штуцер входа газа; 28; 29 – мембранные полости; 30 – мембрана; 31 – пружина;
- 32 – импульсные отверстия; 33 – импульсная трубка; 34 – штуцер входа воздуха;
- 35 – клапан расхода воздуха; 36 – клапаны для прохода газа; 37 – камера смешения;
- 38 – клапаны для прохода воздуха; 39 – штуцер выхода газовой смеси

Экспериментальная часть. Для апробации разработанной системы получения газовой смеси были проведены экспериментальные исследования на чистом бутане состава 99,9 %, подаваемом в сеть из баллона при естественной регазификации по линии газовой фазы I. Все используемые в экспериментальной установке приборы и оборудование имеют действующие сроки поверки.

В процессе эксперимента проводились замеры параметров:

- расхода воздуха, подаваемого в систему подготовки и сбрасываемого при работе клапана (9);
- температуры и давления воздуха перед смешением в пропорционирующем клапане;
- температуры и давления газовой фазы бутана перед смешением в пропорционирующем клапане;
- температуры, давления и расхода полученной газовой смеси на выходе из пропорционирующего клапана.

Давление по линии газовой фазы I с естественной регазификацией бутана в расходной емкости при подаче в систему подготовки фиксировалось манометрами (5) и составляло 0,3 и 0,02 МПа. Минимальное давление воздуха принималось равным минимальному давлению газовой фазы бутана 0,02 МПа, максимальное с учетом обеспечения надежной работы системы автоматики и регулировки компрессора – 0,08 МПа. Объемный состав получаемой смеси принимался из расчета необходимого расхода смеси для сжигания в горелках бытовой газовой плиты от 0,05 до 0,5 м³/ч.

Расход паров бутана в газовой смеси определялся как разность расходов газовой смеси и воздуха, поступающего на смешение. В свою очередь, расход воздуха, поступающего на смешение в пропорционирующий клапан (18), вычислялся как разность расходов воздуха, поступающего на подготовку и удаляемого через сбросной клапан ресивера (9), измеряемых счетчиками (19).

Результаты исследований представлены в таблице.

Параметры системы смешения бутана с воздухом

Давление, МПа			Температура, °С				Расход, м³/ч		
газовой фазы		воздуха	газовой фазы		воздуха	смеси	газовой фазы бутана	воздуха	смеси
ступени редуцирования			ступени редуцирования						
1	2		1	2					
Опыт 1									
$\frac{0,32^1}{0,018^2}$	$\frac{0,018^1}{0,0027^2}$	$\frac{0,02^1}{0,0027^2}$	19,9¹	19,8²	$\frac{19,9^1}{19,9^2}$	19,9	0,245	0,25	0,495
$\frac{0,32}{0,017}$	$\frac{0,017}{0,0028}$	$\frac{0,02}{0,0028}$	19,8	19,7	$\frac{19,8}{19,8}$	19,8	0,13	0,13	0,26
$\frac{0,32}{0,018}$	$\frac{0,018}{0,0028}$	$\frac{0,02}{0,0028}$	19,9	19,8	$\frac{19,8}{19,7}$	19,8	0,055	0,057	0,112
$\frac{0,31}{0,017}$	$\frac{0,018}{0,0029}$	$\frac{0,02}{0,0029}$	19,7	19,6	$\frac{19,7}{19,7}$	19,7	0,022	0,021	0,043
Опыт 2									
$\frac{0,3^1}{0,078^2}$	$\frac{0,078^1}{0,0027^2}$	$\frac{0,08^1}{0,0028^2}$	19,6¹	19,6²	$\frac{19,6^1}{19,6^2}$	19,6	0,243	0,233	0,476
$\frac{0,32}{0,079}$	$\frac{0,079}{0,0028}$	$\frac{0,08}{0,0028}$	19,8	19,6	$\frac{19,7}{19,6}$	19,7	0,131	0,116	0,246
$\frac{0,31}{0,079}$	$\frac{0,079}{0,0029}$	$\frac{0,08}{0,0028}$	19,9	19,8	$\frac{19,8}{19,8}$	19,8	0,053	0,051	0,104
$\frac{0,31}{0,078}$	$\frac{0,078}{0,003}$	$\frac{0,08}{0,0031}$	19,7	19,7	$\frac{19,7}{19,6}$	19,7	0,026	0,014	0,05
Опыт 3									
$\frac{0,022^1}{0,020^2}$	$\frac{0,020^1}{0,0027^2}$	$\frac{0,02^1}{0,0027^2}$	19,8¹	19,7²	$\frac{19,8^1}{19,8^2}$	19,8	0,239	0,23	0,469
$\frac{0,021}{0,02}$	$\frac{0,02}{0,0028}$	$\frac{0,02}{0,0027}$	19,9	19,8	$\frac{19,8}{19,8}$	19,8	0,122	0,122	0,244
$\frac{0,020}{0,020}$	$\frac{0,020}{0,0027}$	$\frac{0,02}{0,0027}$	19,8	19,6	$\frac{19,8}{19,7}$	19,7	0,058	0,056	0,114
$\frac{0,021}{0,020}$	$\frac{0,020}{0,0029}$	$\frac{0,02}{0,0028}$	19,9	19,8	$\frac{19,8}{19,8}$	19,8	0,027	0,028	0,053
Опыт 4									
$\frac{0,23^1}{0,022^2}$	$\frac{0,022^1}{0,0026^2}$	$\frac{0,08^1}{0,0027^2}$	19,7¹	19,7²	$\frac{19,6^1}{19,5^2}$	19,6	0,24	0,245	0,485
$\frac{0,22}{0,022}$	$\frac{0,022}{0,0028}$	$\frac{0,08}{0,0028}$	19,6	19,6	$\frac{19,7}{19,7}$	19,7	0,121	0,121	0,242
$\frac{0,24}{0,023}$	$\frac{0,023}{0,0027}$	$\frac{0,08}{0,0027}$	19,8	19,7	$\frac{19,7}{19,7}$	19,7	0,062	0,06	0,122
$\frac{0,25}{0,022}$	$\frac{0,022}{0,0028}$	$\frac{0,08}{0,0028}$	19,6	19,6	$\frac{19,6}{19,6}$	19,6	0,027	0,025	0,052

Пр и м е ч а н и е . 1 – значения параметра до регулятора давления (термометра);
2 – значения параметра после регулятора давления (термометра).

Как видно из таблицы, наличие двух ступеней редуцирования газовой фазы бутана с промежуточным подогревом обуславливает стабилизацию температуры при дросселировании, что исключает выпадение конденсата в регуляторах давления. Значения давлений газовой фазы и воздуха после редуцирования различаются не более чем на 0,0001 МПа, что обеспечивает подачу в пропорционирующий клапан компонентов смеси с максимально близкими по величине давлениями, обеспечивающими смешение газа с воздухом в расчётном диапазоне значений от 48 до 52 %. Максимальные величины отклонений от оптимального рекомендуемого соотношения

наблюдаются при минимальных расходах газозвоздушной смеси, что соответствует работе газовой плиты на конфорках минимальной мощности.

Выводы

1. Разработана система создания газозвоздушной смеси бутана с воздухом, предусматривающая использование естественной испарительной способности емкости хранения и искусственной регазификации газа.

2. Обосновано использование комбинированной схемы получения газовой фазы по линиям редуцирования, исключаяющей конденсацию паровой фазы в процессе дросселирования по линии естественной регазификации за счет применения двухступенчатого дросселирования газовой фазы и промежуточного нагрева газовой фазы между ступенями редуцирования.

3. Приведенная система обеспечивает необходимое соотношение газа с воздухом в узле смесеобразования системы газоснабжения жилищно-коммунального объекта.

Список литературы

1. Шеногин, М.В. Предложения по развитию программ автономной газификации регионов / М.В. Шеногин // E-Scio. – 2019. – №11(38). – URL: <https://e-scio.ru/wp-content/uploads/2019/11/Шеногин-М.-В.pdf> (дата обращения: 01.02.2026).

2. Peneva, T. Mapping energy vulnerability of households in bulgaria / T. Peneva // Economic Studies journal, Bulgarian Academy of Sciences – Economic Research Institute. – 2025. – Issue 5. – P. 3–26.

3. Liquefied petroleum gas (LPG) – Global strategic business report : Market glass, Inc. – Global Industry Analysts, Inc., 2026. – 244 p.

4. Быстрова, К.В. Системы газоснабжения пропан-бутановыми смесями с воздухом/ К.В. Быстрова // Молодые исследователи – регионам : материалы Всероссийской научной конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2012. – Т.1 – С. 225–227.

5. Opportunities for LPG // World LPG Association. Synthetic Natural Gas –Neuilly-sur-Seine. – France : WLPGA; 2022. – 44 p.

6. Montuori, L. Perspectives of a Sustainable Future Based on LPG and Renewable BioLPG as Fuel Suppliers / L. Montuori, M. Alcázar-Ortega // New Developments and Existing Barriers. Natural Gas in the 21st Century. – IntechOpen, 2024. – Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1005164> (дата обращения: 01.02.2026).

7. Никитин, Н.И. Снабжение сжиженным газом объектов жилищно-коммунального и сельского хозяйства / Н.И. Никитин. – Москва : Стройиздат, 1976. – 105 с.

8. Клименко, А.П. Сжиженные углеводородные газы / А.П. Клименко. – Москва : Гостехиздат, 1962. – 429 с.

9. Преображенский, Н.И. Сжиженные газы / Н.И. Преображенский. – Ленинград : Недра, 1975. – 279 с.

10. Compact natural gas. Back-up system that is safe, reliable, and easy – Algas–SDI, 2024. – 10 p.

11. Дьяченко, К.В. Обоснование свойств газозвоздушных смесей на основе бутана технического / К.В. Дьяченко, Н.Н. Осипова, С.Г. Культяев // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газознергоснабжения. – 2019. – №1. – С. 228–232.

12. Osipova, N. Development of gas supply systems using butane-based gas-and-air mixtures / Nataliya Osipova, Sergey Kuznetsov, Svyatoslav Kultyaev // XXI international scientific conference EMMFT 2019 : International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT, 2019. – 2021. – P. 247–257.

References

1. Shenogin, M.V. Proposals for the Development of Autonomous Gasification Programs for Regions / M.V. Shenogin // E-Scio. 2019. – №11(38). – URL: <https://e-scio.ru/wp-content/uploads/2019/11/Shenogin-M.-B.pdf> (accessed: 01.02.2026).

2. Peneva, T. Mapping energy vulnerability of households in Bulgaria / T. Peneva // *Economic Studies journal*, Bulgarian Academy of Sciences – Economic Research Institute. – 2025. – Issue 5. – P. 3–26.
3. Liquefied petroleum gas (LPG) – Global strategic business report : Market glass, Inc. – Global Industry Analysts, Inc., 2026. – 244 p.
4. Bystrova, K.V. Gas supply systems with propane–butane mixtures with air / K.V. Bystrova // *Young researchers – to the regions : materials of the All–Russian scientific conference*. – Vologda : VoGTU, 2012. – Vol. 1 – P. 225–227.
5. Opportunities for LPG // *World LPG Association. Synthetic Natural Gas – Neuilly–sur–Seine*. – France : WLGPA; 2022. – 44 p.
6. Montuori, L. Perspectives of a Sustainable Future Based on LPG and Renewable BioLPG as Fuel Suppliers / L. Montuori, M. Alcázar–Ortega // *New Developments and Existing Barriers. Natural Gas in the 21st Century*. – IntechOpen, 2024. – Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1005164>. (Accessed: 01.02.2026).
7. Nikitin, N.I. Supply of liquefied gas to housing and communal services and agriculture / N.I. Nikitin. – Moscow : Stroyizdat, 1976. – 105 p.
8. Klimenko, A.P. Liquefied hydrocarbon gases / A.P. Klimenko. – Moscow : Gostekhizdat, 1962. – 429 p.
9. Preobrazhensky, N.I. Liquefied Gases / N.I. Preobrazhensky. – Leningrad : Nedra, 1975. – 279 p.
10. Compact Natural Gas. A Back–up System That Is Safe, Reliable, and Easy – Algas–SDI, 2024. – 10 p.
11. Dyachenko, K.V. Justification of the Properties of Gas–Air Mixtures Based on Technical Butane / K.V. Dyachenko, N.N. Osipova, S.G. Kultyaev // *Scientific and Technical Problems of Improving and Developing Gas and Energy Supply Systems*. – 2019. – №1. – P. 228–232.
12. Osipova, N. Development of gas supply systems using butane–based gas–and–air mixtures / Nataliya Osipova, Sergey Kuznetsov, Svyatoslav Kultyaev // *XXI international scientific conference EMMFT 2019 : International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT*, 2019. – 2021. – P. 247–257.

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г.Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационное
обеспечение управления и производства»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

Penza State university

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 36-82-09

Ponomareva Inna Konstantinovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Information Support
Management and Production»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КЛИМАТИЗАЦИИ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА УБРАНСТВА ПРАВОСЛАВНЫХ СООРУЖЕНИЙ

И.К. Пономарева

Актуальность исследования связана с оценкой эффективности применения специальных технических устройств (ТУ) климатизации и решением проблемы по разработке процесса управления жизненным циклом (ЖЦ) элементов убранства на основе оценки стоимости реставрационных затрат на каждом этапе ЖЦ. В качестве объекта исследования процессов управления ЖЦ убранства залов богослужения выбран Спасский кафедральный собор в г.Пензе. Техничко-экономические показатели получены на основе оценки стоимости капитальных и эксплуатационных затрат на разработку и использование специальных ТУ. Сравнительная оценка экономических показателей выполнена с учетом и без учета применения разработанных устройств климатизации. При оценке результатов экономических показателей указывалась необходимость учета инфляции на каждом этапе ЖЦ. Установлено, что в результате применения ТУ климатизации затраты на реставрационные работы на всех этапах ЖЦ убранства значительно ниже, чем без учета применения данных устройств.

Ключевые слова: микроклимат, вентиляция, православные сооружения, загрязнение воздуха, капитальные вложения, аналитическая схема, инфляционный показатель, жизненный цикл

THE EVALUATION MODEL OF DEVELOPED TECHNICAL CLIMATE CONTROL SOLUTIONS TO EXTEND THE LIFE CYCLE OF ORTHODOX STRUCTURES

I.K. Ponomareva

The relevance of this study relates to the evaluation of the use of specialized technical devices (TU) for air conditioning and the development of a lifecycle management process for decorative objects based on the assessment of restoration costs at each stage of the lifecycle. The Spassky Cathedral in Penza was chosen as an object of study of lifecycle management the processes of worship halls decoration. Technical and economic indicators were obtained based on an assessment of the capital and operating costs for the development and use of specialized TU. A comparative assessment of the economic indicators was performed with and without the use of the developed TU. When evaluating the results of the economic indicators, the need to account for inflation at each stage of the lifecycle was noted. It was found that the use of TU for air conditioning resulted in significantly lower restoration costs at all stages of the lifecycle than without the use of these devices.

Keywords: microclimate, ventilation, orthodox buildings, air pollution, capital investment, analytical framework, inflation indicator, life cycle

В последние годы в России ведутся масштабные работы по восстановлению и реконструкции разрушенных, а также строительству новых православных церквей,

храмов и соборов. Особенностью данных сооружений является размещение в зале богослужения, притворе, алтаре убранства в виде произведений архитектуры, золочения художественных росписей, икон, фресок и т.п., имеющих культурно-историческую и художественную ценность. Для обеспечения сохранности элементов убранства и создания комфортных условий для прихожан предъявляются высокие требования к параметрам искусственного микроклимата. Спецификой православных сооружений являются круглогодичные богослужения, постоянное нахождение большого количества прихожан и наличие сотни горящих парафиновых и восковых церковных свечей, расположенных на множестве подсвечников и в руках прихожан.

В результате неполного сгорания парафина, воска и лампадного масла происходит загрязнение воздуха углекислым газом, копотью и сажой, которые оседают в виде маслянистого образования на внутренней поверхности убранства и одежде прихожан. В результате убранству зала богослужения наносится существенный ущерб, и с годами оно приобретает неприглядный внешний вид. Другие выделяемые вредности: теплота, влага, углекислый газ – негативно сказываются на самочувствии прихожан. Для восстановления элементов убранства потребуются значительные экономические затраты на реставрационные работы [1-6].

Для снижения стоимости реставрационных работ и сохранения убранства в православных культовых сооружениях применяются системы отопления и общеобменные системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Однако исследования показали, что данные системы не исключают отрицательного воздействия продуктов сгорания церковных свечей (копоть, сажа) на убранство и росписи в зале, где проходят службы.

В данной статье рассматривается система, обеспечивающая улавливание и удаление копоти и сажи в местах горения над подсвечником за пределы зала. Приводятся ТЭО и эффективность применения данной системы для решения актуальной задачи – обеспечения сохранности убранства в церквях, храмах и соборах.

Проблема сохранения убранства в православных сооружениях приобретает особую важность в свете реализации Указа Президента РФ № 745 от 30.12.2021г., направленного на популяризацию народного творчества, сохранение культурных традиций, памятников истории и культуры. С целью продления ЖЦ убранства в православных сооружениях впервые созданы специальные ТУ для улавливания и удаления копоти и сажи, образующихся от сгорания церковных свечей над подсвечником, и изменения траектории движения загрязненного конвективного потока от внутренней поверхности стен с убранством над отопительными приборами в сторону зала [7].

Для дальнейших экономических исследований и оценки влияния указанных ТУ на жизненный цикл убранств в качестве объекта использовались первоначальные затраты на роспись в зале богослужения Спасского кафедрального собора в г. Пензе. Проведена сравнительная оценка затрат на содержание и реставрацию убранства в зале богослужения при условиях применения и без применения разработанных ТУ. На основе полученных результатов сравнительных расчетов были построены аналитические схемы жизнедеятельности убранства в зале богослужения в периоды ЖЦ 20, 40, 60, 80 и 100 лет. Для этого был выполнен технико-экономический расчет капитальных вложений на разработку ТУ, устанавливаемых над отопительным прибором и подсвечником, и местной механической вытяжки [8, 9, 10]. Капитальные вложения на создание ТУ и системы местной вытяжной вентиляции составили $K_T = 5823049$ руб. В ходе дальнейших исследований производился расчет эксплуатационных затрат, связанных с применением ТУ и системы местной вытяжной вентиляции и составивших $C_{ту} = 2100576$ руб., в течение 10 лет использования. Следовательно, ежегодные эксплуатационные затраты равняются 200 тыс. руб.

В данной статье предлагается методика построения аналитической схемы определения стоимости ЖЦ для предлагаемых периодов жизнедеятельности убранства. При этом за основу приняты затраты на выполнение реставрационных работ на каждом этапе цикла в процентах от первоначальной стоимости росписи и создания убранства, равной 210 млн руб., на примере Спасского кафедрального собора.

На каждом периоде цикла реставрационные затраты от первоначальной стоимости росписи составили: 1, 2, 3, 4, 5 процентов – при использовании разработанных ТУ и 6, 8, 10, 12, 15 процентов – без их применения. При этом расходы на реставрационные работы для первого и второго случаев на каждом периоде цикла соответственно составили 2,1; 4,2; 6,3; 8,4; 10,5 млн руб. и 12,6; 16,8; 21,1; 25,2; 31,5 млн руб. от начальных затрат на создание убранства. Расчетные технико-экономические показатели необходимы для построения аналитической схемы определения стоимости эффекта владения убранством в периоды ЖЦ убранства с учетом и без учета разработанных ТУ. Исходные данные для построения аналитической схемы затрат приведены в таблице.

Технико-экономические показатели оценки стоимости эффекта владения убранством с учетом и без учета ТУ

1. Стоимость убранства, млн руб.	210					
2. Стоимость техустройств, млн руб.	5,8					
3. Стоимость годовых эксплуатационных затрат, млн руб.	0,21					
4. Расчетные периоды, лет	0	20	40	60	80	100
5. Стоимость реставрации с ТУ, млн руб.	0	2,1	4,2	6,3	8,4	10,5
6. Стоимость реставрации без ТУ, млн руб.	0,0	12,6	16,8	21,1	25,2	31,5
7. Эксплуатационные затраты за расчетные периоды, млн руб.	0	4,2	8,4	12,6	16,8	21,0
8. Стоимость ЖЦ владения убранством без ТУ, млн руб.	210	222,6	239,4	260,5	285,7	317,2
9. Стоимость ЖЦ владения убранством с ТУ, млн руб.	215,8	217,9	222,1	228,4	236,8	247,3
10. Эффект сокращения стоимости владения убранством, млн руб. (пп.5-6)	-5,8	4,7	17,3	32,1	48,9	69,9

В таблице представлены сведения, полученные в результате теоретических исследований и произведенных технико-экономических и инженерных расчетов, необходимых для оценки эффективности использования ТУ климатизации в залах богослужения Спасского кафедрального собора. Эксплуатационные затраты за расчетные периоды, указанные в п.7 таблицы, рассчитывались как произведение годовых эксплуатационных затрат 0,21 млн руб./год на расчетные периоды 20, 40, 60, 100 лет и соответственно равны: 4,2; 8,4; 12,6; 16,8; 21 млн руб.

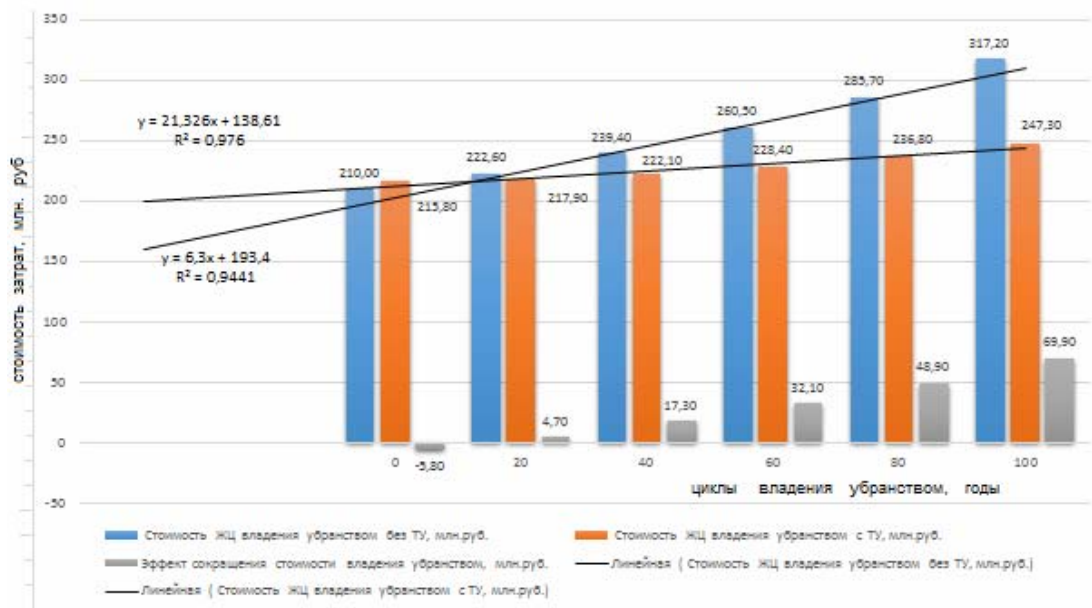
Стоимость ЖЦ владения убранством без ТУ (п. 8 таблицы) рассчитывалась как сумма первоначальных затрат на создание убранства 210 млн руб. и стоимости реставрации (п.6) и соответственно равна: 210; 222,6; 239,4; 260,5; 287,7; 317,2 млн руб.

Стоимость ЖЦ владения убранством с применением ТУ (п. 9 таблицы) вычислялась как сумма начальных затрат на создание убранства 215,8 млн руб. и стоимости реставрации (п.5) и соответственно равна: 215,8; 217,9; 222,1; 228,4; 236,8; 247,3 млн руб.

Эффект сокращения стоимости владения убранством (п. 10 таблицы) определялся как разница значений, приведенных в пп.5 и 6, и соответственно равен:

– 5,8; 4,7; 17,3; 32,1; 48,9; 69,9 млн руб.

Аналитическая схема оценки стоимости затрат на каждом этапе жизненного цикла убранства в зале богослужения Спасского кафедрального собора с учетом и без учета применения ТУ климатизации и определения эффективности их использования приведена на рисунке.



Аналитическая схема оценки затрат на каждом этапе ЖЦ убранства и определения экономической эффективности применения ТУ

Анализ стоимости на каждом этапе жизненного цикла владения убранством позволяет сделать вывод, что при условии применения ТУ затраты увеличиваются, однако они значительно ниже, чем при отсутствии технических устройств. При этом эффект сокращения стоимости владения убранством возрастает. Отрицательный эффект имеет место только на начальной стадии первого этапа ЖЦ владения убранством.

Срок окупаемости капитальных затрат на создание ТУ и системы вытяжной вентиляции, применяемых для улавливания и удаления копоти и сажи, образованных над подсвечником, в виде линейной зависимости представлен на рисунке.

Линейная зависимость стоимости ЖЦ владения убранством с учетом применения ТУ построена на основе следующей формулы:

$$Y = 21,326 \cdot x + 138,61,$$

$$R^2 = 0,976, \quad (1)$$

где Y – стоимость затрат, млн руб.; x – рассматриваемый период жизненного цикла убранства, лет.

Стоимость жизненного цикла владения убранством без применения ТУ определена на основе формулы

$$Y = 6,3 \cdot x + 193,4,$$

$$R^2 = 0,9441. \quad (2)$$

Пересечение двух линейных зависимостей стоимости ЖЦ владения убранством указывает на то, что срок окупаемости обеспечивается в конце первого этапа ЖЦ убранства по итогам выполнения реставрационных работ в зале богослужения.

Сравнительный анализ экономической эффективности, полученной за счет применения ТУ, выполнен с учетом капитальных вложений $K_{\text{ту}}$ и эксплуатационных затрат $C_{\text{ту}}$, но без учета инфляционного показателя I_n в периоды ЖЦ убранства зала

богослужения. При применении инвестиционных решений важно учитывать ежегодный уровень инфляции, который влияет на реальную доходность финансовых вложений. Прогнозный уровень инфляции предлагается рассчитывать по формуле

$$I_n = -0,5131 \cdot n + 17,272, \quad (3)$$

где n – рассматриваемый период жизненного цикла убранства.

Показатель I_n уточняется в пределах каждого периода жизненного цикла убранства, анализируется на основе официальных данных.

ЖЦ является инструментом оценки затрат при выполнении реставрационных работ на протяжении всего периода эксплуатации убранства с учетом первоначальных капитальных и эксплуатационных расходов и инфляционных показателей. Управление ЖЦ является также инструментом принятия решения по разработке и использованию ТУ в современных системах климатизации православных культовых сооружений [5].

В ы в о д ы

1. Впервые предложена методика экономической оценки владения церковным убранством в зале богослужения в течение его ЖЦ в увязке с проведением реставрационных работ и применением специальных устройств для климатизации в помещениях православных культовых сооружений.

2. Экономическая целесообразность и эффективность применения разработанных устройств в виде подсвечника с вытяжным зонтом и устройства, обеспечивающего отклонение траектории загрязненного потока воздуха от убранства, размещенного на внутренней поверхности стен, доказаны выполненными расчетами.

Список литературы

1. Болотов, Е.Н. Храмы православные. Как сохранить наследство / Е.Н. Болотов // АВОК. – 2024. – № 3. – С. 180–186.
2. Болотов, Е.Н. Сохранение наследия: микроклимат музеев / Е.Н. Болотов // АВОК. – 2018. – № 1. – С. 170–176.
3. Беляев, К.В. Опыт оптимизации воздухораспределения и параметров микроклимата в православном храме / К.В. Беляев, А.В. Гарбарук, Д.А. Никулин, М.Х. Стрелец // АВОК. – 2021. – № 7. – С. 60–64.
4. Церковная реставрация. Как это делается <https://pravoslavie.ru/154004.html>
5. Беленская, О. Как защитить храм от сажи / О. Беленская, И. Фомин // Храмоводатель. – 2013. – № 2. – С. 20–25.
6. Беленская, О. Копоть в храме / О. Беленская, И. Фомин // Благоукраситель. – 2013. – № 39. – С. 30–35.
7. Еремкин, А.И. Теоретические основы и рекомендации по созданию местной вытяжной вентиляции продуктов сгорания свечей в зале богослужения / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, В.А. Леонтьев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1(46). – С. 195–202.
8. Баронин, С.А. Оценка и моделирование управления стоимостью владения жилой недвижимости на основе энергоэффективных мероприятий / С.А. Баронин, К.Ю. Кулаков // Недвижимость: экономика, управление. – 2020. – № 3. – С. 20–27.
9. Баронин, С.А. Развитие национальных проектов на основе контрактов на жизненные циклы по объектам капитального строительства / С.А. Баронин, А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2(43). – С. 100–108.
10. Пономарева, И.К. Разработка инновационных принципов климатизации в православных культовых сооружениях / И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4(65). – С. 183–191.

References

1. Bolotov, E.N. Orthodox Churches. How to Preserve the Heritage / E.N. Bolotov // AVOK. – 2024. – No. 3. – P. 180–186.
2. Bolotov, E.N. Preservation of Heritage: Microclimate of Museums / E.N. Bolotov // AVOK. – 2018. – No. 1. – P. 170–176.
3. Belyaev, K.V. Experience of Optimizing Air Distribution and Microclimate Parameters in an Orthodox Church / K.V. Belyaev, A.V. Garbaruk, D.A. Nikulin, M.Kh. Strelets // AVOK. – 2021. – No. 7. – P. 60–64.
4. Church Restoration. How it's done <https://pravoslavie.ru/154004.html>
5. Belenskaya, O. How to protect a temple from soot / O. Belenskaya, I. Fomin // Temple Builder. – 2013. – No. 2. – P. 20–25.
6. Belenskaya, O. Soot in the temple / O. Belenskaya, I. Fomin // Blagoukrasitel. – 2013. – No. 39. – P. 30–35.
7. Eremkin, A.I. Theoretical foundations and recommendations for creating a local exhaust ventilation of candle combustion products in the worship hall / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, V.A. Leontyev // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1(46). – P. 195–202.
8. Baronin, S.A. Assessment and modeling of residential real estate ownership cost management based on energy-efficient measures / S.A. Baronin, K.Yu. Kulakov // Real Estate: Economics, Management. – 2020. – No. 3. – P. 20–27.
9. Baronin, S.A. Development of national projects based on life cycle contracts for capital construction projects / S.A. Baronin, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 2 (43). – P. 100–108.
10. Ponomareva, I.K. Development of innovative principles of air conditioning in Orthodox religious buildings / I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 4 (65). – P. 183–191.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 72.711

DOI 10.54734/20722958_2026_3_160

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Лапшина Елена Геннадьевна,
кандидат архитектуры, профессор,
зав. кафедрой «Основы архитектурного
проектирования»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Lapshina Elena Gennadyevna,
Candidate of Science in Architecture,
Professor, Head of the department
«Fundamentals of Architectural Design»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Косаева Алёна Васильевна,
старший преподаватель кафедры «Дизайн»,
аспирант
E-mail: aw-kosaewa@mail.ru

Kosaeva Alyona Vasilyevna,
Senior lecturer of the department «Design»,
a post graduate
E-mail: aw-kosaewa@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ И ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА СУРСКОГО КРАЯ: ФОРТИФИКАЦИОННЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Е.Г. Лапшина, А.В. Косаева

Представлены результаты изучения объектов архитектуры и градостроительства Сурского края, сформировавшихся в процессе христианизации территории бассейна реки Суры – правого притока р. Волги. Рассмотрены условия, которые привели к необходимости создания оборонительной заградительной полосы, которая должна была защитить молодое централизованное государство – Московскую Русь – от набегов Орды. Показано появление и развитие новых форм фортификационных сооружений в дополнение к монастырям и крепостям – засечных линий. Описаны системообразующие элементы фортификационных сооружений древней и средневековой эпохи, их функциональное наполнение. Отмечены закономерности развития культурного пространства рассматриваемой территории.

Ключевые слова: архитектура и градостроительство, фортификационное сооружение, крепость, историческое развитие, культурное пространство, река Сура

FORMATION AND HISTORICAL DEVELOPMENT OF URBAN DEVELOPMENT OF THE SURSKY REGION: FORTIFICATION STRUCTURES

E.G. Lapshina, A.V. Kosaeva

The article is devoted to the study of the architecture and urban development of the Sura region, formed during the process of Christianization of the territory of the Sura River basin – the right tributary of the Volga River. First of all, the conditions that led to the need of building defensive barrier strip to protect the young centralized state of Muscovite Rus from the raids of the Wild Horde, are examined. The emergence and development of new forms of fortification structures in addition to monasteries and fortresses – abatis lines – is shown. The fundamental elements of ancient and

medieval fortifications and their functional content are studied. Patterns in the development of the cultural space of the area are identified.

Keywords: architecture and urban planning, fortification structure, fortress, historical development, cultural space, Sura River

Сурский край располагается в бассейне реки Суры (рис. 1), которая берет начало на Приволжской возвышенности и в устье сливается с крупнейшей рекой восточно-европейской территории России – Волгой. Эту территорию на протяжении тысячи лет заселяли многие народы, которые вели кочевой и оседлый образ жизни.



Рис. 1. Территория бассейна реки Суры

Во времена переселения народов в Посурье обитали городецкие племена. Они научились строить укрепленные поселения – городища. В Среднем Посурье известно Золотаревское городище (рис. 2), в устье Суры – Сомовское городище. Рассматривая укрепления Золотаревского городища, можно отметить его характерное местоположение – в мысе, у слияния двух речек (ручьев). Поселение защищал вал и ров. На высоком валу рубилась деревянная крепость с боевыми башнями [1]. Золотаревское городище противостояло нашествию войска хана Батыя и было сожжено монголо-татарами дотла в 1237 г.

Коренным народом Сурских лесов с III в. была древняя мордва. Эта народность проживала на исследуемой территории вплоть до XIII-XV вв. Русские пришли на эти земли после монголо-татарского нашествия в ходе расширения централизованного государства Руси в XVI-XVII вв. Город-крепость Пенза (рис. 3) был поставлен на реке Пензе в 1663 г. [2].

Оборонительные системы крупных городов на Руси того времени с учетом новых достижений военной техники были представлены стенами и башнями кремля. Они дополнялись монастырями, которые также выполняли функции отдельно стоящих крепостей. Особенностью облика русских крепостных сооружений была доминанта собора, который главенствовал в крепости. Это отличало русскую крепость от мрачных и суровых романских замков Западной Европы, где главной доминантой была башня донжона. Кремли и монастыри на Руси отличались динамичной уравнове-

шенностью, их живописность и многоплановость подчеркивала связь с природным окружением.



Рис. 2. Золотаревское городище, реконструкция (макет), выполнена в мастерской АРКА



Рис. 3. Крепость Пенза, реконструкция (макет), выполнен арх. А. Пановым

В XVII веке по всему Сурскому краю наблюдался рост строительства крепостей и оборонных линий [3, 4]. Так начался процесс христианизации этих земель и вытеснение народов, исповедовавших язычество. Сначала фортификационными сооружениями были, как правило, засечные линии, которые выстраивались в несколько полос (рис. 4, 5).

Рассматривая причины, которые обеспечили заселение русских вдоль реки Суры, можно назвать главную. Целью создания крепостей была оборона границ русского государства от набегов кочевников. Так, деревянная крепость Пенза рубилась на высоком берегу реки Пензы и связана была с военным делом, которое диктовало ее особенности. Мокшанская крепость была встроена в Пензенскую засечную черту.



Рис. 4. Засечные черты Русского государства в XVI в.



Рис. 5. Засечные черты Русского государства в XVII в.

Фортификационные сооружения, обеспечивавшие защиту территории, имели прямоугольные очертания и ставились на высоком, крутом берегу реки. В целом система оборонительных сооружений на территории Сурского края состояла из городов-крепостей, монастырей и засечных линий. В дополнение к основному каркасу развивалась сеть малых застав. Архитектурно-градостроительное развитие Среднего Поволжья в X – начале XX в. исследовалось рядом авторов, например Айдаровой Г.Н. и Надыровой Х.Г. [5, 6]. Однако в их работах территория Сурского бассейна практически не представлена.

Фортификационные сооружения Сурского края включали засечные линии и крепости в их составе, примером может быть крепость Саранск (рис. 6), или Саранский

кремль. Крепость была рублена из дерева в 1641 г. в составе Атемарско-Саранской засечной черты [7], которая соединялась с Симбирской засечной чертой. Крепость располагалась на левом берегу реки Инсар, в том месте, где в нее впадает река Саранка. Строительством крепости на землях мордвы руководил воевода Савелий Козловский. Крепость должна была защитить земли от набегов крымско-ногайских полчищ. «Первоначальная четырёхугольная крепость находилась на возвышенности, в ней было шесть шестигранных башен – четыре глухих угловых и две проездных. С северной стороны проездная башня называлась Спасской (высота 30 м), с южной – Никольской (высота 12 м). В плане крепость имела форму почти правильного прямоугольника: северная и южная сторона были по 240 м длиной, восточная и западная – по 270 м. Деревянные стены крепости проходили по верху земляного вала высотой до 6 м, перед которым был ров глубиной до 4 м. С юга крепость была защищена высоким склоном к реке Саранке, с востока – несохранившимся ныне оврагом. Все стены, рубленные тарасами, стояли на земляных валах, за исключением южной» [7]. Саранская крепость – это редкий случай при постройке форта в русском государстве. Река, протекавшая по территории крепости, могла во время осады снабжать защитников водой.

Рядом с Саранской крепостью находилась Инсарская крепость, вместе они образовали мощный узел обороны в долине реки Инсар. Здесь проходил тракт из Крымского ханства в Казань.

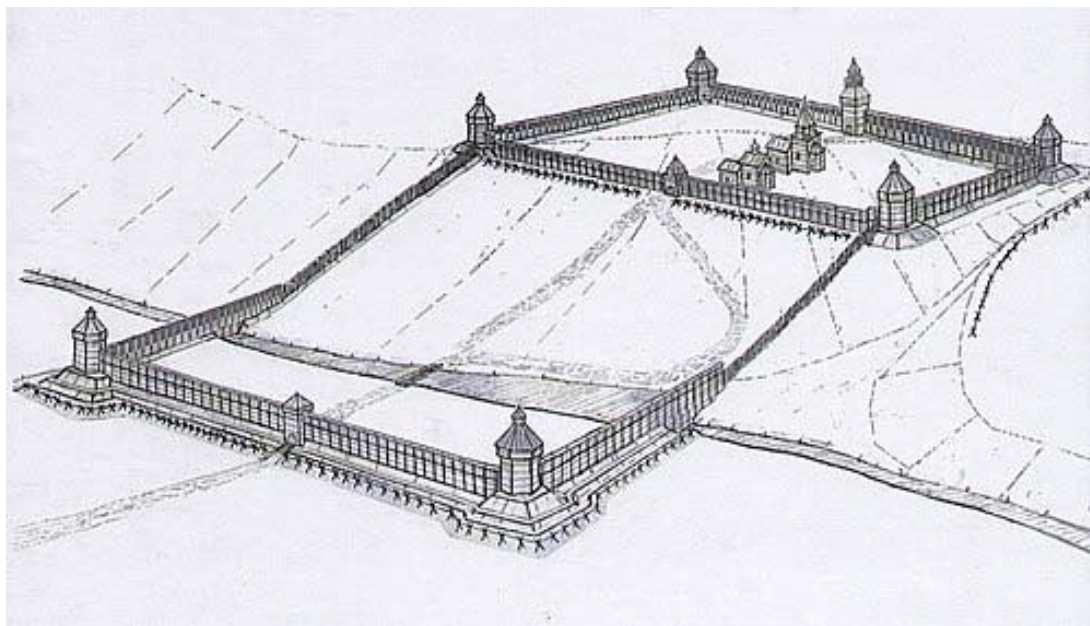


Рис. 6. Крепость Саранск

В состав засечной линии входили крепости Ломов [8] и Мокшан (рис. 7, а, б). Основаны обе крепости были на Пензенско-Ломовской оборонительной линии. Город-крепость Ломов построен в 1637 году, основатель Нижнего Ломова – Фёдор Малово. Деревянная крепость в Мокшане была срублена в 1679 году на правом высоком берегу реки Мокши. Отсюда начинался оборонительный вал, который тянулся в сторону крепости Пенза. Крепость осаждалась кубанскими кочевниками в 1708 году и в 1717 году, в результате этих осад она была разрушена. Ее конструкция аналогична древнерусским крепостям, например крепостная башня в Симбирске (рис. 8).

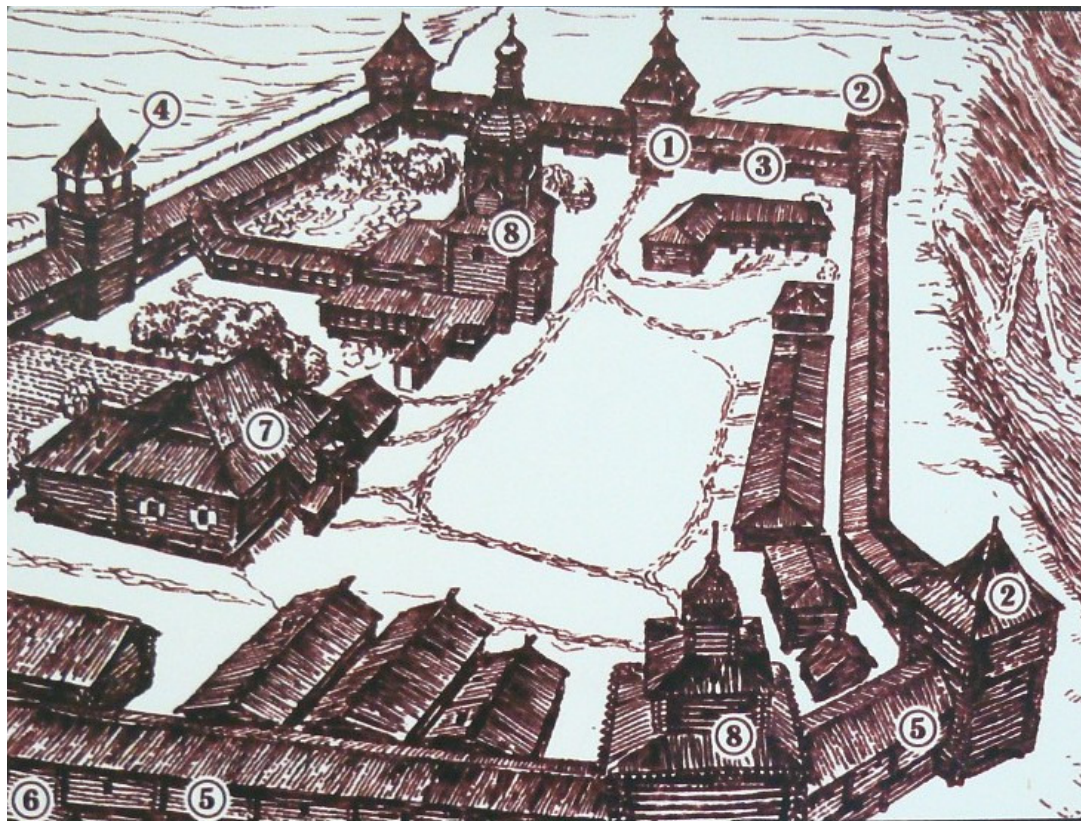


Рис.7, а. Крепость Ломов, 1641 г. Графическая реконструкция:
 1 – восточная проезжая башня; 2 – угловые башни; 3 – оружейный склад; 4 – северная проезжая башня с караулкой; 5 – западная стена и аблам; 6 – внешняя сторона стены; 7 – дом воеводы; 8 – церковь внутри крепости



Рис. 7, б. Крепость Мокшан, 1679 г.
 Реконструкция крепостной башни с частоколом, 1979 г.



Рис. 8. Крепость 1648 г., реконструкция в музее «Симбирская засечная черта» на реке Волге, г. Ульяновск

Деревянные крепости и засечные линии во второй половине XVIII века выполнили свою функцию форта, поэтому они были разобраны. Сегодня на их месте создаются музеи или ставятся памятные знаки.

Следует отметить принцип взаимосвязи и взаимозависимости объектов фортификации и архитектурно-планировочной структуры города. При всем разнообразии географических, климатических особенностей каждого города можно выявить общие закономерности взаимосвязи фортификационных сооружений и собственно города, его значимых объектов. Учитывался также принцип подчиненности объемно-пространственной и архитектурно-композиционной организации города целям его защиты. Происходит трансляция приемов построения города и объектов его защиты на всю его территорию [9].

Тенденция строить здания, изображающие крепость, развивалась в России и во второй половине XVIII в., она стала своеобразным признанием архитектурного совершенства крепостной архитектуры, способной составить альтернативу другим художественным системам. Первоначально воспринятый как затейливый мотив, легко воспроизводимый через довольно простые и легко узнаваемые композиционные схемы, образ крепости стал одной из самых ярких тенденций в русской архитектуре эпохи Просвещения, воплотившись в разнообразных и многочисленных постройках [10].

Выводы. Таким образом, показаны развитие фортификационных сооружений Сурского края в XVII-XVIII вв., их связь с более ранними историческими этапами и архитектурные особенности. Выделена основная цель строительства крепостей и православных монастырей – защита границ Русской земли от набегов кочевников, которая сопровождалась христианизацией Сурского края. Отмечено важное значение оборонительной функции на рассматриваемом этапе. Приведены примеры крепостей и монастырей города Пензы и ее окрестностей, показаны их функциональные особенности. Описаны такие закономерности развития архитектуры и градостроительства Сурского края, как выработка системы специализированных зон для оборонных действий, укрепление территорий и береговых.

В XVII веке завершается период древнерусского зодчества. С началом XVIII века открывается новая эпоха в истории государства Российского, в его культуре, архитектуре и градостроительстве. На 1717 год пришелся особенно сильный штурм крепости Пензы кочевыми племенами Заволжья, Каспия и Причерноморья. Таких набегов крепость Пенза пережила немало, но ни разу не была взята.

Подчеркнута необходимость сохранения объектов культурного наследия, расположенных на территории бассейна реки Суры.

Список литературы

1. Киреева, Л.А. Особенности функционально-пространственной организации градостроительного образования V–XII вв. (на примере Золотареvского городища) / Л.А. Киреева // Россия в мировом сообществе цивилизаций: история и современность : сб. статей. – Пенза : РИО ПГСХА, 2009. – С. 264.
2. Крепость (город) Пенза / [сост. коллектив авторов] // Пензенская энциклопедия. – Москва : Большая Российская энциклопедия, 2001. – С. 265–266.
3. Лапшина, Е.Г. Средневековые крепости, их виды и значение в развитии территории (на примере Сурского края) / Е.Г. Лапшина, А.В. Косаева // Реабилитация жилого пространства горожанина : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф. им. В. Татлина / под общ. ред. Е. Г. Лапшиной. – Пенза : ПГУАС, 2025. – С. 225–260.
4. История Пензенского края : в 3 т. / под общ. ред. О.В. Мельниченко. – Т. 1 : История Пензенского края с древнейших времён до конца XVIII века / под ред. Г.Н. Белорыбкина. – Пенза : Институт регионального развития Пензенской области, 2022. – С. 246–319.
5. Айдарова, Г.Н. Взаимодействие культур в архитектурно-градостроительном развитии Среднего Поволжья середины XVI – начала XX веков : автореф. дис. ... д-ра архитектуры / Г.Н. Айдарова. – Москва : НИИТАГ РААСН, 1997. – 48 с.
6. Надырова, Х.Г. Градостроительная культура Волго-Камья X – середины XVI вв. : концепция формирования и исторического развития: автореф. дис. ... д-ра архитектуры / Х.Г. Надырова. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2014. – 49 с.
7. Саранская крепость // Википедия: [сайт]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Саранская_крепость (дата обращения: 29.03.2026).
8. Холодков О. Нижний Ломов. Начало истории / О. Холодков. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2023. – 336 с. – URL: https://ridero.ru/books/nizhnii_lomov/freeText/?srsId=AfmBOopOdAwUsQOk9-ahWdfYAiGPG-Q9wW9RI9CtmYPNkVuNCvkiWQPU (дата обращения: 29.03.2026).
9. Сильнов, А.В. Архитектурно-планировочные особенности башенных комплексов фортификационных сооружений на примере Северного Причерноморья: автореф. дис. ... канд. архитектуры / А.В. Сильнов. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2026. – 24 с.
10. Башкирова, М.А. Образ крепости в русской гражданской и церковной архитектуре второй половины XVIII в.: автореф. дис. ... канд. искусствоведения / М.А. Башкирова. – Москва : МГУ, 2024. – 27 с.

References

1. Kireeva, L.A. Features of the functional and spatial organization of urban education in the V–XII centuries. (on the example of Zolotarevskoye settlement) / L.A. Kireeva // Russia in the global community of civilizations: history and modernity : collection of articles. Penza: RIO PGSHA, 2009. p. 264.
2. Penza Fortress (city) / [collective of authors] // Penza Encyclopedia. – Moscow : Great Russian Encyclopedia, 2001. – P. 265–266.
3. Lapshina, E.G. Medieval Fortresses, Their Types, and Their Role in the Development of the Territory (Based on the Sura Region) / E.G. Lapshina, A.V. Kosaeva // Rehabilitation of Urban Residents' Living Space: Proceedings of the 21st International Scientific and Practical Conference named after V. Tatlin / edited by E. G. Lapshina. – Penza : PGUAS, 2025. – P. 225–260.
4. History of the Penza Region : in 3 volumes / edited by O.V. Melnichenko. – Vol. 1: History of the Penza Region from Ancient Times to the End of the 18th Century / edited by G.N. Belorybkin. – Penza : Institute of Regional Development of the Penza Region, 2022. – P. 246–319.

-
5. Aydarova, G.N. Interaction of Cultures in the Architectural and Urban Planning Development of the Middle Volga Region in the Mid-16th to Early 20th Centuries: Abstract of Doctoral Dissertation in Architecture / G.N. Aydarova. – Moscow : NIITAG RAASN, 1997. – 48 p.
 6. Nadyrova, H.G. Urban planning culture of the Volga-Kama region of the X – middle of the XVI centuries: the concept of formation and historical development : Abstract of the Dissertation of the Doctor of Architecture / H. G. Nadyrova. – Nizhny Novgorod : NGASU, 2014. – 49 p.
 7. Saransk Fortress // Wikipedia : [website]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Saransk_Fortress (accessed: 29.03.2026).
 8. Kholodkov, O. Nizhny Lomov. The beginning of history / O. Kholodkov. – The electron. slava. – Moscow, 2023. – 336 p. – URL: https://ridero.ru/books/nizhnii_lomov/freeText/?srsId=AfmBOopOdAwUsQOk9-ahWdfYAiGPG-Q9wW9Rl9CtmYPNkVuNCvkiWQPU (date of request: 03/29/2026).
 9. Silnov, A.V. Architectural and Planning Features of Tower Complexes of Fortifications on the Example of the Northern Black Sea Region : Abstract of Dissertation for the Candidate of Architecture Degree / A.V. Silnov. – St. Petersburg : SPbGASU, 2026. – 24 p.
 10. Bashkirova, M.A. The Image of a Fortress in Russian Civil and Church Architecture of the Second Half of the 18th Century : Abstract of the Dissertation of Candidate of Art History / M. A. Bashkirova. – Moscow : Moscow State University, 2024. – 27 p.

УДК 725:72.02

DOI 10.54734/20722958_2026_3_169

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

*Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы*

Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Гарькин Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, кандидат
исторических наук, зав. кафедрой
«Архитектура и реставрация»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

*Государственное автономное учреждение
города Москвы Московский научно-
исследовательский и проектный институт
жилищного хозяйства
«МосжилНИИпроект»*

Россия, 105064, г. Москва, ул. Каланчевская,
д. 4/2, стр.1.

Веселов Виктор Валентинович,
первый заместитель директора ГАУ
«МосжилНИИпроект»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

*Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba*

Russia, Moscow, 6, Miklukho-Maklaya St.

Garkin Igor Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Candidate
of Historical Sciences, Head of the
Department «Architecture and Restoration »
E-mail: igor_garkin@mail.ru

*State Autonomous Institution of the City of
Moscow, Moscow Research and Design
Institute of Housing «MoszhilNIIProekt»*

Russia, 105064, Moscow, 4/2, Bldg. 1,
Kalanchevskaya St.

Veselov Viktor Valentinovich,
First Deputy Director, State Autonomous
Institution «MoszhilNIIProekt»

МЕТОДОЛОГИЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ЗДАНИЙ-ПАМЯТНИКОВ ПОД СОВРЕМЕННЫЕ УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

И.А. Гарькина, И.Н. Гарькин, В.В. Веселов

Проанализирована проблема совмещения требований нормативно-правовой охраны объектов культурного наследия (ОКН) с санитарно-гигиеническими и противопожарными нормативами, предъявляемыми к учреждениям здравоохранения. На основе анализа федерального законодательства (73ФЗ), сводов правил (СП 118.13330, СП 158.13330) и ведомственных приказов Минздрава выделены ключевые коллизии, возникающие при замене инженерных систем, изменении планировки и усилении несущих конструкций. Предложены классификация ремонтных вмешательств по степени воздействия на предмет охраны, алгоритм согласования проектной документации с региональным органом охраны ОКН. Приведена сравнительная таблица подходов к капитальному и текущему ремонту в зданиях-памятниках, используемых для оказания медицинской помощи. Рассмотрено риск-ориентированное проектирование на основе разработанной математической модели оценки интегрального риска проекта, учитывающей вероятность неблагоприятных событий (в частности, выявления несоответствий на этапе экспертизы), что позволит количественно обосновать выбор проектных решений.

Ключевые слова: объект культурного наследия, учреждение здравоохранения, ремонтно-реставрационные работы, риск-ориентированное проектирование, интегральная оценка

A METHODOLOGY FOR ADAPTATION OF LEGALLY-ISSUED BUILDINGS FOR MODERN HEALTHCARE FACILITIES

I.A. Garkina, I.N. Garkin, V.V. Veselov

This paper analyzes the problem of reconciling the requirements of the legal protection of cultural heritage sites (CHS) with the sanitary, hygienic, and fire safety standards applicable to healthcare facilities. Based on an analysis of federal legislation (73-FZ), codes of practice (SP 118.13330, SP 158.13330), and departmental orders of the Ministry of Health, key conflicts arising during the replacement of utility systems, layout changes, and the reinforcement of load-bearing structures are identified. A classification of repair interventions based on the degree of impact on the protected area is proposed, along with an algorithm for coordinating design documentation with the regional CHS protection authority. A comparative table of approaches to major and minor repairs in historically-issued buildings used for medical care is provided. We propose risk-based design based on a developed mathematical model for assessing the integrated risk of a project, taking into account the likelihood of adverse events (in particular, the identification of discrepancies during the assessment stage), which will allow for quantitative justification of the choice of design solutions.

Keywords: cultural heritage site, healthcare facility, repair and restoration work, risk-based design, integrated project risk assessment, monument adaptation, design documentation, conservation covenant, fire safety requirements, engineering infrastructure

Эксплуатация зданий-памятников, приспособленных под нужды лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ), сопряжена с рядом принципиальных и зачастую трудноразрешимых противоречий. С одной стороны, Федеральный закон от 25 июня 2002 г. № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» предписывает безусловное сохранение исторического облика, материала стен, подлинных перекрытий, лестничных маршей и декоративных элементов. С другой – актуальные санитарные правила (СанПиН 2.1.3.2630–10, СП 2.1.3678–20) требуют организации строгой изоляции палат, устройства приточно-вытяжной вентиляции с механическим побуждением, установки противопожарных дверей с доводчиками и обеспечения беспрепятственной эвакуации маломобильных групп населения.

Ситуация существенно осложняется тем, что современное лечебно-диагностическое учреждение представляет собой сложный инженерно-технологический комплекс. Его функционирование невозможно без размещения крупногабаритного высокотехнологичного оборудования – компьютерных томографов (КТ), магнитно-резонансных томографов (МРТ), рентгенодиагностических аппаратов, ангиографов, аппаратов ударно-волновой терапии и иных устройств, для которых предъявляются особые требования к несущей способности перекрытий, виброизоляции, электромагнитной совместимости, радиационной защите и параметрам микроклимата. Каждый такой прибор требует организации отдельного помещения с усиленным фундаментом или перекрытием, экранированными стенами, автономной климатической системой и специальными кабельными трассами. В условиях исторического здания эти требования вступают в прямой конфликт с охранными предписаниями: контур заземления и радиационная защита стен могут потребовать изменения их толщины или материала; установка МРТ – устройства массой более 4 тонн – предполагает усиление перекрытий, что нередко невозможно без нарушения предмета охраны; прокладка слаботочных и силовых кабельных трасс в штробах запрещена, если стены являются подлинной кладкой или декоративной поверхностью.

Дополнительные сложности возникают при осуществлении монтажа лифтового оборудования (в том числе грузовых лифтов для перемещения пациентов и аппаратуры), сплит-систем и приточно-вытяжных установок в зданиях, где каждый несущий элемент находится под охраной. Отсутствие единой методики, регламентирующей порядок совмещения требований Федерального закона № 73-ФЗ, санитарных норм и технических условий эксплуатации медицинского оборудования, приводит к затяги-

ванию согласований, многократному удорожанию проектных и строительно-монтажных работ, а в ряде случаев – к невозможности размещения необходимого диагностического и лечебного оборудования без частичной утраты исторической подлинности. Таким образом, задача выработки сбалансированного подхода к ремонтно-реставрационным мероприятиям в медицинских учреждениях-памятниках приобретает не только культурную, но и прямую социальную значимость [1...9].

Проблема совмещения охранных требований с эксплуатационными нуждами современных лечебно-профилактических учреждений, расположенных в зданиях – объектах культурного наследия, до настоящего времени не получила удовлетворительного научно-методического разрешения. Существующие нормативно-правовые акты и своды правил разрабатывались в значительной степени изолированно друг от друга, вследствие чего на практике возникает множество коллизий, замедляющих или делающих невозможной реализацию ремонтно-реставрационных проектов.

Цель настоящего исследования – разработка риск-ориентированного подхода к обоснованию проектных решений [10] и классификации видов вмешательств, допустимых без утраты предмета охраны, а также систематизация нормативных ограничений и технических барьеров, возникающих при проведении ремонтных работ в медицинских учреждениях, имеющих статус объектов культурного наследия. В рамках достижения указанной цели предполагается решение следующих взаимосвязанных задач.

Первая задача состоит в выявлении пересечений и противоречий между требованиями Федерального закона № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» и положениями СП 158.13330.2014 «Здания и помещения медицинских организаций. Правила проектирования». Указанные два документа формируют противоположные векторы нормативного регулирования: первый ориентирован на консервацию исторической подлинности, второй – на обеспечение функциональной полноценности лечебного процесса. Требуется не просто инвентаризировать расхождения, но и установить их иерархию по степени критичности для принятия проектных решений.

Вторая задача заключается в определении перечня конструктивных элементов и инженерных систем, которые наиболее часто вступают в конфликт с современными нормативами при ремонте зданий-памятников. Речь идёт о несущих и ограждающих конструкциях (стены, перекрытия, лестничные марши), заполнениях оконных и дверных проёмов, а также о пространственных параметрах помещений. Практика показывает, что именно эти элементы в большинстве случаев становятся причиной отказа в согласовании проектной документации либо требуют разработки специальных технических условий.

Третья задача предусматривает разработку матрицы решений для наиболее типичных ситуаций, возникающих в ходе приспособления памятников под медицинские нужды: прокладка вентиляционных каналов и воздуховодов, замена оконных блоков с сохранением исторического рисунка переплёта, устройство санитарно-гигиенических помещений (санузлов и душевых) в габаритах, не предусмотренных первоначальным замыслом здания. Принципиальным требованием к такой матрице является её практическая применимость: каждое решение должно быть снабжено указанием на допустимые границы вмешательства и необходимый объём согласовательных процедур.

Наконец, необходимо создать *математическую модель* оценки интегрального риска проекта.

Решение перечисленных задач в совокупности позволит сформировать методическую основу для разработки проектов ремонта и приспособления медицинских учреждений-памятников, не требующих индивидуальных отступлений от нормативов в каждом конкретном случае.

Настоящее исследование опирается на три взаимодополняющих метода:

- сравнительный анализ нормативно-правовых документов;
- натурное обследование трёх объектов культурного наследия, эксплуатируемых в качестве лечебно-профилактических учреждений;

– серия экспертных полуструктурированных интервью с представителями проектных организаций, обладающих лицензией Министерства культуры Российской Федерации на осуществление деятельности по сохранению объектов культурного наследия.

Отбор объектов для натурного обследования проводился по критерию типологической репрезентативности: в выборку вошли здания различного функционального назначения в прошлом (особняк конца XIX века, административное здание постройки 1910-х годов и бывшее учебное заведение 1930-х годов), что позволило охватить широкий спектр конструктивных схем и декоративных решений, типичных для фонда исторической застройки. Экспертные интервью ($n = 12$) охватили технических заказчиков, главных инженеров проектов и архитекторов-реставраторов, имеющих стаж работы в данной сфере не менее пяти лет. Обработка эмпирических данных проводилась методом аналитического описания с последующей типологизацией выявленных нормативно-технических коллизий.

Сравнительный анализ допустимых режимов проведения работ позволил выделить три принципиально различных подхода, каждый из которых характеризуется собственной нормативной базой, перечнем разрешённых видов вмешательства, степенью бюрократической сложности и связанным с ней удорожанием (см. таблицу).

Сравнительный анализ подходов к ремонтным вмешательствам в зданиях-памятниках, эксплуатируемых как лечебно-профилактические учреждения

Параметр	Капитальный ремонт без изменения предмета охраны	Приспособление для современного использования	Реставрация с элементами модернизации
1	2	3	4
Нормативное основание	Охранное обязательство; задание уполномоченного органа охраны (Минкультуры / регионального комитета)	Научно-проектная документация (стадия «Проект приспособления»); положительное заключение государственной историко-культурной экспертизы	Реставрационное задание; проектно-сметная документация, прошедшая государственную историко-культурную экспертизу
Вмешательство в стены	Устройство штраба глубиной до 20 мм. Точечное крепление оборудования без нарушения лицевого слоя кладки	Допускается устройство новых проёмов при обязательном условии усиления окружающих конструкций и сохранении фасадного декора	Штробление и сверление лицевых поверхностей запрещено; прокладка коммуникаций – исключительно во внешних коробах или подпольных каналах
Вентиляция	Установка локальных рециркуляционных агрегатов (без прокладки воздуховодов)	Прокладка воздуховодов в подпольном пространстве или подшивных потолках; установка precisely-вытяжных установок в технических помещениях	Применение систем микровентиляции через исторические фрамуги (с сохранением подлинной фурнитуры); исключение принудительной вентиляции больших сечений
Противопожарные двери	Врезка в дверное полотно с сохранением исторических наличников и кофки	Полная замена дверного блока с устройством противопожарного пояса по периметру проёма	Изготовление дверей «под старину» из массива ценных пород древесины с глубокой огнебиозащитной пропиткой (при наличии паспорта безопасности)

1	2	3	4
Санитарно-техническое оборудование	Использование существующих стояков и точек водоразбора. Замена сантехники на аналогичную по габаритам	Перетрассировка трубопроводов с выносом стояков в специализированные технические помещения	Скрытая разводка в плинтусных каналах или межэтажном пространстве без вскрытия перекрытий
Порядок согласования	Уведомительный. Срок рассмотрения – до 10 рабочих дней (при отсутствии претензий)	Получение разрешения на проведение работ; обязательное прохождение государственной экспертизы проектной документации	Обязательное проведение государственной историко-культурной экспертизы; согласование в Минкультуры
Ориентировочные сроки реализации	3–6 месяцев	12–18 месяцев	Более 24 месяцев
Примерное удорожание относительно базовой сметы (%)	+15–20 %	+30–50 %	+60–100 %

Здесь отчётливо прослеживается закономерность: по мере ужесточения охранных требований прогрессивно возрастают как продолжительность проектно-согласовательного цикла, так и итоговая стоимость работ. При этом наиболее сбалансированным вариантом для действующего лечебно-профилактического учреждения представляется режим *приспособления для современного использования*. Данный подход допускает технологическую модернизацию инженерных систем (вентиляции, водоснабжения, противопожарной защиты) при условии обязательного сохранения габаритов несущих конструкций и исторического декора помещений.

Ключевым инструментом сокращения общих сроков реализации проекта является заблаговременное проведение государственной историко-культурной экспертизы (ГИКЭ) (до момента выхода проектной документации на государственную экспертизу в строительной сфере). Разделение этих двух экспертных процедур во времени позволяет выявить и устранить охранные ограничения на ранних стадиях проектирования, минимизируя риск повторного прохождения согласований. Практика показывает, что совмещённый проход экспертиз (ГИКЭ + госэкспертиза) без предварительной проработки охранных требований увеличивает совокупную продолжительность инвестиционно-строительного цикла в среднем на 6–9 месяцев за счёт возвратов документации на доработку.

Проанализировав эмпирические данные (см. таблицу), перейдем от качественного к количественному обоснованию управленческих решений. В этой связи представляется продуктивным применение аппарата теории рисков [9-11], адаптированного к задачам сохранения объектов культурного наследия. Введём базовую модель, в которой интегральный риск R проекта выражается как функция двух переменных: вероятности наступления неблагоприятного события P (например, выявления несоответствия проектных решений охранным требованиям на этапе госэкспертизы) и стоимости последствий данного события C (затраты на повторное согласование, корректировку документации, простой строительной бригады):

$$R = P \cdot C. \quad (1)$$

Для случая совмещённого прохождения экспертиз (ГИКЭ + госэкспертиза единым блоком) вероятность возврата документации на доработку, по данным проведённых интервью, составляет: $P_1=0,70$ (70 % проектов). Стоимость одной итерации доработки,

включая повторное прохождение экспертизы и вынужденный простой, оценивается в среднем в $C_1=2,5$ млн руб. Тогда интегральный риск совмещённой схемы

$$R_1 = 0,7 \cdot 2,5 = 1,75 \text{ млн руб.}$$

При заблаговременном проведении ГИКЭ (до выхода на госэкспертизу) вероятность возврата снижается до $P_2=0,15$ (15 %), поскольку охранные ограничения выявлены и учтены уже на стадии разработки проектной документации. Стоимость последствий также сокращается, так как устраняется простой строительного подрядчика ($C_2=1,2$ млн руб.). Соответственно

$$R_2 = 0,15 \cdot 1,2 = 0,18 \text{ млн.руб.}$$

Снижение интегрального риска составляет:

$$\Delta R = R_1 - R_2 = 1,75 - 0,18 = 1,57 \text{ млн руб.}$$

Однако приведённая модель учитывает лишь финансовые потери и не отражает рисков утраты самого предмета охраны – исторического декора и несущих конструкций. Для их учёта введём дополнительный коэффициент уязвимости $\lambda \in [0;1]$, характеризующий долю декоративных элементов, которые могут быть необратимо повреждены при конкретном сценарии вмешательства. Тогда полный риск $R_{\text{полн}}$ примет вид:

$$R_{\text{полн}} = P \cdot (C + \lambda \cdot V_{\text{ист}}), \quad (2)$$

где $V_{\text{ист}}$ – экспертная восстановительная стоимость утрачиваемого декора (оценка реставрационной комиссии).

Для наглядности применим выражение (2) к двум альтернативным способам прокладки вентиляционных воздуховодов в лечебно-профилактическом учреждении, расположенном в здании-памятнике.

Сценарий А (штробление стен). Вероятность повреждения лицевого слоя декоративной штукатурки $P_A = 0,85$. Стоимость последствий (восстановление + штрафные санкции за нарушение охранного обязательства) $C_A = 3,8$ млн руб. Коэффициент уязвимости декора $\lambda_A = 0,40$ (40 % декора в зоне проходки подлежит замене); восстановительная стоимость декора – $V_{\text{ист}} = 12$ млн руб. Полный риск

$$R_A = 0,85 \cdot (3,8 + 0,40 \cdot 12) = 7,31 \text{ млн руб.}$$

Сценарий Б (прокладка в подпольном пространстве с сохранением декора). Вероятность повреждения $P_B = 0,08$. Стоимость реализации (устройство технического подполья) $C_B = 5,2$ млн руб. Коэффициент уязвимости декора $\lambda_B = 0,05$ (затрагиваются лишь незначительные участки плинтусов). Полный риск

$$R_B = 0,08 \cdot (5,2 + 0,05 \cdot 12) = 0,464 \text{ млн руб.}$$

Несмотря на более высокую начальную стоимость сценария Б ($C_B > C_A$), интегральный риск по формуле (2) оказывается на порядок ниже ($R_B \ll R_A$).

Таким образом, риск-ориентированный подход позволяет не только формализовать решение о выборе способа ремонтного вмешательства, но и количественно обосновать целесообразность заблаговременного проведения ГИКЭ. В терминах модели (1)–(2) ранняя экспертиза выступает инструментом снижения вероятности неблагоприятного события, а сохранение габаритов несущих конструкций и исторического декора – инструментом минимизации коэффициента уязвимости λ . Совокупное действие этих двух рычагов даёт мультипликативный эффект, выражающийся в кратной разнице

итоговых рисков показателей (в приведённом примере – от 1,57 до 6,85 млн руб., в зависимости от сценария).

Выводы

1. Предложен количественный инструмент для обоснования проектных решений и систематизированы нормативно-технические барьеры, возникающие при проведении ремонтно-реставрационных работ в учреждениях здравоохранения, отнесённых к объектам культурного наследия.

2. Выделены три подхода к выполнению работ: капитальный ремонт без изменения предмета охраны, приспособление для современного использования и реставрация с элементами модернизации. Установлено, что режим приспособления для современного использования представляет собой наиболее сбалансированный вариант для действующих лечебно-профилактических учреждений, который обеспечивает необходимую технологическую модернизацию инженерных систем при условии сохранения габаритов несущих конструкций и исторического декора помещений.

3. Подтверждено, что разделение во времени процедур государственной историко-культурной экспертизы (ГИКЭ) и государственной экспертизы проектной документации является действенным организационным инструментом сокращения сроков инвестиционно-строительного цикла.

4. Предложенная матрица решений для типичных ситуаций (прокладка коммуникаций, замена дверных блоков, устройство санитарно-гигиенических помещений) может служить методической основой для разработки проектной документации, не требующей индивидуальных отступлений от нормативов в каждом конкретном случае. Внедрение риск-ориентированного подхода в практику проектных организаций, обладающих лицензией Министерства культуры Российской Федерации, позволит сократить продолжительность согласовательного цикла и снизить вероятность необратимой утраты элементов предмета охраны.

Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, пофакторный и историко-генетический анализ // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 192–199.
2. Шеина, С.Г. Системное моделирование организационно-технологической надежности ремонта, реставрации и реконструкции объектов культурного наследия / С.Г. Шеина, Л.С. Сабитов, Д.К.С. Батаев, П.Д. Батаева, Я.Д. Батаева // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 1 (121). – С. 516–526.
3. Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития / Г.В. Есаулов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №. 6. – С. 9–25.
4. Бенаи, Х.А. Совершенствование архитектурно-градостроительной типологии зданий и сооружений, подлежащих реконструкции / Х.А. Бенаи, Т.В. Радионов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – №2(136). – С. 9–14.
5. Девятаева, Г.В. Технология реконструкции и модернизации зданий / Г.В. Девятаева. – Москва : ИНФРА-М, 2003. – 250 с.
6. Радионов, Т.В. Реконструкция и модернизация зданий и сооружений в рамках концепции инновационного развития городских территорий / Т.В. Радионов // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 153–160.
7. Вавилонская, Т.В. Приспособление объекта культурного наследия регионального значения «Гостиница "Центральная". Модерн» для современного использования / Т.В. Вавилонская, Ф.В. Карасев // Градостроительство и архитектура. – 2024. – Т. 14, № 1 (54). – С. 106–114.

8. Dutsev, M.V. The image of history as artistic dominant of the urban environment / M.V. Dutsev // *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*. – 2021. – Vol. 471. – P. 243.
9. Garkina, I.A. Construction survey objects agro industrial complex with system approach / I.A. Garkina, I.N. Garkin, S.V. Klyaev // *Advances in Engineering Research (AER)*. – 2017. – Vol. 102. – P.274–277.
10. Гойкалов, А.Н. Разработка метода оценки качества архитектурно-исторической среды / А.Н. Гойкалов, Т.В. Макарова, А.Ю. Семенихина // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2022. – № 1(39). – С. 73–79.
11. Белов, П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование / П.Г. Белов. – Москва : Юрайт, 2024. – 721 с.

References

1. Garkin, I.N. Historical and architectural value of cultural heritage sites: assessment methods, factorial and historical-genetic analysis / I.N. Garkin // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – № 1 (62). – P. 192–199.
2. Sheina, S.G. System modeling of organizational and technological reliability of repair, restoration and reconstruction of cultural heritage sites / S.G. Sheina, L.S. Sabitov, D.K.S. Bataev, P.D. Bataeva, Ya.D. Bataeva // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2025. – № 1 (121). – P.516–526.
3. Esaulov, G.V. Sustainable Architecture – From Principles to Development Strategy / G.V. Esaulov // *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2014. – №6. – P. 9–25.
4. Benai, H.A. Improvement of the Architectural and Urban Planning Typology of Buildings and Structures Subject to Reconstruction / H.A. Benai, T.V. Radionov // *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*. – 2019. – №. 2 (136) – P. 9–14.
5. Devyataeva, G.V. Technology of reconstruction and modernization of buildings / G.V. Devyataeva. – Moscow : INFRA-M, 2003. – 250 p.
6. Radionov, T.V. Reconstruction and modernization of buildings and structures within the framework of the concept of innovative development of urban territories / T.V. Radionov // *Modern industrial and civil engineering*. – 2017. – Vol. 13, № 3. – P. 153–160.
7. Vavilonskaya, T.V. Adaptation of the cultural heritage site of regional significance «Hotel "Central". Modern» for modern use / T.V. Vavilonskaya, F.V. Karasev // *Urban planning and architecture*. – 2024. – Vol. 14, № 1 (54). – P. 106–114.
8. Dutsev, M.V. The image of history as artistic dominant of the urban environment / M.V. Dutsev // *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*. – 2021. – Vol. 471. – P. 243.
9. Garkina, I.A. Construction survey objects agro-industrial complex with a systems approach / I.A. Garkina, I.N. Garkin, S.V. Klyaev // *Advances in Engineering Research (AER)*. – 2017. – Vol. 102. – P.274–277.
10. Goikalov, A.N. Development of a Method for Assessing the Quality of the Architectural and Historical Environment / A.N. Goikalov, T.V. Makarova, A.Yu. Semikhina // *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. – 2022. – №1 (39). – P. 73–79.
11. Belov, P.G. Risk management, systems analysis and modeling / P.G. Belov. – Moscow : URAYT Publishing House, 2024. – 721 p.

УДК 728.1:72.04

DOI 10.54734/20722958_2026_3_177

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
Россия, 670013, Республика Бурятия,
г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, стр. 1,
тел.: (3012) 43-14-15

Бекетова Татьяна Сергеевна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Конструирование, дизайн
и технологии», член Союза дизайнеров
России
E-mail: ty-a-paderina@narod.ru

*East Siberia State University of Technology
and Management*
Russia, 670013, Republic of Buryatia, Ulan-
Ude, 40B, Building 1, Klyuchevskaya St.,
tel.: (3012) 43-14-15

Beketova Tatiana Sergeevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Construction,
design and technology», Member of the
Russia Designers Association
E-mail: ty-a-paderina@narod.ru

ОРНАМЕНТАЛЬНЫЙ ДЕКОР В ПАНЕЛЬНОЙ ЗАСТРОЙКЕ УЛАН-УДЭ (СОВЕТСКИЙ ПЕРИОД)

Т.С. Бекетова

Проанализированы способы интеграции бурятских национальных орнаментальных мотивов в типовое крупнопанельное строительство Улан-Удэ 1960-1980-х годов. Исследованы архивные материалы, проектная документация и фотографии, проведены экспертные интервью с архитекторами. Используются методы натурного исследования, этнографического анализа орнаментальных мотивов и качественного исследования. Выделены следующие методы декорирования типовых панельных домов: декорирование железобетонных панелей с применением каменной и стеклянной крошки (серия 335), декорирование ограждений балконов и инновационные конструктивные элементы (серия 135), которые формируют этнический облик города. Результаты исследования позволят систематизировать историко-архитектурный опыт и использовать его для разработки новых проектов жилой застройки.

Ключевые слова: бурятская национальная архитектура, индустриальное домостроение, фасадный декор, торцевые панели, советская архитектура, декоративные элементы

ORNAMENTAL DECORATION IN THE PANEL BUILDING OF ULAN-UDE (SOVIET PERIOD)

T.S. Beketova

The article analyzes the ways of integrating Buryat national ornamental elements into the typical large-panel construction of Ulan-Ude during the 1960s-1980s. It examines archival materials, project documentation, photographs, and interviews with architects. Methods of field research, ethnographic analysis of ornamental motifs, and qualitative research are studied. The paper highlights the main methods of decorating panel houses: decorating reinforced concrete panels with stone and glass chips (Series 335), decorating balcony fences and using innovative structural elements (Series 135), which contribute to the ethnic character of the city's architecture. These findings will help systematize historical and architectural knowledge and to use it in new residential development projects.

Keywords: Buryat ethnic architecture, industrial house design, facade ornamentation, end panels, Soviet-era architecture, decorative features

Введение. Город Улан-Удэ (до 1934 г. Верхнеудинск) в 2026 году отмечает 360 лет со дня основания. Долгий путь от Верхнеудинского острога до современного административного, культурного, экономического регионального центра оставил немало замечательных архитектурных свидетельств, определяющих уникальный облик столицы Бурятии. Среди них как памятники архитектуры XVIII-XIX вв. – Оди-гитриевский собор, Гостиные ряды, жилые дома исторического центра города, так и возведенные в советское время здания по проектам Л.К. Минерта, А.Р. Вампилова,

А.И. Федорова, которых можно назвать основоположниками современной архитектуры Бурятии.

Безусловно, облик города должен отражать концептуальную идею «места», и в разное время Верхнеудинск-Улан-Удэ представлялся то уездным купеческим городом на торговом пути между Азией и Европой, то столицей национальной республики. В постсоветский период поиск городской идентичности продолжился в направлении идей «города с азиатской душой», «буддийской столицы России», «восточных ворот России» и др., о формировании и предпосылках которых изложено в статье А.С. Бреславского [1]. Во все времена в архитектуре города проявлялось взаимодействие бурятской и русской культур, а с началом формирования современной архитектуры, которое, как и во всем СССР, пришлось на 20-е годы XX в., вопрос отражения региональных национально-художественных традиций в архитектуре стал подниматься регулярно и остается актуальным по сей день. Настоящее исследование представляет собой анализ решений советских архитекторов задачи формирования облика столицы бурятской республики в массовой жилой застройке периода 1960-1980 гг.

Материалы и методы. В исследовании использованы материалы из личного архива архитектора Александра Петровича Яковлева, проектная документация архива ООО «Бурятгражданпроект», труды по архитектуре Л.К. Минерта [2, 3] и В.Г. Бельгаева [4], альбом, посвященный бурятскому народному орнаменту, составленный Ф.И. Балдаевым [5], а также фотографии автора. Используются методика анализа орнаментальных мотивов с точки зрения этнографии (на основе трудов С.В. Иванова [6]), а также методы натурного (фотографирование) и качественного исследования (экспертное интервью с архитекторами А.П. Яковлевым, Л.Р. Банзаракцаевой, В.И. Сизовым).

Анализ вопроса. При решении задачи массового индустриального строительства в 1960-1980-х гг. советские архитекторы одновременно пытались решить эстетические проблемы типовой застройки. В республике проектирование объектов гражданского строительства находилось в ведении проектного института «Бурятгражданпроект», реализующего генпланы города, разработанные Ленинградским государственным институтом проектирования городов [3]. Архитекторы Улан-Удэ смогли разнообразить типовые решения крупнопанельных серий 335 и 135 индустриального домостроения следующими способами:

- дополнением однотипных домов пристройками (улица Борсоева, автор проекта планировки застройки – архитектор В.И. Кулеш, проект комплекса магазинов, архитектор А.П. Яковлев) и зданиями хозяйственно-бытового назначения с созданием объемно-пространственной композиции в 31 и 40 кварталах Железнодорожного района (архитектор А.П. Яковлев) [2, с. 162-163], а также пристройками, дополняющими композицию из 5- и 9-этажных домов проспекта Строителей (архитекторы Ю.Н. Банзаракцаев, С.Л. Абрамов) [4, с. 65];
- изменением пластики фасадов и новаторскими выразительными архитектурными приемами крупнопанельной серии 135, архитекторы П.Г. Зильберман, А.П. Яковлев и В.П. Итыгилов [2, с. 160];
- снижением уровня монотонности застройки с помощью цвета конструктивных материалов [2, с. 164] и фактуры фасадной поверхности панелей, созданной с применением каменной крошки разного цвета [2, с. 165];
- выявлением рельефа местности путем создания контрастного силуэта жилых микрорайонов (18 квартал Октябрьского района, архитектор В.И. Кулеш) [4, с. 64];
- с помощью декорирования домов бурятскими орнаментальными мотивами (улицы Борсоева, Жердева и многие другие).

Последний способ является предметом проведенных автором исследований. В книге по истории архитектуры Улан-Удэ Людвиг Карлович Минерт [2] поднимает вопросы ее этнических особенностей. В частности, он отмечает, что главной чертой подхода архитекторов с 1955 г. к вопросу развития бурятских национальных традиций являлся поиск «в части архитектурного образа здания и средств архитектурного декора» [2, с. 178]. Минерт также указывает на ограниченные возможности архитекторов

рассматриваемого периода: «...с учетом культового характера бурятской архитектуры [...] даже в то время только декоративные элементы – и то в ограниченной мере – могли рассматриваться положительной частью национального художественного наследия» [2, с. 178].

Результаты и обсуждение. Этнокультурный подход оставил заметный след в архитектуре общественных зданий Улан-Удэ, но в основном они строились по типовым проектам [3]. Тем сложнее сегодня представляется задача отражения бурятского культурного наследия в жилом индустриальном домостроении, которая стояла перед архитекторами Бурятгражданпроекта. Некоторые решения и приемы были упомянуты выше, а некоторые не рассматриваются в научных или исторических источниках. Настоящее исследование призвано восполнить эти пробелы, а также классифицировать и закрепить в научном и информационном поле те решения и приемы, которые могут исчезнуть в процессе будущих реноваций городского пространства.

К декорированию домов бурятскими орнаментальными мотивами можно отнести несколько различных художественно-проектных решений, различающихся по технологии создания и применения, пространственному расположению, роли в композиции и конструктивном решении здания.

Использование панелей с изображением бурятских орнаментальных мотивов стало решением, которое, по оценке Л.К. Минерта, «позволяет внести в архитектуру жилых кварталов дополнительный элемент разнообразия и эмоциональной теплоты» [2, с. 166]. На рис. 1 представлены фрагменты проектной документации и фотографии из личного архива автора орнаментов архитектора А.П. Яковлева. Прием был рассчитан для торцов жилых зданий массовой панельной серии 335, благодаря ему достигнут «заметный и разнообразный эстетический эффект» [2, с. 166]. Особенно ярко он проявляется по ходу движения вдоль улицы Борсоева, одной из главных магистралей города, через которую в его центр проходит дорога из международного аэропорта «Байкал».



Рис. 1. Торцевые орнаменты на крупнопанельных жилых домах серии 335 (фрагмент проектной документации, 1977 г.) и фотографии разных лет (материалы из архива А.П. Яковлева)

В основе узоров находятся композиции из традиционных орнаментов, которые можно встретить в том числе в альбоме, составленном народным художником Бурятии Ф.И. Балдаевым [5]. Среди них – растительный завиток [5, с. 49, композиция 55] и роговидный орнамент с навершием [5, с. 35, композиция 31] и без него [5, с. 45, композиция 47], композиции дополнены кругами, ромбами и четырехлепестковыми

цветками. Опираясь на исследования орнамента методом симметрии [6, с. 37], относим все представленные орнаменты к розеткам с плоскостью симметрии $4 \cdot m$, то есть розеткам с зеркальной симметрией. Такой подход обусловлен и условием компоновки из четырех панелей.

Цветовые решения орнаментальных композиций, изготовленных трафаретным методом на домостроительном комбинате Улан-Удэ, не отличались разнообразием – это красный и зеленый. В интервью А.П. Яковлев рассказал, что для их создания были использованы красный кирпич и гранитная крошка, а также зеленая стеклянная крошка – побочный продукт Улан-Удэнского механизированного стекольного завода. На рис. 2 можно увидеть, как по прошествии почти полувека сохранились цвет и контуры орнаментов на панелях жилых домов по улице Юного Коммунара.



Рис. 2. Орнаментированные торцевые панели жилых домов по улице Юного Коммунара (фото автора)

Как видно из рис. 1 и 2, декорирование по описанному способу прошло длительную проверку временем, позволило разнообразить облик типовой жилой застройки.

Выразительным архитектурным приемом является стилизованное под национальный орнамент ограждение балконов фасада крупнопанельной серии 135, которое, по воспоминаниям современников (В.И. Сизова, А.П. Яковлева и Л.Р. Банзаракцаевой), предложил архитектор Владислав Павлович Итыгилов (1949–2022). В архиве Бурятгражданпроекта сохранилась проектная документация (рис. 3), и, как следует из интервью с директором этой организации В.И. Сизовым, вариант на рис. 3а не был запущен в массовое производство по причине недостаточной прочности конструкции, зато вариант на рис. 3б, по сегодняшним оценкам, мог бы считаться инновационным, поскольку оказался технологичным и, придав неповторимый облик жилым кварталам Улан-Удэ, стал его своеобразной «визитной карточкой» [7].

Примеры блок-секций, построенных по модифицированным типовым проектам серии 135, ранее рассмотрены в статье [7].

Сравнивая зеркально симметричные композиции (см. рис. 3) с бурятскими орнаментальными мотивами, можно предположить, что в их основе лежат узоры декоративных оконных решеток Китая, подобные представленным в источнике [8], либо стилизация угловых композиций меандра [9].

Чуть ранее ввода домов серии 135-УАС 2-2, в 1985 году закончили строительство и сдали в эксплуатацию первый девятиэтажный жилой дом серии 135с/1. Дома, построенные по этому проекту, расположены в Октябрьском районе, самом «молодом» районе Улан-Удэ.

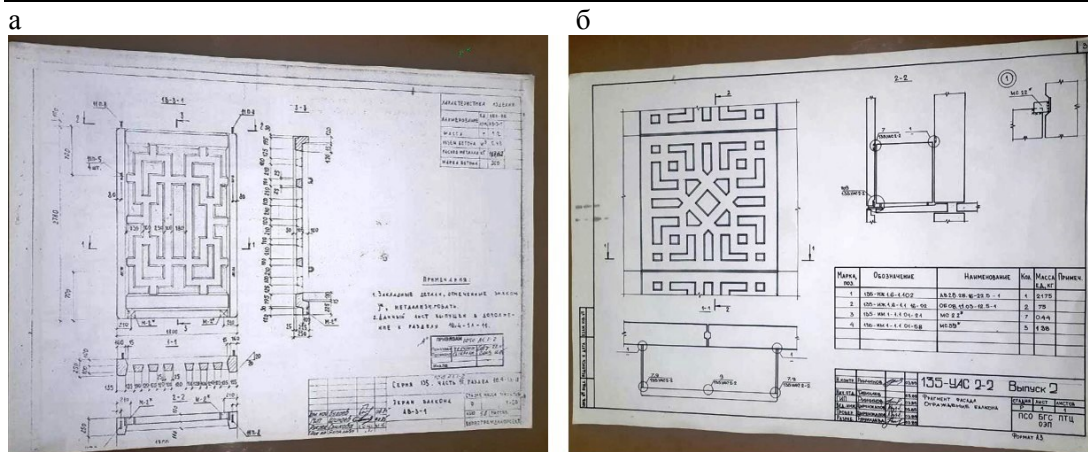


Рис. 3. Проектная документация серии 135:

а – экран балкона, 1985 г., б – фрагмент фасада (ограждения балкона), 1989 г.

В рельефном декоре балконных ограждений процитирован меандр (рис. 4, а), а верхняя линия ограждения представляет собой стилизованные архитектурные детали буддийской храмовой архитектуры. Меандр, или «алхан хээ», – молоточный узор – является ведущим мотивом среди геометрических орнаментов бурят, выражает идею вечного движения [10, с. 67]. Сохранилась проектная документация по другому виду рельефного бетонного ограждения балкона этой серии (рис. 4, б), в которой использован Т-образный меандр, зеркально отраженный по вертикали. Интересно, что художественный поиск В.П. Итыгилова и А.П. Яковлева не ограничивался прямым цитированием бурятских орнаментальных мотивов, советские архитекторы творчески подошли к задаче стилизации традиционных узоров – меандра, растительного завитка и роговидного бурятского орнамента.

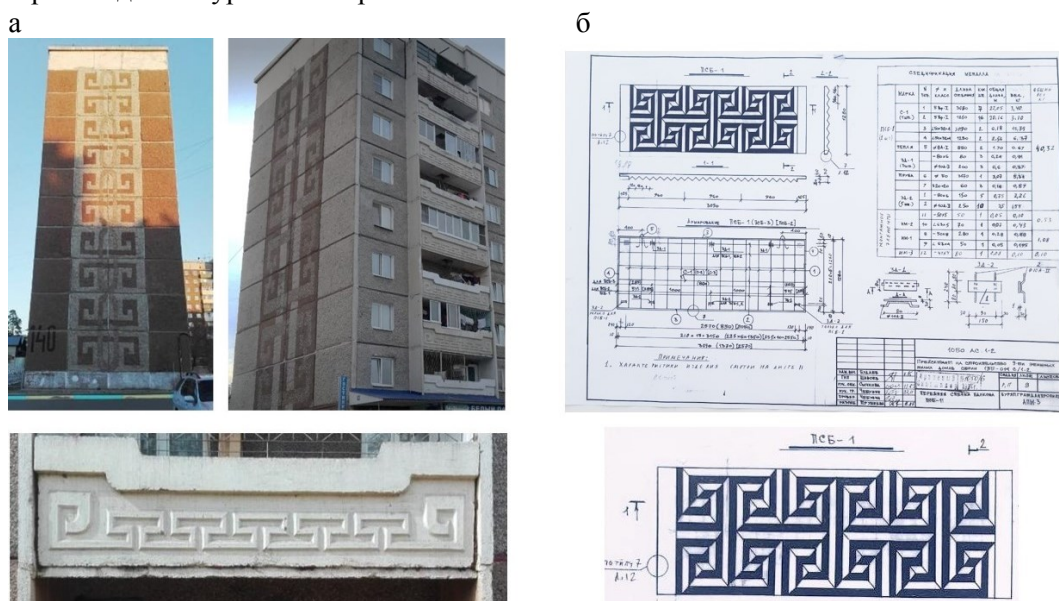


Рис. 4. Вариации молоточного орнаментального мотива в оформлении жилых домов Улан-Удэ серии 135:

а – торцевые панели и передняя стенка балкона (1990 г.);

б – проектная документация, передняя стенка балкона (1985 г.)

(автор орнаментальных композиций и ограждений архит. В.П. Итыгилов)

Архитектор Б.Г. Мочалов предложил еще один способ декорирования крупнопанельных жилых домов Улан-Удэ. В отличие от ранее рассмотренных методов его подход предусматривал оформление балконных ограждений на уже введенных в эксплуатацию зданиях с помощью решетчато-реечных конструкций. Этот способ

требует отдельного рассмотрения, поскольку существует несколько вариантов узоров, примененных Б.Г. Мочаловым. Выделение этого вопроса в отдельную статью обусловлено также историко-архитектурной ценностью решения: оно демонстрирует уникальную адаптацию национального орнамента к индустриальному домостроению 1980-х годов. Кроме того, состояние сохранившихся ограждений вызывает опасения – их фиксация и анализ, включая создание компьютерно-графических моделей узоров, необходимы для сохранения этого уникального элемента городского наследия.

Выводы. В период 1960-1980-х годов архитекторы Улан-Удэ решали задачу разнообразия типовой застройки и отражения в ней бурятской национальной традиции через декорирование орнаментальными мотивами. С учетом индустриального характера возведения зданий были разработаны инновационные на тот момент проектные решения для домостроительного комбината города. Первое – это орнаментация железобетонных панелей для торцов жилых домов серии 335. Архитектор А.П. Яковлев разработал уникальные орнаментальные композиции на основе народных мотивов, собирающиеся в розетки с симметрией 4-м. Технология декорирования панелей в пропарочной камере обеспечила долговечность декора. Цвета получены благодаря применению состава из кирпичной и гранитной крошки (коричнево-красный цвет), а также стеклянной крошки – побочного продукта стекольного завода Улан-Удэ (зеленый цвет). Автором второго и третьего способов орнаментирования является архитектор В.П. Итыгилов. Для серии 135 он разработал рельефные ограждения передней стенки балконов на основе меандра («алхан хээ» у бурят), а также конструктивные элементы – экраны балконов – предположительно на основе узоров декоративных оконных решеток Китая. По сей день приемы советских архитекторов, сформировавших своеобразный «этнический» облик типовой жилой застройки города, можно считать эстетически привлекательными, технологичными и долговечными. В свете сохранения архитектурного наследия и формирования городской идентичности необходимо документировать и изучать опыт интеграции национальных традиций в массовое жилищное строительство, адаптировать проверенные временем подходы к современному проектированию.

Список литературы

1. Бреславский, А.С. Постсоветский Улан-Удэ: содержание и смысл новой общегородской идеи / А.С. Бреславский // Вестник Бурятского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. – 2012. – № 2. – С. 52–60. – EDN: PVRVDR.
2. Минерт, Л.К. Архитектура Улан-Удэ / Л.К. Минерт. – Улан-Удэ : Бурятское книжное изд-во, 1983. – 248 с.
3. Памятники архитектуры Бурятии / Л.К. Минерт ; ред.: Е.А. Ащепков, В.С. Познанский ; авт. предисл. А. П. Окладников. – Новосибирск : Наука, 1983. – 191 с.
4. Бельгаев, В.Г. Архитектура Бурятии / В.Г. Бельгаев. – Улан-Удэ : Изд-во Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, 2010. – 86 с. – EDN: QNPCTJ.
5. Бурятский народный орнамент – Буряад арадай угалза хээ : альбом / сост. Ф.И. Балдаев. – Улан-Удэ : Принтлето, 2016. – 79 с.
6. Иванов, С.В. Орнамент народов Сибири как исторический источник (по материалам XIX–начала XX в.): народы Севера и Дальнего Востока. – Москва, Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР. [Ленингр. отделение], 1963. – 500 с.
7. Бекетова, Т.С. Декорирование этнокультурными мотивами жилых домов Г. Улан-Удэ / Т. С. Бекетова // Регионы. Города. Ракурсы и параллели : сборник научных статей VII Всеросс. науч.-практ. конф. преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов, Омск, 25–26 ноября 2020 года. – Омск : Омский государственный технический университет, 2021. – С. 29–34. – EDN: KHRRWL.

8. Скрытые смыслы традиционных китайских окон. Канал «Интересно о Китае» на Яндекс.Дзен. – URL: https://dzen.ru/a/Y9_GFJrUCGWXx8b?ysclid=mlkefb9u5617385681
9. Проект «МонОрнамент»: система онлайн-формирования орнаментальных мотивов в бурят-монгольском стиле. – URL: <http://monornament.bsu.ru>
10. Бабуева, В.Д. Мир традиций бурят / В.Д. Бабуева. – Улан-Удэ : Улзы, 2001. – 144 с.

References

1. Breslavsky, A.S. Post-Soviet Ulan-Ude: content and meaning of new idea of the city / A.S. Breslavsky // Bulletin of the Buryat Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – No. 2. – P. 52–60. – EDN: PVRVDR.
2. Minert, L.K. Architecture of Ulan-Ude / L.K. Minert. – Ulan-Ude : Buryat Book Publishing House, 1983. – 248 p.
3. Architectural monuments of Buryatia / L.K. Minert ; editors: E.A. Ashchepkov, V.S. Pozansky ; author's preface by A. P. Okladnikov. – Novosibirsk : Nauka Publ., 1983. – 191 p.
4. Bel'gaev, V.G. The Architecture of Buryatia / V.G. Bel'gaev. – Ulan-Ude : Publishing House of the East Siberian State University of Technology and Management, 2010. – 86 p. – EDN: QNPCTJ.
5. Buryat folk ornament – Бурят арадай угалза хээ: album / F.I. Baldaev. – Ulan-Ude : Printleto, 2016. – 79 p.
6. Ivanov, S.V. The ornament of the peoples of Siberia as a historical source: based on materials from the 19th and early 20th centuries: the peoples of the North and Far East. – Moscow; Leningrad : Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR [Leningr. department], 1963. – Vol. 81. – 500 p.
7. Beketova, T.S. Decoration of residential buildings in Ulan-Ude with ethnocultural motifs / T.S. Beketova // Regions. Cities. Angles and parallels : Collection of scientific articles of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference of teachers, graduate students, undergraduates and students, Omsk, November 25-26, 2020. – Omsk : Omsk State Technical University, 2021. – P. 29–34. – EDN: KHRRWL.
8. The hidden meanings of traditional Chinese windows. Interesting about China channel on Yandex.Dzen. – URL: https://dzen.ru/a/Y9_GFJrUCGWXx8b?ysclid=mlkefb9u5617385681 (дата обращения: 18.01.2026).
9. The MonOrnament project: an online system for the formation of ornamental motifs in the Buryat-Mongolian style. – URL: <http://monornament.bsu.ru>
10. Babueva, V.D. The world of Buryat traditions / V.D. Babueva. – Ulan-Ude : Ulzy, 2001. – 144 p.

УДК 72.025.4:699.86

DOI 10.54734/20722958_2026_3_184

Петрозаводский государственный университет

Россия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33,
тел.: (814-2) 71-10-01;
факс: (814-2) 71-10-00

Девятникова Людмила Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства»

E-mail: dev@petsu.ru

ООО «Лэндмарк»

Россия, г. Петрозаводск, ул. Мурманская,
д. 26, офис 122

Агеева Полина Михайловна,
проектировщик

E-mail: project@landmark.ru

Petrozavodsk State University

Russia, Petrozavodsk, 33, Lenin Ave.,
tel.: (814-2) 71-10-01; fax: (814-2) 71-10-00

Devyatnikova Lyudmila Anatolyevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Construction Technology
and Organization»

E-mail: dev@petsu.ru

Landmark LLC

Russia, Petrozavodsk, 26, Office 122,
Murmanskaya St.

Ageeva Polina Mikhailovna,
Designer

E-mail: project@landmark.ru

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МАСТЕРСКИХ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА

Л.А. Девятникова, П.М. Агеева

На основе анализа современных подходов к функциональной трансформации социально значимых объектов городской застройки предлагается модернизация мастерских в г. Петрозаводске с переоборудованием здания под центр отдыха и ремесленный центр. Проанализировано состояние объекта, определены проблемы и предложены меры по улучшению энергоэффективности и внешнего вида здания. Сохранение здания и его адаптация под новые социальные функции будет способствовать развитию культурного досуга и поддержке предприятий малого бизнеса в регионе, а также экономическому развитию Петрозаводска в целом.

Ключевые слова: модернизация, мастерские, редевелопмент, ограждающие конструкции, теплопотери, теплотехнический расчет, энергоэффективность

FUNCTIONAL MODERNIZATION OF PRODUCTION WORKSHOPS IN THE CITY OF PETROZAVODSK

L.A. Devyatnikova, P.M. Ageeva

Based on an analysis of modern approaches to the functional transformation of socially significant urban development sites, the article proposes modernizing workshops in Petrozavodsk and converting the building into recreation and craft center. The article presents an analysis of the building condition, identifies problems, and proposes measures to improve the building energy efficiency and appearance. Conversion of the building into recreation and craft centers would promote the development of cultural leisure and support small businesses in the region. The article conclusions emphasize the importance of preserving the building and adapting it to new social functions, which will contribute to the economic development of Petrozavodsk.

Keywords: modernization, workshops, redevelopment, building envelopes, heat loss, thermal calculations, energy efficiency

Функциональная модернизация представляет собой процесс, направленный на изменение объекта или его компонентов с целью повышения эффективности использования. Значение термина «функциональная модернизация» пересекается с толкованием термина «редевелопмент», который обозначает перепрофилирование и (или) трансформацию индустриальных зон, заброшенных предприятий и промышленных объектов, складских, коммерческих и иных существующих зданий и сооружений, утративших актуальность и функциональность [1-3]. В крупных городах такая работа

по перепрофилированию промзон уже ведется, и направлена она на создание комфортной современной городской инфраструктуры [4-9]. В масштабах города решение о редевелопменте нужно принимать на основе градостроительного анализа, чтобы учесть особенности местности, соседство охраняемых или опасных объектов, проложенные подземные коммуникации [10, 11]. Учет ретроспективы в современных подходах к реставрационно-реконструкционной трансформации объектов культурного наследия городской среды повышает привлекательность и конкурентоспособность модернизируемых объектов [12].

В качестве причин модернизации здания можно выделить основные:

- моральный износ объекта, так как со временем здания теряют свою функциональность, внешний вид, и требуется обновление и соответствие потребностям городской среды и современного общества;
- повышение безопасности и надежности – совершенствование конструкций и систем безопасности для соответствия современным стандартам и нормам;
- экономическое развитие – новые инвестиции, рабочие места и увеличение налоговых поступлений в городской бюджет;
- экологические требования – применение энергоэффективных технологий и материалов для уменьшения воздействия на окружающую среду.

Рассматривается функциональная модернизация двухэтажного производственного корпуса с пристройкой, расположенного по адресу: г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, д. 58. Интерес к этому объекту вызван тем, что он находится в оживленном центре города, а в ближайшее время учебные мастерские переезжают в другое место; таким образом, часть здания освобождается, ее предлагается использовать для создания ремесленного центра. У здания существует ряд проблем, связанных в том числе с недостаточной теплозащитой и состоянием здания. Согласно техническому паспорту, основная часть здания построена в 1962 году, а учебный корпус был пристроен в 1992 году. В указанные годы руководствовались ныне устаревшими пониженными требованиями к теплозащите зданий. В настоящее время нормы ужесточились, появились новые строительные материалы, а также усовершенствовались технологические процессы. Поэтому, чтобы здание соответствовало новым функциональным требованиям и строительным нормам, было принято решение об его утеплении, перепланировке, замене окон и дверей, а также об организации доступной среды для маломобильных граждан.

Цель данной работы – анализ потенциала редевелопмента с учетом региональных особенностей и обоснование технической возможности функциональной модернизации социально значимого объекта городской застройки на примере мастерских в городе Петрозаводске.

Здание является сложным кирпичным строением с перекрытием из сборного железобетона, с деревянными оконными и дверными блоками, имеется подключение к городским инженерным сетям.

На сегодняшний день объект имеет весьма непривлекательный внешний вид (рис. 1, 2). Кирпичные стены серого цвета с биологическими повреждениями кладки, которые легко устранимы чисткой под высоким давлением. Большие окна, местами закрытые деревянными щитами, имеют трещины и сколы по причине длительной эксплуатации. Широкие технические металлические двери поржавели от внешних воздействий.



Рис. 1. Северный фасад здания (фото Агеевой П.М.)



Рис. 2. Западный фасад здания (фото Агеевой П.М.)

Здание состоит из двух частей различного назначения: промышленной (производство мебели) и учебной (учебные мастерские), процент износа 40 и 15 соответственно.

Конструктивные решения промышленной части:

Фундамент: ленточный бутовый (530×530×1000 мм).

Стены: кирпичные (510 мм).

Перегородки: кирпичные (380 мм).

Чердачное перекрытие: сборные железобетонные плиты (125 мм), пароизоляция, утеплитель (100 мм), цементно-песчаная стяжка (20 мм), металлическая кровля (железо).

Межэтажное, подвальное перекрытие: железобетонные пустотные плиты (220 мм).

Конструктивные решения учебного корпуса:

Фундамент: сборные железобетонные блоки.

Стены: кирпичные (510 мм), оштукатурены, покрашены.

Перегородки: кирпичные (380 мм).

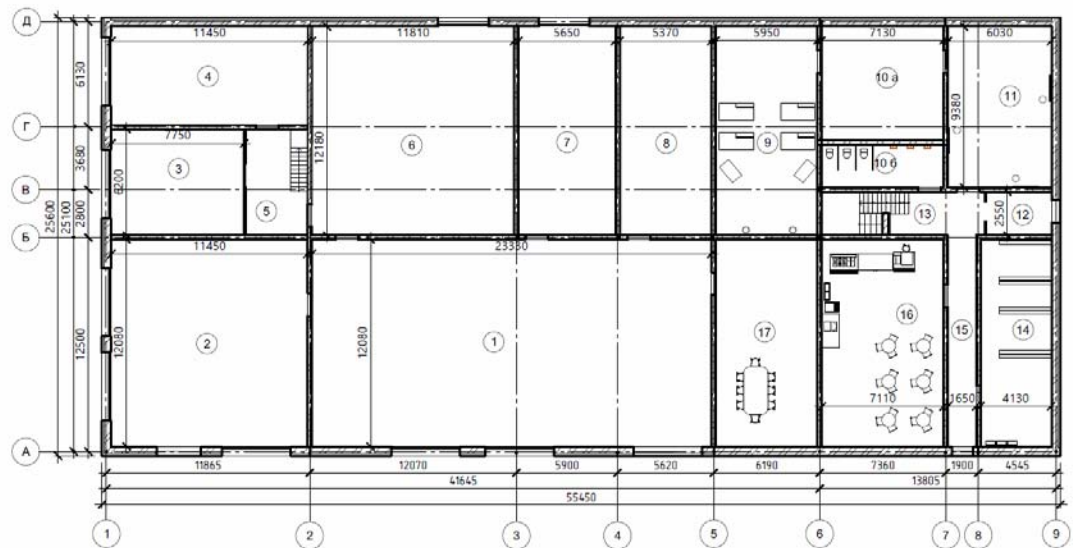
Чердачное перекрытие: сборные железобетонные плиты (220 мм), пароизоляционная мембрана, утеплитель (100 мм), цементно-песчаный раствор, рубероид.

Межэтажное, подвальное перекрытие: сборные железобетонные плиты (220 мм), утеплитель (60 мм), доски пола (20 мм), линолеум.

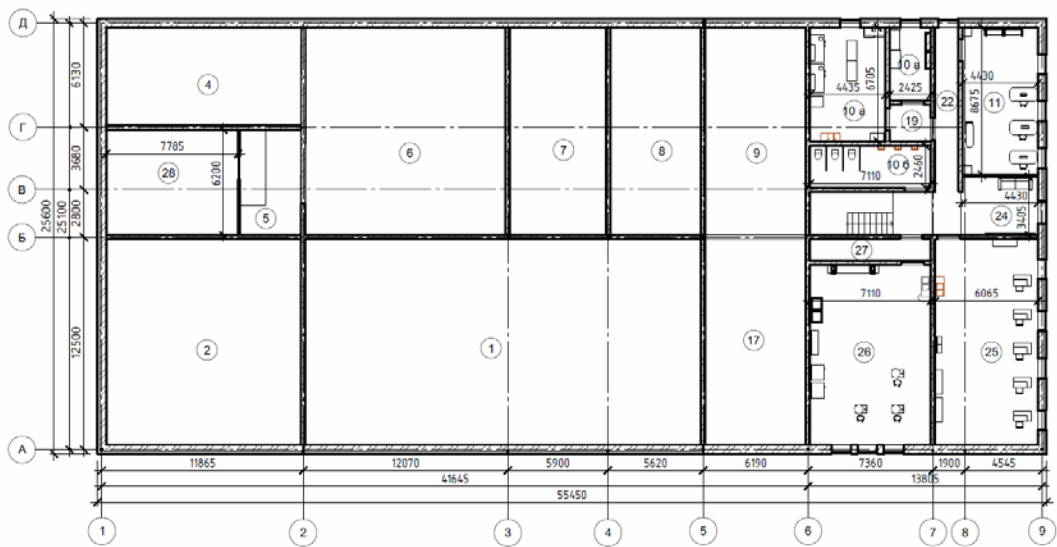
Для разработки плана модернизации здания авторами были произведены осмотр и замеры помещений, а также изучена сохранившаяся техническая документация, на основании чего разработаны чертежи (рис. 3).

Промышленная часть здания (помещения №1–8, №28, рис. 3(1)) сдается частному предприятию по обработке древесины, а помещения №9–27 были оборудованы под учебные мастерские университета.

На момент постройки здания (1962 год) ограждающие конструкции соответствовали действующим нормам по теплозащите СНиП II-V.3, значения сопротивления теплопередаче всех конструкций указаны в таблице (графы 2 и 3). Однако эти значения ниже требуемых по современным нормам СП 50.13330 (графа 4 таблицы). Поэтому было принято решение рассмотреть несколько вариантов утепления и выбрать оптимальный в соответствии с современными требованиями по теплозащите.



(1)



(2)

Рис. 3. Планировка здания после модернизации: план первого этажа (1); план второго этажа (2)

Сравнение значений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

Конструкция	Требуемые значения на момент строительства, согл. СНиП II-V.3	Значения существующих ограждающих конструкций	Современные требуемые значения, согл. СП 50.13330	Значения утепленных ограждающих конструкций
Наружная стена	0,63	0,73	2,89	3,48
Конструкция пола 1-го этажа	0,47	4,9	4,9	4,9
Конструкция покрытия	0,56	2,57	3,86	5,08
Светопрозрачная конструкция	0,3	0,39	0,7	0,89

Суммарные теплотери существующего здания составляют 82275 Вт.

Суммарные теплотери утепленного здания составляют 47673 Вт.

Для утепления существующих наружных стен была выбрана система навесного вентилируемого фасада:

Кладка пустотелого силикатного кирпича 1000 кг/м² на ЦПП – 510 мм.

Каменная вата 75-120 кг/м² – 100 мм.

Влаго-ветрозащитная мембрана – 0,1 мм.

Вентилируемая воздушная прослойка – 40 мм.

Плиты фасадного керамогранита – 10 мм.

Сопротивление теплопередаче утепленной стены составило 3,48 м²·°C/Вт.

Для утепления покрытия выбрана конструкция с использованием наплавляемой кровли:

Железобетон – 125 мм.

Пароограничивающая мембрана – 0,1 мм.

Экструдированный пенополистирол (ЭППС) 30 кг/м³ – 150 мм.

Уклонообразующий слой из гравия керамзитового 400 кг/м³ – 60 мм.

Цементно-песчаный раствор армированный – 50 мм.

Битумный праймер – 10 мм.

Битумы нефтяные строительные и кровельные 1400 кг/м³ (техноэласт) – 5 мм.

Сопротивление теплопередаче конструкции покрытия составило 5,08 м²·°C/Вт.

В существующем здании устроены полы по грунту (рассчитаны в соответствии с правилами разбивки поверхности пола на зоны), которые были дополнены конструкцией полимерных полов для промышленных зданий.

Лак – 2 мм.

Полимерное покрытие – 5 мм.

Грунтовый состав – 2 мм.

Самонивелирующая стяжка – 5 мм.

Бетонная подготовка – 50 мм.

Арматурная сетка – 6 мм.

Железобетонная плита – 220 мм.

Сопротивление теплопередаче конструкции усиленного полимерного пола по грунту составило 4,9 м²·°C/Вт.

Согласно представленным в таблице данным, сопротивление теплопередаче при утеплении наружной стены возрастает более чем в 4,5 раза, а при утеплении конструкции покрытия – почти в 2,5 раза. Тем самым теплотери здания при утеплении, рассчитанные согласно методике СП 60.13330, сокращаются почти в 2 раза.

Для дальнейшего использования здания с изменением его назначения необходимо провести работы по созданию комфортного микроклимата в здании: устройство утепленного навесного вентилируемого фасада, замену кровельного покрытия, полную замену светопрозрачных конструкций, а также частичную перепланировку, внутреннюю отделку и переоборудование помещений. Планировка и оборудование промышленной части здания (помещения №1–8 и №28) остаются без изменений, а учебная часть здания переоборудуется под условия центра для отдыха и образовательно-игрового досуга. Так, в помещениях первого этажа №9–17 (см. рис. 3 (1)) предполагается устроить входную группу с гардеробом и кафе, медиапространство для просмотра фильмов и организации фотозон. Помещения второго этажа №18–27 (см. рис. 3 (2)) оборудуются под различные ремесленные мастерские, связанные с историей и развитием народных карельских промыслов. На рис. 4 показаны виды 3D-модели, которая создана для лучшей визуализации модернизированного здания.

Здание располагается в непосредственной близости к центру города, что дает преимущество для всех групп населения. Кафе, парки, а также достопримечательности находятся в шаговой доступности. Свободные площади в модернизированном здании бывших мастерских будут сдаваться в аренду.

Таким образом, при использовании редевелопмента города получают возможность стать более современными, экологичными и комфортными для жизни и работы, что способствует их устойчивому развитию.



Рис. 4. Модель модернизированного здания

Выводы.

1. Предложен вариант эффективного использования морально устаревшего, однако сохранившего несущую способность здания производственных мастерских для организации центров отдыха и ремесла в целях развития культурного досуга и поддержки предприятий малого бизнеса в регионе.

2. С учетом современных строительных норм обоснованы новые планировочные решения здания с частичной заменой и утеплением ограждающих конструкций. Замена окон, дверей, утепление существующих ограждающих конструкций с оформлением фасадов делает объект современным и комфортным, позволит снизить теплопотери здания почти на 50 %.

3. Практическая значимость работы заключается в том, что подобраны конкретные планировочные решения здания при смене его функционала, расчет конструкций выполнен с учетом климатических особенностей района строительства.

4. Предложенные архитектурно-планировочные и конструктивные решения могут быть использованы в других регионах, что позволит сократить сроки и уменьшить затраты на реставрационно-реконструкционную трансформацию объектов городской застройки.

Список литературы

1. Троицкая, Л.И. Реконцепция объекта недвижимости как инструмент эффективной адаптации к рынку / Л.И. Троицкая, Д.Н. Рыков // Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития. – Томск : Томский гос. архитектурно-строит. ун-т, 2021. – С. 397–407.
2. Лapidус, А.А. Редевелопмент промышленных территорий / А.А. Лapidус, Д.В. Топчий, В.Е. Ефремова, Е.А. Кузин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – № 4 (17). – С. 56–61.
3. Снитко, А.В. Реновация промышленных объектов и архитектурно-историческая среда: вопросы корреляции / А.В. Снитко // Архитектура, градостроительство, дизайн. – 2022. – № 1(31). – С. 19–28.

4. Андрианова, Е.И. Анализ опыта реализации проектов городского редевелопмента в России / Е.И. Андрианова, Т.А. Губачева, А.В. Сапроненко, Е.А. Халимон // E-Management. – 2021. – № 3(4). – С. 20–33.
5. Реновация городской среды: исторические прецеденты / отв. ред.-сост. И.А. Бондаренко. – Москва–Санкт-Петербург: archi.ru / Коло, 2021. – 333 с.
6. Хафизов, П.С. Особенности редевелопмента промышленных и коммунальных зон города Альметьевск / П.С. Хафизов, Ю.А. Закирова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 2(68). – С. 180–192.
7. Романова, А.И. Зарубежный и российский опыт ревитализации промышленных объектов / А.И. Романова, Э.И. Шагиахметова, Д.Р. Хусаинова // Экономика строительства и жилищно-коммунального хозяйства. – 2023. – № 1(2). – С. 15–24.
8. Uranga, E.J. Energy efficiency intervention and preservation in residential built heritage: analysis, proposal and results in the Gros district of San Sebastian / E.J. Uranga, L. Etchepare, I. Lizundia, M. Sagarna // Preliminary Conference Report: Energy Efficiency in Historic Buildings. – 2018. – Visby. – P. 472–481.
9. Жуков, А.А. Архитектурная модернизация главного корпуса университета в городе Новочеркасске / А.А. Жуков, Н.А. Моргун, А.А. Тумасов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 4 (26). – С. 138–148.
10. Khalimon, E.A. Smart cities today and tomorrow – World experience / E.A. Khalimon, E.A. Vikhodontseva, V. Obradovic // «Smart Technologies» for Society, State and Economy. ISC 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. V 155 / ed. by E.G. Popkova, B.S. Sergi. – Cham : Springer, 2021. – P. 1340–1347.
11. Бенаи, Х.А. Архитектура научно-образовательных комплексов в условиях реконструкции / Х.А. Бенаи, Т.В. Радионов, Л.С. Сабитов, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 175–183.
12. Гарькин, И.Н. Реставрационно-реконструкционная трансформация объектов культурного наследия городской среды: современные подходы и классификация / И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 3(64). – С. 224–230.

References

1. Troitskaya, L.I. Reconceptualization of a real estate object as a tool for effective adaptation to the market / L.I. Troitskaya, D.N. Rykov // Problems of economics and construction management in the context of environmentally oriented development. – Tomsk : Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2021. – P. 397–407.
2. Lapidus, A.A. Redevelopment of industrial territories / A.A. Lapidus, D.V. Topchiy, V.E. Efremova, E.A. Kuzin // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. – 2019. – No. 4 (17). – P. 56–61.
3. Snitko, A.V. Renovation of industrial facilities and the architectural and historical environment: correlation issues / A.V. Snitko // Architecture, urban planning, design. – 2022. – No. 1(31). – P. 19–28.
4. Andrianova, E.I. Analysis of the Experience of Implementing Urban Redevelopment Projects in Russia / E.I. Andrianova, T.A. Gubacheva, A.V. Sapronenko, E.A. Khalimon // E-Management. – 2021. – No. 3(4). – P. 20–33.
5. Renovation of the Urban Environment: Historical Precedents / ed. and Comp. I.A. Bondarenko. – Moscow–St. Petersburg : archi.ru / Kolo, 2021. – 333 p.
6. Khafizov, P.S. Features of redevelopment of industrial and municipal zones of the city of Almet'yevsk / P.S. Khafizov, Yu.A. Zakirova // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2024. – No. 2 (68). – P. 180–192.
7. Romanova, A.I. Foreign and Russian experience in the revitalization of industrial facilities / A.I. Romanova, E.I. Shagiakhmetova, D.R. Khusainova // Economics of construction and housing and communal services. – 2023. – No. 1 (2). – P. 15–24.

8. Uranga, E.J. Energy efficiency intervention and preservation in residential built heritage: analysis, proposal and results in the Gros district of San Sebastian / E.J. Uranga, L. Etxepare, I. Lizundia, M. Sagarna // Preliminary Conference Report: Energy Efficiency in Historic Buildings. – 2018. – Visby. – P. 472–481.
9. Zhukov, A.A. Architectural modernization of the main building of the university in Novocherkassk / A.A. Zhukov, N.A. Morgun, A.A. Tumasov // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2024. – No. 4 (26). – P. 138–148.
10. Khalimon, E.A. Smart cities today and tomorrow – World experience / E.A. Khalimon, E.A. Vikhodontseva, V. Obradovic // «Smart Technologies» for Society, State and Economy. ISC 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. V 155 / ed. by E.G. Popkova, B.S. Sergi. – Cham : Springer, 2021. – P. 1340–1347.
11. Benai, H.A. Architecture of scientific and educational complexes in the context of reconstruction / H.A. Benai, T.V. Radionov, L.S. Sabitov, O.L. Viktorova // Regional architecture and construction. – 2024. – No. 3 (60). – P. 175–183.
12. Garkin, I.N. Restoration and reconstruction transformation of cultural heritage sites of the urban environment: modern approaches and classification / I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 3 (64). – P. 224–230.

*Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы*

Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Алам Эль Дин Сабрина Хассан,
ассистент кафедры «Архитектура
и реставрация»

E-mail: alam_el_din_skh@pfur.ru

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,

ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Викторова Ольга Леонидовна,

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»

*Автономная некоммерческая организация
«Развитие городских технологий»*

Россия, 105082, г. Москва,

Переведеновский пер., д. 13 стр. 16,
помещ. 76/5

Бабаков Сергей Александрович,

руководитель АНО «Развитие городских
технологий»

*Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba*

Russia, Moscow, 6, Miklukho-Maklaya St.

Alam El Din Sabrina Hassan,
Assistant Professor of the Department
«Architecture and Restoration»

E-mail: alam_el_din_skh@pfur.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,

tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Viktorova Olga Leonidovna,

Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department «Urban
Construction and Architecture»

*Autonomous Non-Commercial Organization
«Development of Urban Technologies»*

Russia, 105082, Moscow, Building 13,

Bldg. 16, Office 76/5, Perevedenovsky Lane,

Babakov Sergey Aleksandrovich,

Head of the ANO «Development of Urban
Technologies»

ТИПОЛОГИЯ И АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Алам Эль Дин Сабрина Хассан, О.Л.Викторова, С.А.Бабаков

Представлены фундаментальные аспекты формирования и функционирования научных объектов в условиях современной экономической среды. Особое внимание уделено анализу различных архитектурных типологий, способствующих формированию эффективных экосистем, ориентированных на концентрацию инновационного потенциала и оптимизацию взаимодействия между основными участниками инновационного процесса. Детально исследовано влияние инфраструктурных компонентов и градостроительных решений на динамику развития инновационных процессов. Проведена идентификация передовых практик проектирования инновационных пространств на основе анализа функционирующих кластерных структур. Дана оценка роли архитектурных концепций в интенсификации кооперации между научно-образовательными организациями, предпринимательским сообществом и государственными институтами. Отмечена важность применения системного и интегративного подхода к проектированию архитектуры инновационных кластеров с обязательным учетом социальных, экономических и экологических факторов, что, в свою очередь, способствует формированию устойчивых и высокоэффективных инновационных систем.

Ключевые слова: архитектура, типология, архитектурная концепция, объемно-пространственная структура, градостроительные решения, технопарк, бизнес-инкубатор, агропромышленный парк

TYPOLOGY AND ARCHITECTURAL-SPATIAL ORGANIZATION OF SCIENTIFIC FACILITIES

Alam El Din Sabrina Hassan, O.L. Viktorova, S.A. Babakov

This article analyzes the fundamental aspects of the formation and functioning of scientific facilities in the modern economic environment. Particular attention is paid to the analysis of various architectural typologies that facilitate the formation of effective ecosystems focused on concentrating

innovative potential and optimizing interactions between key participants in the innovation process. The influence of infrastructure components and urban planning solutions on the dynamics of innovation processes is examined in detail. Best practices in the design of innovative spaces are identified based on an analysis of existing cluster structures. Significant importance is attached to assessing the role of architectural concepts in intensifying cooperation between scientific and educational organizations, the business community, and government institutions. The importance of applying a systemic and integrative approach to the design of innovative cluster architecture, taking into account social, economic, and environmental factors, is emphasized. This, in turn, contributes to the development of sustainable and highly effective innovation systems.

Keywords: architecture, typology, architectural concept, spatial structure, urban planning solutions, technology park, business incubator, agro-industrial park

Введение. В последние годы возрастает роль наукоемких предприятий в развитии научных исследований на глобальном уровне. В связи с этим существенно увеличилось количество различных научных объектов, среди которых выделяются технопарки, инновационные кластеры, научные парки, наукограды и научно-исследовательские институты. Несмотря на значительный интерес к данным структурам со стороны государства и бизнеса, вопросы их типологии и архитектурно-пространственной организации в отечественной и зарубежной научной литературе освещены недостаточно полно, и специального, комплексного исследования в данной области не проводилось.

Авторами были систематизированы знания о многообразии научных объектов, их структуре и архитектурном развитии посредством нормативной идентификации и сравнительного анализа, в результате решены следующие задачи:

- идентификация основных типов научных объектов;
- сравнительный анализ для выявления общих и специфических черт;
- особенности трансформации научных знаний в конечные товары и услуги в условиях постиндустриального развития.

Кроме того, в задачи входило изучение архитектурно-пространственной организации научных центров для поиска эффективных моделей их развития. Особое внимание в рамках исследования уделялось инновационным кластерам как перспективному направлению развития научных территорий.

Основной раздел. В научной литературе, посвящённой вопросам создания объектов, ориентированных на развитие научной деятельности, наиболее часто встречается один и тот же термин, используемый для описания объемно-пространственной структуры зданий. Однако во многих исследованиях отмечаются различия в трактовке данного термина, либо же, напротив, наблюдается тенденция присваивать различным по функциональному наполнению зданиям одинаковые определения. В связи с этим возникает необходимость систематического анализа и уточнения соответствующих понятий с детальным рассмотрением их признаков и характеристик, что позволит выявить основные дефиниции, применимые к объектам научного назначения. Наиболее распространёнными в данной области являются такие термины, как «наукоград», «технопарк», «научный парк», «технополис», «инновационный кластер», «научно-исследовательский центр» (рис. 1).

Стандартного определения «наукограда» (не термин **наукоград**) не встречается. Ряд авторов разделяет понятие на несколько категорий: *в градостроительном аспекте, в функционально-технологическом, в отношении научно-профессиональных ресурсов*. С точки зрения *градостроительства* автор [1] дает определение: «наукограды – не просто комплексы, а целые города с высоким уровнем научно-промышленного потенциала, и при этом их отличают элитарность и высокое градостроительное качество, основанное на передовых экологических принципах». С точки зрения *функционала* наукоград – наиболее «развитая научно-производственная структура из всех существующих в России». В отношении *профессионально-исследовательского персонала* автор отмечает следующее: «наукограды обладают наивысшим уровнем кадровых и интеллектуальных ресурсов». Существует мнение, что «наукограды – это города (или части городов) с особо высокой концентрацией интеллектуального и научно-технического потенциала: научных, образовательных, производственных орга-

низаций и предприятий, ученых и специалистов» [2]. В целом данное определение имеет схожее значение, это такая градостроительная единица, которая наделена функциями: социальной, научно-образовательной, жилой, рекреационной, т.е. это город, приспособленный для комфортной жизни людей и развития научного потенциала.

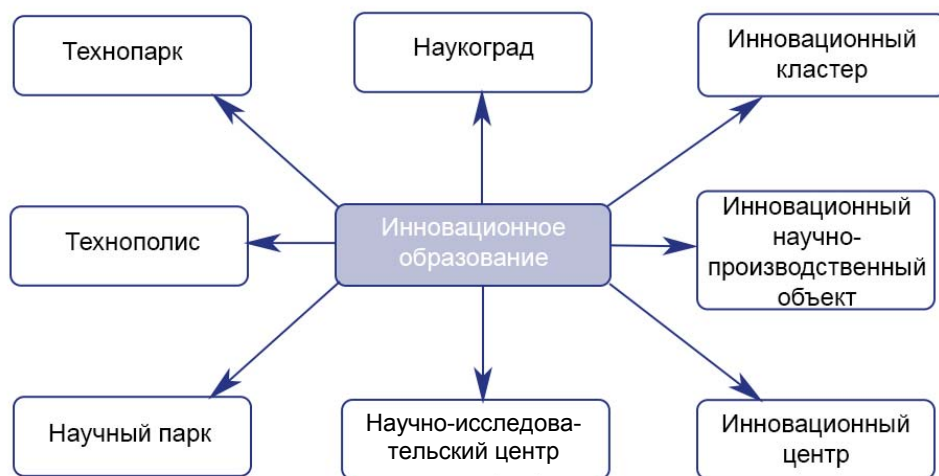


Рис. 1. Типологическая схема объектов инновационного назначения

Наиболее часто в современной практике встречается термин «**технопарк**». Авторы, применяющие данный термин, характеризуют его по-разному. Данный термин ввёл в употребление американский социолог и архитектор Ричард Трюэтт в 1959 году. Однако идея технопарков начала формироваться раньше, когда стали появляться первые научные парки. Одним из них считается научный парк Стэнфордского университета (США), который начал развиваться в 1950-х годах. Можно выделить несколько основных понятий. Во-первых, «**технопарк** – это организация, управляемая специалистами, главной целью которых является увеличение благосостояния местного сообщества посредством продвижения инновационной культуры, состязательности инновационного бизнеса и научных организаций». В своих работах К.И. Сергеев, Г.И. Кулешова давали схожее понятие, отмечая, что «технопарк в материальном выражении – это прежде всего площадка, оборудованная всем необходимым для становления малых предприятий, осваивающих инновационные технологии». Схожее определение дается в Комплексной программе «Создание в Российской Федерации технопарков в сфере высоких технологий». В ней технопарк характеризуют как «*форму* территориальной интеграции коммерческих и некоммерческих организаций науки и образования, финансовых институтов, предприятий и предпринимателей, взаимодействующих между собой, с органами государственной власти, органами местного самоуправления, осуществляющих формирование современной технологической и организационной среды с целью инновационного предпринимательства и реализации венчурных проектов». Во-вторых, *технопарк* характеризуют как «научно-производственный территориальный комплекс, главная задача которого состоит в формировании максимально благоприятной среды для развития малых и средних наукоемких инновационных предприятий» [4]. Это также подчеркивается в статье [5]. В-третьих, Антонов А.В. в своей работе дает *технопаркам* такое определение: «инновационный центр для реализации наукоемких технологий на основе интеграции, научной, производственной и предпринимательской деятельности». Следовательно, технопарк – составляющая часть инновационного центра (наполнен общим функционалом). В работах приводится синоним термину «технопарк» – «научно-производственная, специализированная зона» [2]. Технопарки являются самостоятельными объектами или же частью научной зоны. Существует определение понятия *технопарка*: «новый тип многофункционального общественно-производственного ком-

плекса, проходящий в своем развитии стадии от одного здания до структуры регионального масштаба, в которой наряду с основополагающими научными, производственными и коммерческими функциями сосредоточены развитые общественные функции и функции социального и коммунального обслуживания» [7]. В ряде работ выделяют технопарки как «*исследовательские* (проводят исследовательские, научно-технические работы, создают опытные образцы; их основная задача создавать технологии для производства инновационных продуктов, коммерциализируя их в будущем); *промышленные* (арендуют производственные площади, оборудование и т.д.). Однако оба вида технопарка представляют угрозу для экологии, поскольку они часто оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду, осуществляя научную деятельность и проводя различные исследования» [7]. Исследователями рассматриваются различные образования технопарков, от одного здания до градостроительной единицы, полностью посвященной развитию научно-технического потенциала ученых. Каждое определение характеризует данный термин по-своему, каждое его раскрывает более подробно. Обобщая перечисленное, можно сделать вывод: технопарк – объект, представляющий собой одно обособленное здание или комплекс зданий и сооружений, объединенных общей концепцией и предназначенных для размещения инновационных компаний, стартапов и других организаций, занимающихся разработкой и внедрением новых технологий.

В современном мире «научоград» называют **технополисом**. По сути, понятие появилось в результате развития наукоградов и науки во всем мире. Понятие использовали Е.Д. Симоненко, Е.М. Калугина, Е.В. Косинова и др. Оно характеризует «малые или средние города, главной специализацией которых является научно-исследовательская сфера» [7]. Зарубежные исследователи также употребляют данный термин. В своей работе Александра Ступар подчеркивает, «технополис (или «техногород»), воспринимаемый как одно из возможных отражений современного общества, объединяет в себе новейшие технологии, различные современные и антисовременные составляющие и многочисленные «утопические» черты, которые должны облегчить нашу жизнь и подчеркнуть прогресс» [8]. Наш мир, состоящий из наложенных друг на друга цифровых и физических сфер, гибких пространств и трансформируемых сетей, балансирует между утопией и антиутопией, прогрессом и регрессом, географией и не географией. *Технополис* – нечто более крупное, чем технопарк, в состав которого входят технопарки. Шишов М.В. рассматривает технополис как особую модель инновационного развития, которая предполагает трансформацию промышленных городов через формирование специализированной инфраструктуры. В российском контексте аналогом технополиса выступают наукограды – территориальные образования, ориентированные на генерацию и внедрение научных разработок. Ключевыми элементами такой структуры являются: высококвалифицированные кадры; инновационные технологии; система информационного обмена; инвестиции в перспективные и малоизученные сферы; развитые коммуникационные сети.

Ядро технополиса представляет собой интегрированную структуру научно-промышленного потенциала, включающую университеты, исследовательские институты, жилую инфраструктуру, а также культурные и рекреационные объекты. Технополис (или «техноград») синтезирует новейшие технологические достижения, сочетая модернистские, антимодернистские элементы и различные утопические черты, призванные облегчить повседневную жизнь и акцентировать ориентацию общества на будущее развитие. Исследовательская литература рассматривает промышленные города в качестве исторических предшественников технополисов.

Многие ученые выделяют термин **научный парк**. Стоит заметить, что зарубежные ученые в своих работах применяют термин «*science park*». Основная задача научных парков заключается в создании комфортных условий для научных исследований и разработок в различных областях науки. В структуру научных парков могут входить университеты, лаборатории, различные промышленные предприятия и заводы, специализирующиеся на наукоемких отраслях [9]. Концепция научного парка состоит из аспектов, которые связаны с такими предпосылками, как географическое положение,

входящие в комплекс здания, объекты и направленность научного парка. Из данного определения появились и другие, которые более подробно характеризуют функционал научного образования. Наиболее значимые понятия: научно-исследовательский парк, научно-промышленный парк. Разница понятий в том, что научно-исследовательский парк схож с научным парком, но имеет некие ограничения, в его пространстве научно-технические изобретения разрабатываются только до стадии технического прототипа. Как правило исследователи рассматривают научно-промышленные парки в качестве инструментов, которые имеют узкую специализацию в какой-то одной области. Примерами данного типа могут служить Хай-тек парк Цаохэцзин в Шанхае, научный парк Линц в Австрии, научный парк Йоханнеберг в Швеции и др.

За годы изучения данного вопроса был выделен термин **«научно-исследовательский центр»** (обозначает организацию, созданную при университете или научно-исследовательском институте, чья работа сосредоточена на внедрении научных достижений в практику). Такая структура способствует взаимодействию между наукой и бизнесом, оказывает консультационную поддержку высокотехнологичным компаниям в области правового, информационного и иного сопровождения. Научно-исследовательский центр (НИЦ) – учреждение, где проводятся научные исследования и разрабатываются новые технологии. В нём работают учёные, инженеры и эксперты из разных областей, которые объединяются для реализации конкретных проектов и решения научных задач. Спектр деятельности НИЦ весьма широк и охватывает такие области, как физика, химия, биология, информационные технологии, медицина и многие другие. Главная цель работы центра заключается в генерации новых знаний и разработке технологий, полезных для использования в различных сферах жизни и деятельности человека.

Работа в НИЦ включает проведение экспериментов, анализ данных, разработку новых моделей и технологий, публикацию результатов исследований. Сотрудники центра имеют высшее образование и специализируются в определённой научной области. НИЦ часто сотрудничает с другими организациями, включая университеты, институты и промышленные предприятия. Главное отличие данных центров – отсутствие жилой застройки и наличие учебной [10].

Ряд авторов выделяют понятие *инновационный центр*. Для эффективного осуществления инновационного цикла от идеи до потребления новинки нужно преобразовать наиболее развитые вузы в учебно-научно-инновационные комплексы [11]. Специалисты выделяют несколько определений термина «инновационный центр». Это сложные комплексные институты инновационного развития, сочетающие в себе множество других инновационных институтов и затрагивающие всех основных участников инновационных процессов [12]. Можно рассматривать *«инновационный центр»* как предприятие, которое обладает специализированной инфраструктурой, деятельность которого направлена на содействие созданию, росту и развитию фирм» [10].

Существует концепция инновационного научно-производственного объекта (ИНПО). Термин означает «архитектурный объект, который предназначен для ведения инновационной научно-производственной деятельности, с соответствующей инфраструктурой (научной, вспомогательно-технической, социально-информационной)» [3]. В своем исследовании Д.А. Хрусталева проводит комплексный анализ факторов, определяющих формирование архитектурной среды для научной деятельности, сравнивая российский и международный опыт. Автор систематизирует ключевые пространственно-планировочные особенности таких комплексов и формулирует принципы их архитектурной организации. Основной акцент в работе сделан на разработку объемно-планировочных решений для современных научно-производственных центров инновационного типа. Хрусталева Д.А. дает функциональную характеристику ИНПО, он подчеркивает, что данные объекты «... развиваются на базе разных предприятий (университет, вуз, НИИ, промышленное предприятие)» [3]. По типологии такой объект может быть как отдельно стоящим зданием, так и комплексом зданий или же одним градостроительным образованием – городом. Таким образом, ИНПО – это

разновидность наукограда, имеет некие черты технополиса, но развивается в определенный период времени.

В научной литературе встречается неоднозначная трактовка термина «бизнес-инкубатор». Исследователи выделяют два основных подхода к его определению. Согласно позиции Ассоциации кластеров и технопарков РФ, а также Американской национальной ассоциации бизнес-инкубаторов, данная структура представляет собой специализированную организационно-правовую форму. Ее ключевая функция заключается в оказании комплексной поддержки начинающим предпринимателям на стартовом этапе их коммерческой деятельности. Хрусталева в своей научной работе характеризует бизнес-инкубатор как структуру, которая размещает на льготных условиях и на своих площадках специально отобранные вновь создаваемые и находящиеся на ранней стадии развития малые предприятия. «Они могут действовать как самостоятельные структуры, а также входить в состав научно-технологических парков и инновационно-технологических центров» [3]. Вторая точка зрения: бизнес-инкубатор рассматривается как объект инфраструктурной поддержки малого предпринимательства, где созданы все условия (социальная поддержка, развитая инфраструктура), необходимые для существования и развития, особенно на первоначальном этапе функционирования компаний [9]. Антонов А.В. в своей работе выделяет понятие «инкубатор инновационного бизнеса», характеризуя его как «первичную форму инновационного центра для поддержки наукоемкого предпринимательства и малого бизнеса широкого спектра деятельности» [10]. На данный момент создано значительное количество таких архитектурных объектов, например: научный инкубатор Российского университета медицины, британский инкубатор SETSquared, научный инкубатор биомедицинских исследований Dow Corning Research в Южной Корее.

В современном научном сообществе принято выделять определение «инновационный кластер». Практическое использование кластерного подхода, сформированного под влиянием кластерной теории, вносит значимый вклад в развитие реальных секторов экономики. Инновационный кластер предлагается рассматривать как отдельную среду, которая обладает своими параметрами существования и успешность управления которой заключается в определении правильной стратегии формирования ее базовой архитектуры. Инновационные кластеры выступают своеобразными «экосистемами прогресса», где взаимодействие бизнеса, науки и производства дает мультипликативный экономический эффект. Подобные структуры становятся катализаторами технологического развития территории. Современные инновационные кластеры собирают в себе такой функциональный блок, как исследовательский (лаборатории, учебные помещения, коворкинги, технические помещения и мастерские), конференц-залы, переговорные, рекреационный блок, сервисное обслуживание. Инновационные кластеры могут быть многофункциональными, состоящими из нескольких различающихся по функционалу кластеров и выполняющими роль научного города, или могут быть представлены одним зданием, функционально обслуживающим определенную отрасль науки [13...15]. Инновационные кластеры могут быть образованы в составе университетов, НИИ и т.д. Примерами инновационных кластеров являются Реновация ДСК-500 (Тюмень), Московский инновационный кластер при МГУ, Центральный кластер МГТУ имени Н.Э. Баумана, Иннополис и т.д.

Стоит отметить, что понятие инновационных кластеров новое для нашей страны, оно только начинает развиваться, что подтверждают программы государства, такие, как Постановление от 28 сентября 2023 года №1585, Приказ Минэкономразвития России от 27.06.2016 №400 «О приоритетном проекте Минэкономразвития России «Развитие инновационных кластеров-лидеров инвестиционной привлекательности мирового уровня»» и т.д.

Результаты и обсуждение. В процессе развития терминов и их обилия были выделены критерии типологизации инновационных предприятий. В современной научной и практической деятельности инновационные предприятия классифицируются по ряду ключевых признаков, позволяющих выделить их специфику, функциональное назначение и архитектурно-пространственную организацию. На основе

анализа существующих подходов (включая исследования О.В. Лилуевой, Д.А. Хрусталева, М. Портера) можно выделить следующие критерии типологизации:

- по масштабу и уровню интеграции;
- по функциональному назначению.

К первой категории критериев можно отнести:

- локальные (монофункциональные) объекты (отдельные научно-исследовательские центры, бизнес-инкубаторы, лабораторные комплексы);
- кластерные образования (объединения предприятий, университетов и исследовательских институтов (например, технопарки, наукограды));
- мегаполисные и региональные хабы (крупные инновационные зоны, интегрированные в городскую среду (Сколково, Силиконовая долина));
- международные сети (распределённые научно-производственные альянсы (Европейские инновационные кластеры, транснациональные R&D-центры)).

С позиции же функционального назначения научно-технологические кластеры и инновационные центры могут быть классифицированы на несколько типов. К научно-исследовательским центрам относятся структуры, основная деятельность которых направлена на проведение фундаментальных и прикладных исследований в различных областях науки и техники. Их основные задачи заключаются в генерации новых научных знаний, разработке передовых технологий и осуществлении экспертно-аналитической деятельности.

Технологические и производственные кластеры преимущественно ориентированы на внедрение и коммерциализацию научных и инженерных разработок. Они обеспечивают создание инновационных продуктов и систем, налаживают процессы опытного и серийного производства, а также активно взаимодействуют с индустриальными партнёрами для практического применения результатов исследований в реальном секторе экономики.

Особую роль играют образовательно-инновационные структуры, к которым относятся университетские кампусы, технопарки при высших учебных заведениях, а также центры коллективного пользования научной инфраструктурой. Они обеспечивают интеграцию образовательного процесса с инновационной и исследовательской деятельностью, формируя условия для подготовки высококвалифицированных кадров, генерации и трансфера знаний, а также развития молодёжного инновационного предпринимательства.

Многофункциональные комплексы представляют собой интегрированные образования, в которых сочетается сразу несколько функций: проведение научных исследований, производство высокотехнологичной продукции, создание условий для бизнес-акселерации, а также организация жилой и социальной инфраструктуры. Такой подход способствует формированию благоприятной инновационной среды, синергии между различными участниками, ускоряет трансфер технологий от идеи до коммерческого продукта и повышает привлекательность для специалистов и инвесторов.

Таким образом, выделенные по функциональному признаку типы инновационных кластеров обеспечивают комплексное развитие научно-технической и производственной сферы, способствуют эффективной интеграции науки, образования, промышленности и предпринимательства, что критически важно для построения инновационно ориентированной экономики.

По форме собственности и управлению различают следующие виды научных и образовательных комплексов:

- государственные (наукограды, национальные лаборатории);
- частные (корпоративные R&D-центры, коммерческие технопарки);
- ГЧП-проекты (государственно-частное партнёрство, например, «Иннополис» в России);
- международные консорциумы (CERN, Сколково с участием зарубежных партнёров).

По характеру и профилю (по типологии, предложенной А.В. Долголаптевым, президентом Союза развития наукоградов России) научные комплексы подразделяются на три категории:

- монопрофильные – города с единым градообразующим научным центром, определяющим всю инфраструктуру и занятость населения (например Оболенск, Протвино);
- моноориентированные – территории с несколькими предприятиями, работающими в одной научной сфере (Жуковский, Черноголовка);
- комплексные – объединяют исследовательские, конструкторские и производственные мощности (Дзержинск, Климовск).

В градостроительном проектировании *пространственная организация научных и образовательных комплексов* рассматривается как *системообразующий фактор*, определяющий эффективность функционирования территории, устойчивость развития и качество среды. Существуют различные типы схем внутренней структуры таких комплексов, каждая из которых формируется на основе уникальных факторов – климатических, градостроительных, институциональных и культурно-исторических. Приведем типы пространственной организации научных комплексов.

Моноблочные структуры характеризуются компактной застройкой, объединяющей основные функциональные компоненты в единый объем. Подобные решения оправданы в условиях дефицита территории, высокой стоимости земли, необходимости плотной интеграции функций, а также в специфических ландшафтных или климатических условиях. Оригинальные примеры такого подхода – бизнес-школа «Сколково» в Москве, кампус Венского университета экономики и бизнеса. Моноблок обеспечивает быструю связь между всеми элементами комплекса, способствует формированию единой идентичности объекта и высокой насыщенности пространства социальными и инновационными связями.

Моноцентричные пространственные модели строятся вокруг ярко выраженного композиционного ядра – главной площади, общественного центра или административного корпуса. Такое ядро становится доминантой, организующей движение, визуальное восприятие и распределение отдельных зон внутри комплекса. Данная схема характерна для старейших университетов Европы и США (кампусы Колумбийского университета в Нью-Йорке или Университета Луиджи Боккони в Милане). Моноцентричная структура усиливает чувство принадлежности к единой академической среде, но может затруднять развитие комплекса в условиях ограниченного пространства.

Квартальная структура предполагает деление территории на отдельные блоки или кварталы, функционально и архитектурно взаимосвязанные посредством системы общественных пространств, таких, как скверы, прогулочные аллеи, торговые галереи. Исторически этот подход был характерен для университетских городков Западной Европы, частично адаптирован в американских университетах, где преобладала свободная планировка. Благодаря такому делению обеспечиваются последовательность освоения территории, гибкая трансформация и интеграция новых функций без нарушения целостности комплекса.

Линейные схемы организации научных комплексов реализуются преимущественно вдоль важнейших транспортных и коммуникационных осей, что обеспечивает удобство логистики и постепенное разрастание территории. Классическими примерами таких структур можно считать кампус Калифорнийского университета в Беркли, а также проектируемую территорию УрФУ в Екатеринбурге. Линейная модель предпочтительна для участков вытянутой формы, а также в случаях, когда имеется потребность в функциональной специализации различных секторов вдоль оси.

Полицентричные (или многоядерные) структуры проявляются на обширных территориях, где формируются автономные функциональные кластеры – исследовательские, образовательные, жилые, рекреационные. Такая организация способствует диверсификации деятельности, свободному развитию отдельных секторов и формированию устойчивых горизонтальных связей между ними. Полицентричные комплексы

могут принимать конфигурацию кольцевых, многоядерных или так называемых «ковровых» структур (carpet development), что особенно актуально для современных инновационных кампусов и научно-технических парков.

Таким образом, выбор пространственной модели научного комплекса определяется не только особенностями участка и функциональными программами, но и стратегией его долгосрочного развития, спецификой образовательного или исследовательского процесса, запросами пользователей, а также градостроительным контекстом территории.

Выводы

1. Проведённый анализ позволил выявить как общие черты, так и значительные различия в трактовках понятий, характеризующих типологию зданий научного профиля. Общность между рассматриваемыми концепциями заключается в их непосредственной связи с развитием научных производств. Независимо от вариативности структуры в большинстве выделяемых типологических единиц обнаруживаются схожие функциональные блоки, включающие административную, лабораторную и рекреационную составляющие.

2. Выявленные различия обусловлены спецификой функционального наполнения объектов. В структуре ряда предприятий присутствуют дополнительные блоки – жилые, лабораторные, производственные, научно-исследовательские, офисные, что обуславливает многообразие архитектурно-пространственных решений. В то же время отдельные функциональные единицы могут отсутствовать в зависимости от типа научного объекта.

3. Впервые осуществлён комплексный анализ типологических характеристик зданий, ориентированных на размещение научных предприятий. Проведённый разбор не только подтверждает актуальность темы и востребованность данного научного направления, но и акцентирует внимание на существовании перспектив для дальнейших исследований. К их числу относятся выявление универсальных характеристик проектирования наукоёмких объектов, уточнение и формализация основных проектных принципов, а также детальное определение ключевых и вспомогательных функций таких предприятий.

Список литературы

1. Никифорова, А.Э. Инновационные центры: основные концепции и подходы / А.Э. Никифорова // Экономические стратегии. – 2013. – Т. 15, № 7(115). – С. 116–128.
2. Лилуева, О.В. Архитектурное формирование технопарков на базе наукоградов : автореф. дис. ... канд. архитектуры : 05.23.21 / О.В. Лилуева. – Нижний Новгород, 2011. – 24 с.
3. Хрусталева, Д.А. Архитектурное формирование научно-производственных зданий инновационного направления : дис. ... канд. архитектуры / Д.А. Хрусталева. – Москва, 2011. – 452 с.
4. Волков, И.В. Исследование понятия бизнес-инкубаторов в трактовках ученых-экономистов / И.В. Волков, Д.А. Тогащев // Карельский научный журнал. – 2016. – Т. 5, № 4(17). – С. 93–96.
5. Попов, А.В. Архитектурно-пространственная адаптация промышленных территорий Урала / А.В. Попов, Е.В. Демидова // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 3. – С. 28–33.
6. Савинова, В.А. Принципы формирования архитектуры научно-исследовательских объектов в условиях арктической зоны России : автореф. дис. ... канд. архитектуры : 2.1.12 / В.А. Савинова. – Москва, 2024. – 34 с.
7. Шишова, М.В. Роль технопарков и технополисов в инновационном развитии государства / М.В. Шишова, Е.А. Каримова, Д.Л. Напольских // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 6–4(81). – С. 167–170.
8. Stupar, Aleksandra. Living in the technopolis: Between reality and imagination / Stupar Aleksandra // Spatium. – 2008. – Issue 17–18. – P. 21–26.

9. Edler, J. Public procurement and innovation – resurrecting the demand side / J. Edler, J. Georghiou // *Res. Policy*. – 2007. – 36. – 949–963.
10. Антонов, А.В. Принципы формирования архитектуры зданий инновационных центров : автореф. дис. ... канд. архитектуры : 18.00.02 / А.В. Антонов. – Москва, 2007. – 23 с.
11. Сергеев, К.И. Территориально-градостроительные аспекты организации технопарковых структур / К.И. Сергеев, Г.И. Кулешова // *Вестник Российской академии наук: научный и общественно-политический журнал* / гл. ред. Ю.С. Осипов; учредитель Российская академия наук. – 2007. – Т.77, №12. – С.1100–1106.
12. Почтовая, А.В. Типологические аспекты архитектурного формирования зданий и комплексов инновационного назначения / А.В. Почтовая // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 11–1. – С. 74–79.
13. Гарькин, И.Н. Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, пофакторный и историко-генетический анализ / И.Н. Гарькин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2025. – № 1 (62). – С. 192–199.
14. Маренков, К.А. Современные технологические подходы в области архитектурной организации научно-образовательных центров / К.А. Маренков // *Градостроительство и архитектура*. – 2023. – Т.13, №4. – С. 156–159.
15. Пучков, М.В. Принципы проектирования научно-образовательных центров нового поколения: архитектура современных технологий обучения / М.В. Пучков // *Академия*. – 2011. – № 2. – С. 48–51.

References

1. Nikiforova, A.E. Innovation Centers: Basic Concepts and Approaches / A.E. Nikiforova // *Economic Strategies*. – 2013. – Vol. 15, №. 7 (115). – P. 116–128.
2. Liluyeva, O.V. Architectural Formation of Technology Parks Based on Science Cities : Abstract of candidate of architecture dissertation : 05.23.21 / O.V. Liluyeva. – Nizhny Novgorod, 2011. – 24 p.
3. Khrustalev, D.A. Architectural Formation of Scientific and Industrial Buildings in the Innovative Direction : candidate of architecture dissertation : 05.23.21 / D.A. Khrustalev. – Moscow, 2011. – 452 p.
4. Volkov, I.V. Study of the concept of business incubators in the interpretations of economists / I.V. Volkov, D.A. Togashov // *Karelian Scientific Journal*. – 2016. – Vol. 5, № 4 (17). – P. 93–96.
5. Popov, A.V. Architectural and spatial adaptation of industrial territories of the Urals / A.V. Popov, E.V. Demidova // *Academic Bulletin of UralNIIProekt RAASN*. – 2014. – № 3. – P. 28–33.
6. Savinova, V.A. Principles of formation of the architecture of research facilities in the conditions of the Arctic zone of Russia : Abstract of candidate of architecture dissertation : 2.1.12 / V.A. Savinova. – Moscow, 2024. – 34 p.
7. Shishova, M.V. The Role of Technology Parks and Technopolises in the Innovative Development of the State / M.V. Shishova, E.A. Karimova, D.L. Napolskikh // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. – 2023. – № 6–4(81). – P. 167–170.
8. Stupar, Aleksandra. Living in the technopolis: Between reality and imagination / Stupar Aleksandra // *Spatium*. – 2008. – Issue 17–18. – P. 21–26.
9. Edler, J. Public procurement and innovation – resurrecting the demand side / J. Edler, J. Georghiou // *Res. Policy*. – 2007. – 36. – 949–963.
10. Antonov, A.V. Principles of Formation of the Architecture of Buildings of Innovation Centers : Abstract of candidate of architecture : 18.00.02 / A.V. Antonov. – Moscow, 2007. – 23 p.
11. Sergeev, K.I. Territorial and urban planning aspects of the organization of technology park structures / K.I. Sergeev, G.I. Kuleshova // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: scientific and socio-political journal* / ed.-in-chief Yu.S. Osipov ; founder Russian Academy of Sciences. Presidium. – 2007. – Vol. 77, №12. – P. 1100–1106.

-
12. Pochtovaya, A.V. Typological aspects of the architectural formation of buildings and complexes for innovative purposes / A.V. Pochtovaya // Fundamental research. – 2016. – № 11–1. – P. 74–79
 13. Garkin, I.N. Historical and architectural value of cultural heritage sites: assessment methods, factorial and historical-genetic analysis / I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2025. – № 1 (62). – P. 192–199.
 14. Marenkov, K.A. Modern technological approaches in the field of architectural organization of scientific and educational centers / K.A. Marenkov // Urban planning and architecture – 2023. – Vol.13, №4. – P. 156–159.
 15. Puchkov, M.V. Design principles of new generation scientific and educational centers: architecture of modern teaching technologies / M.V. Puchkov // Academy. – 2011. – №2. – P. 48–51.

УДК 727.012:534.84

DOI 10.54734/20722958_2026_3_203

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Королева Лариса Александровна**,
доктор исторических наук, профессор,
декан института цифрового управления
E-mail: la-koro@yandex.ru**Мику Наталья Валентиновна**,
кандидат исторических наук, доцент
кафедры истории и философии
E-mail: mikunatalja@rambler.ru*Penza State University of Architecture and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Koroleva Larisa Alexandrovna**,
Doctor of Historical Sciences, Professor, Dean
of the Institute of Digital Management
E-mail: la-koro@yandex.ru**Miku Natalia Valentinovna**,
Candidate of Historical Sciences, Associate
Professor of the Department of History and
Philosophy
E-mail: mikunatalja@rambler.ruИсследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-28-20273,
<https://rscf.ru/project/25-28-20273/>

АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗДАНИЙ РАДИОДОМОВ В СССР И ЗА РУБЕЖОМ, ПОСТРОЕННЫХ В 1930-1980-е гг.

Л.А. Королева, Н.В. Мику

Рассмотрено внешнее и внутреннее архитектурное и конструктивное оформление радиодомов, строившихся с конца 1920-х годов в различных странах мира, в том числе и в СССР. Проанализированы особенности устройства радиодомов. Сопоставлены проектные решения радиодомов в Берлине, Гамбурге, Брюсселе, Нью Йорке и в СССР. Представлены основные технические требования к комплексам сооружений, предназначенных для радиовещания. Показаны способы достижения требуемых технических характеристик студий радиодомов, связанных прежде всего с обеспечением оптимальных акустических условий: защитой от уличного шума и внешних вибраций, получением необходимого звукового эффекта в различных условиях, изменением размеров и форм помещений, применением материалов с различными звукопоглощающими свойствами.

Ключевые слова: радиодом, архитектурный проект, строительство, планировка помещений, акустика помещений, оборудование радиостудий, звукопоглощающие материалы

ARCHITECTURAL, PLANNING AND STRUCTURAL FEATURES OF RADIO HOUSE BUILDINGS IN THE USSR AND ABROAD, BUILT IN THE 1930-1980s

L.A. Koroleva, N.V. Miku

This article examines the exterior and interior architectural and structural design of radio houses built since the late 1920s in various countries including the USSR. The design features of these houses are analyzed. Design solutions for radio houses in Berlin, Hamburg, Brussels, New York, and the USSR are compared. The main technical requirements for complexes of structures designed for radio broadcasting are discussed. Methods for achieving the necessary technical characteristics of radio house studios are demonstrated, primarily related to ensuring optimal acoustic conditions: protection from street noise and external vibrations, achieving the desired sound effect in various conditions, varying the size and shape of the rooms, and using materials with different sound-absorbing properties.

Keywords: radio house, architectural design, construction, room layout, room acoustics, radio studio equipment, sound-absorbing materials

Радиодом – это комплекс устройств и сооружений, предназначенных для подготовки программ радиовещания. Устройство радиодома включает: студийный блок, аппаратно-студийные комплексы, аппаратно-студийные блоки (где записываются передачи художественного радиовещания), радиостудию, режиссерскую аппаратную, аппаратно-программные блоки (из них обычно осуществляется вещание в прямом эфире информационных и общественно-политических программ и дикторских вставок), речевую студию, монтажную аппаратную, центральную аппаратную, редакционный блок (помещения для редакторов и административно-управленческого аппарата), комплекс передвижных средств, передвижные звукозаписывающие станции, передвижные трансляционные станции. Известный архитектор В. Гроссман подчеркивал, что планировка, выбор конструкций, фундаментов, стен и перекрытий радиодомов, внешнее и внутреннее архитектурное и художественное оформление, материалы для отделки радиостудий диктовались главным образом необходимостью обеспечения максимально возможной изоляции помещения студий от шума и вибраций извне и изнутри, создания оптимальных акустических условий внутри каждой студии [1].

Целью исследования являлось изучение особенностей архитектурно-планировочных и конструктивных решений при строительстве радиодомов в период с конца 1920-х до начала 1990-х годов.

Теоретической основой исследования стали труды отечественных и зарубежных ученых в области радиовещания в целом, архитектурной акустики в частности; комплекс опубликованных и неопубликованных источников Государственного архива Пензенской области (Ф. р-2474. Оп. 1. Фонд Пензенского областного комитета по телевидению и радиовещанию).

Вопросы архитектурной акустики, включая пространственную, а также звукоизоляцию, звукофикацию и т.п., находились в фокусе изучения Н.Н. Андреева [2], И.Г. Дрейзена [3], И.А. Зейтленка [4], А.В. Рабиновича [5] и др.

Активное строительство радиодомов началось в конце 1920-х гг. В начале 1930-х гг. одним из лучших по акустическим параметрам и техническому оснащению был Берлинский радиодом. Архитектурный проект был разработан Гансом Пельцигом после победы в архитектурном конкурсе в 1929 г. Здание было построено на Кайзердамштрассе в 1929–1931 гг. под руководством ассистента Пельцига Макса Х. Берлинга. За дизайн интерьера отвечал Курт Либкнехт. 22 января 1931 г. состоялось его открытие. Строение представляло собой треугольник с двумя изогнутыми сторонами для звукоизоляции 15 студий различной величины от внешнего шума (рис. 1). За главным входом находился атриум, от которого расходились коридоры и залы. Прямой фасад длиной 150 м был облицован керамической плиткой. На первых этажах здания размещались радиовещательные общества. Верхние этажи отводились под архив, читальный зал радиолитературы и радиомузей.

Служебные помещения в виде замкнутого кольца образовывали двор, внутри которого находились одна большая центральная студия и две малые. Благодаря такому расположению все эти три студии были защищены от влияния уличного шума, и это давало возможность пользоваться окнами для естественного освещения залов. В целях защиты от внешних сотрясений фундамент под студиями был сделан из известкового прессованного кирпича, который хуже проводил сотрясения, чем бетон и бутовая кладка, и были проложены два слоя изоляционных прокладок – нижний и верхний.

Центральная студия высотой 12 м была рассчитана на большие хоры и оркестры. Кресла в большом зале для вещания были специально сконструированы так, чтобы иметь одинаковые звукопоглощающие свойства независимо от того, заняты они или нет. Акустические возможности большой студии были таковы, что в ней можно было получить звуковой эффект большого зала для симфонических концертов («пространственный звук»), передавать оперы, камерную музыку. Без особых приборов, пользуясь только переменной облицовки, можно было получить шум моря, ружейные и оружейные залпы, рокот самолета, – все это давала акустическая «перспектива». Половина большой студии была предназначена для оркестра. Подмост для оркестра на 2 м мог быть поднят или опущен тем же механизмом, чтобы добиться наилучшего

звучания. Другая половина студии была занята сценой; висящий над нею звуковой софит передвигался в любых направлениях по отношению к сцене. В студии же находился орган.

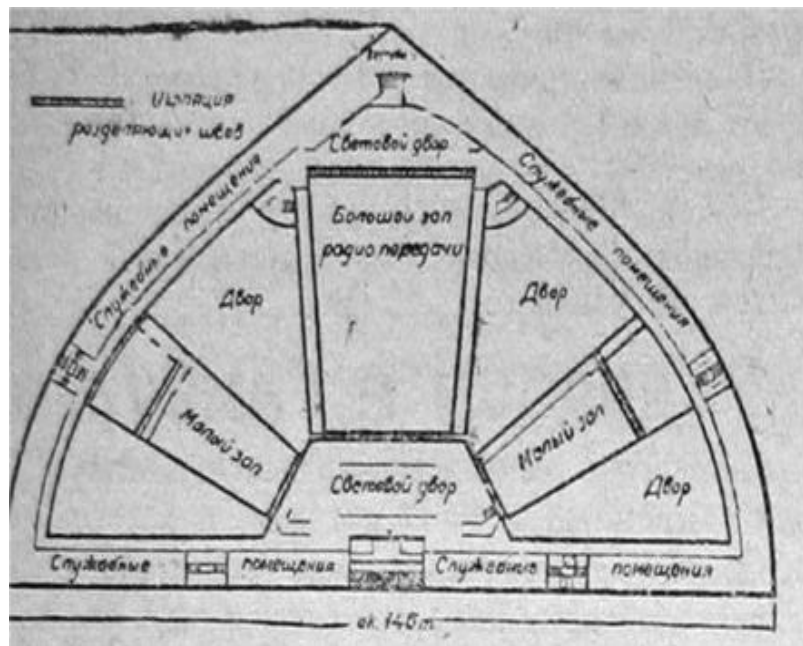


Рис. 1. План Берлинского радиодома

В отдельной меньшей студии можно было переворачивать настенные панели — одна сторона поглощала звук, другая отражала его, что позволяло достигать разных эффектов реверберации. Несколько малых студий предназначались для чтения докладов, речей, литературных передач. Короткие стены студий не были звукоизолированы и отражали звук, тогда как длинные стены его поглощали. Несколько залов имели вспомогательное назначение — репетиционные, артистические фойе. В Берлинском радиодоме не было автоматического управления в студиях. Дежурный радиотехник зажигал в студии сигнал, получал от нее ответный сигнал и шнурами после этого включал микрофон студии на усилитель и от него — передатчик [6].

Ввиду значительных напряжений, приходящихся на кладку, в качестве изоляционной прокладки был избран антивибрит — материал, состоящий из 6 слоев джутовой мешочной ткани, пропитанной при температуре 140–150 °С нефтяным битумом и спрессованной при температуре около 30–50 °С под давлением в 50–60 кг/см². Нижняя прокладка под металлическими стойками состояла из двух плит антивибрита (каждая толщиной 0,5 см) с прокладкой в середине двух листов оцинкованного железа (толщина каждого 0,75 мм). Эта прокладка была положена на фундамент стойки под распределительной плитой, а листы из оцинкованного железа выполняли роль распределительной нагрузки. Сверху колонна изоляции состояла из листов рольного свинца и оцинкованного железа с прокладкой антивибрита. Нижняя изоляция стен располагалась на высоте 0,5 м от уровня земли и по устройству была аналогична прокладке у металлической стойки. В целях повышения сцепления как между отдельными слоями прокладки, так и прокладки с фундаментом и стеной каждый слой прокладки укладывался на слой горячего битума.

В радиодоме в Гамбурге некоторые из студий были выложены деревом, отдельные — мрамором и другими материалами, чтобы получить различные условия резонанса и реверберации звука. В советском журнале «Радиофронт» устройство здания характеризовалось следующим образом: «Большая концертная студия могла расширяться до максимального предела или сокращаться до минимума (подвижные стены), кроме того, изменять поверхность стен. Специальные механизмы в несколько секунд заменяют деревянную облицовку матерчатой, войлочной или из специального материала —

целлотикса. На потолке студии ... висят искусственные сталактиты. Назначение их – менять степень поглощения звука в студии (известно, как гулко резонирует пустой театральный зал и как резонанс пропадает после наполнения зала публикой)» [7] (рис. 2).

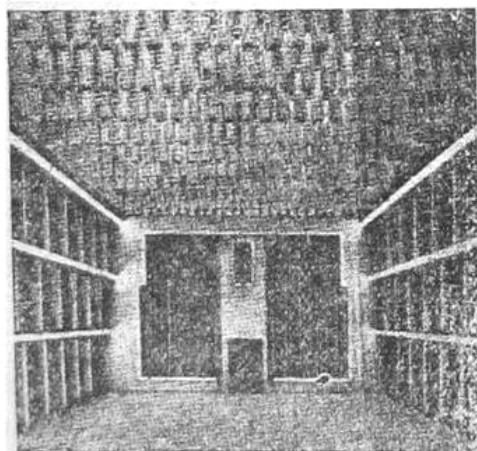


Рис. 2. Уголок большой студии радиодома Гамбурга

Здание «Радио-сити» в Нью-Йорке высотой 260 м, имевшее 70 этажей, было введено в эксплуатацию в 1932 г. (рис. 3). Радио-сити вмещало 22 студии, 5 радиоаудиторий, 8 кабинетов для регулирования звука. В целях повышения звукопоглощаемости и стойкости к вибрации в стенах и перекрытиях были проложены слои из шлаковой шерсти. Стены и потолки частично были облицованы перфорированными плитами «Транзит». Стены в отдельных студиях в виде раздвижных и складных больших щитов позволяли регулировать акустику в помещении.

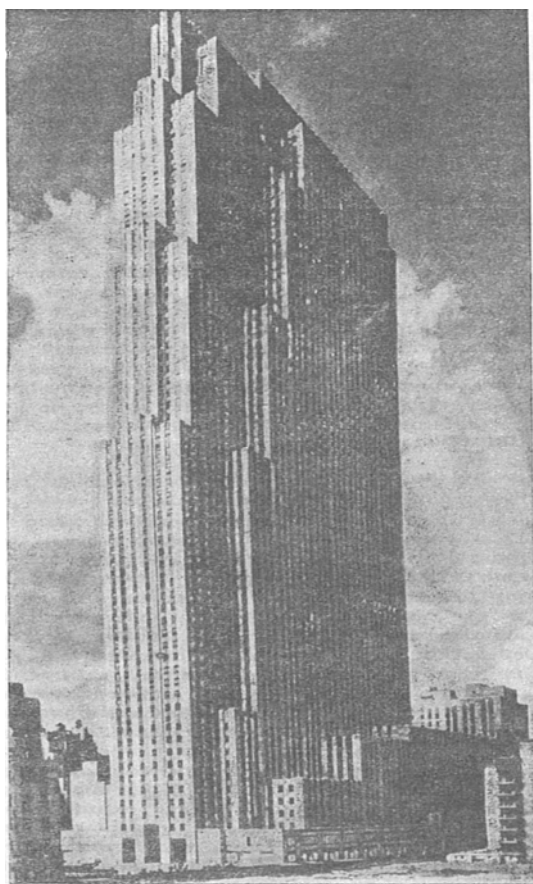


Рис. 3. Внешний вид Радио-сити

Примененная в Радио-сити система освещения представляла собой арматуру, скрытую за матовым стеклом в уровень с потолком, что давало искусственное освещение без теней и блеска [1].

Дом радио в Брюсселе был построен по проекту архитектора Ж. Дионгра в 1935–1938 гг. и вмещал 19 студий. Здание имело своеобразное решение звукоизоляции. Студии были охвачены кирпичными башнями со стенами толщиной до 1 м. В некоторых местах, между стенами студии и охватывавших их башен, существовали пустоты. Стены самих студий состояли из двойных кирпичных стенок с несколькими слоями изоляционных материалов. Между студиями, находившимися на разных этажах, оставлялось воздушное пространство, причем в капителях столбов, расположенных в этом пространстве, были устроены звукоизоляционные прокладки. Массивные железные двери и внутренние окна были загорожены двойным и тройным стеклом. Для того чтобы через вентиляционные каналы не передавался звук, каждая студия была снабжена самостоятельной вентиляционной системой [8].

В СССР радиодомы представляли собой художественно-промышленные предприятия, которые осуществляли техническую часть подготовки программ радиовещания, запись и тиражирование фонограмм (рис. 4).



Рис. 4. Советский Дом радио

В 1932 г. коллегия Наркомсвязи поручила группе инженеров и архитекторов (Горен, Зейтленок, Нюренберг, Голдберг, Духанин и др.) составить эскизный проект радиодворца в Москве. В проектируемом радиодворце должны были располагаться 43 студии: речевые, для больших и малых симфонических концертов, для камерной музыки, для драматических передач и т.д. За рабочую единицу был взят блок, состоявший из трех студий – большой, средней и малой. Между студиями помещалась контрольная комната, где должен был работать радиофонический режиссер.

В 1933–1934 гг. НКСвязь и Всесоюзный комитет радиовещания провели конкурс на лучший эскизный проект Радиодома в Москве на Миусской площади. На конкурс было представлено 20 проектов и 3 заказных [9]. Первую премию получил проект Дворца радио – Радиодома, авторами которого были А.Н. Душкин, А.Г. Мордвинов и К.И. Соломонов (рис. 5). Для обеспечения звукоизоляции предлагалось использовать прочные стены практически достроенного храма Александра Невского, стоявшего посередине площади. Радиодом стилистически был выдержан в формах раннего сталинского ампира, близкого к ар-деко с некоторыми отголосками авангарда. Однако проект не был реализован.

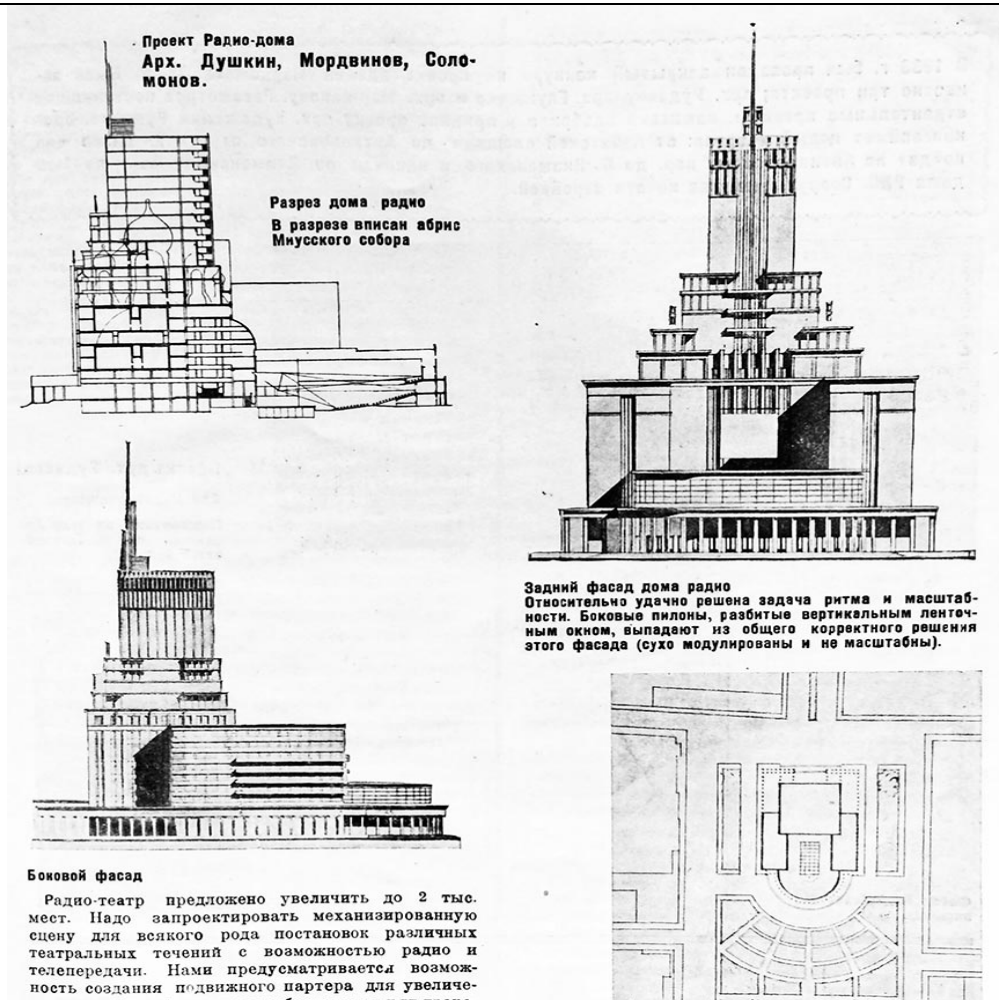


Рис. 5. Проект Радиодома. 1933 г.

5 декабря 1938 г. была проведена первая студийная запись в Государственном доме радиовещания и звукозаписи (ГДРЗ), который представлял собой семизэтажное здание в стиле «сталинский ампи́р» с тремя основными студиями.

В 1950–1960-е гг. в Советском Союзе развернулось строительство новых радиодомов и студий, оборудованных современной аппаратурой. На 1 января 1965 г. в СССР функционировало 44 радиодома. В 1961 г. были введены ТУ 560-60 «Телецентры, ретрансляционные телевизионные станции и радиодома. Технические условия. Нормы проектирования». В 1973 г. начали действовать НТП 45.560-72 «Нормы технологического проектирования. Радиотелевизионные передающие станции, телевизионные центры, радиодома».

В Пензе строительство радиодома началось в 1960 г. Инициаторами выступили обком КПСС и облисполком. По решению горисполкома от 19 января 1960 г. редакции по радиовещанию и телевидению был отведен земельный участок площадью 0,12 га в районе телецентра. В 1963 г. строительство Пензенского радиодома завершилось. На тот момент он был оснащен новейшей аппаратурой и располагал речевой и концертной студиями и редакционными помещениями [10].

Радиовещание осуществлялось с помощью телебашни высотой более 180 м, построенной в 1957 году и расположенной на территории Пензенского телецентра. Наряду с радиоцентром, телебашня г. Пензы являлась достаточно значимым сооружением, сочетающим современные инженерные и архитектурные решения.

В ы в о д ы

1. Радиодом, или Дом радио, представлял собой строение или несколько строений, предназначенных для обеспечения технической и технологической подготовки

радиопрограмм, а также их выпуска в эфир. Обычно в состав радиодомов, возводимых с конца 1920-х гг., входили радиостудии, аппаратные и монтажные комнаты, фонотеки, помещения вспомогательных служб и т.д. Особыми требованиями для зданий радиодомов являлись повышенная звукоизоляция и нейтрализация внешнего воздействия.

2. Архитектурно-планировочные и конструктивные решения при строительстве радиодомов включали в себя организацию пространственного звука, использование материалов и способов для гашения вибраций, изменения объема и конфигурации помещений для звукозаписи, применение особых систем и конструкций для достижения различной степени поглощения звука. Многие из таких решений могут быть реализованы при проектировании современных студий звукозаписи.

Список литературы

1. Гроссман, В. Строительство радиодомов и оборудование радиостудий / В. Гроссман // Архитектура СССР. – 1939. – № 11. – С. 71.
2. Андреев, Н.Н. Архитектурная акустика в СССР / Н.Н. Андреев, В.С. Григорьев, И.Г. Лейзер, Л.Д. Розенберг, Б.Д. Тартаковский // Успехи физических наук. – 1949. – Т. 37, вып. 3. – С. 269–315.
3. Дрейзен, И.Г. Курс электроакустики : в 2 т. / И.Г. Дрейзен. – Москва : Связьрадиоиздат, 1938-1940. – 677 с.
4. Зейтленок, И.А. Основные принципы проектирования радиодворца / И.А. Зейтленок // Радиофронт. – 1932. – № 10. – С. 19.
5. Рабинович, А.В. Радиовещательные студии и микрофоны / А.В. Рабинович, Ю.М. Сухаревский ; под ред. С.Н. Ржевкина. – Москва : Связьрадиоиздат, 1939. – 196 с.
6. Каким будет Радиодворец. К обсуждению проекта радиодворца привлечем пролетарскую радиообщественность // Радиофронт. – 1932. – №9. – С. 21.
7. Радиодом в Гамбурге // Радиофронт. – 1931. – № 6. – С. 371.
8. Две радиостудии // Архитектура СССР. – 1939. – № 7. – С. 86.
9. Табориский. В Москве будет радиодом. Что дал конкурс на лучший проект // Радиофронт. – 1934. – № 2. – С. 12.
10. Государственный архив Пензенской области (ГАПО). Ф.р-2474. Оп. 1. Д. 84. Л. 1.

References

1. Grossman, V. Construction of radio houses and equipment of radio studios / V. Grossman // Architecture of the USSR. – 1939. – No. 11. – P. 71.
2. Andreev, N.N. Architectural acoustics in the USSR / N.N. Andreev, V.S. Grigoriev, I.G. Leizer, L.D. Rosenberg, B.D. Tartakovsky // Advances in Physical Sciences. – 1949. – Vol. 37, Issue. 3. – P. 269–315.
3. Dreyzen, I.G. Electroacoustics course : in 2 vol. / I.G. Dreyzen. – Moscow : Svyazradioizdat, 1938-1940. – 677 p.
4. Zeytlenok, I.A. Basic principles of designing a radio palace / I.A. Zeytlenok // Radiofront. – 1932. – No. 10. – P. 19.
5. Rabinovich, A.V. Radio Broadcasting Studios and Microphones / A.V. Rabinovich, Yu.M. Sukharevsky ; ed. by S.N. Rzhevkin. – Moscow : Svyazradioizdat, 1939. – 196 p.
6. What the Radio Palace Will Be Like. Let's Involve the Proletarian Radio Community in the Discussion of the Radio Palace Project // Radiofront. – 1932. – No. 9. – P. 21.
7. Radio House in Hamburg // Radiofront. – 1931. – No. 6. – P. 371.
8. Two Radio Studios // Architecture of the USSR. – 1939. – No. 7. – P. 86.
9. Taborisky. There Will Be a Radio House in Moscow. What the Competition for the Best Project Gave // Radiofront. – 1934. – No. 2. – P. 12.
10. State Archives of the Penza Region (GAPO). F.r-2474. Op. 1. D. 84. L. 1.

