

**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:
А.М. Данилов (главный редактор)
Е.В. Королев (заместитель
главного редактора)
И.А. Гарькина (ответственный
секретарь)

Редакторы: М.А. Сухова
Н.Ю. Шалимова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка
Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

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 использо-
вание в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.
Редакция может опубликовать статьи
в порядке обсуждения, не разделяя точку
зрения автора.

Подписано к печати 25.11.2023.
Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд.л. 28,125. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 464.

Дата выхода в свет 25.12.2023.
Отпечатано в издательстве ПГУАС
Цена 1200 руб.

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 4(57)/2023

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

**Кочергина М.П., Иващенко Ю.Г.,
Страхов А.В., Тимохин Д.К.**
ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ
СИЛИКАТНАТРИЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ 5

Баранов А.С.
ПОИСК РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ГИПЕРПРЕССОВАННОГО БЕТОНА 12

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ЭКСПЕРТИЗА
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ 21

**Хмара Н.О., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В.,
Нелюбова В.В., Духанина У.Н.**
ПОКАЗАТЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ
С ДОБАВКОЙ ВСПУЧЕННОГО
ПЕРЛИТОВОГО ПЕСКА 30

**Подгорный Д.С., Бондаренко Д.О.,
Строкова В.В., Скиба А.А.**
СВОЙСТВА ПОРОШКОВ ТИТАНА,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ДЕТОНАЦИОННОГО
НАПЫЛЕНИЯ НА БЕТОН 41

Тарасева Н.И., Грачева Ю.В., Махамбетова К.Н.
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ
КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ СЫРЬЯ
ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА 49

Лавров И.Ю., Береговой В.А.
ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ
БЕТОНОВ 56

**Романенко И.И., Фадин А.И.,
Петровнина И.Н., Еличев К.А.**
БЕТОНЫ БЫСТРОГО НАБОРА ПРОЧНОСТИ
ДЛЯ МОНОЛИТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА 66

Очкина Н.А., Очкин И.А.
КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ
ВЫСОКОПЛОТНЫХ КОМПОЗИТОВ
ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ 74

© Авторы публикаций, 2023
© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2023
© ПГУАС, 2023

Шорстова Е.С., Ключев С.В., Ключев А.В., Гарькина И.А., Аюбов Н.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ТОНКОМОЛОТОГО ОТСЕВА КВАРЦИТОПЕСЧАНИКА НА ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ 80	Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ВСПЛЫВАНИЯ В ЧИСТОЙ ВОДЕ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА И ТОНКОСТЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ТЕЛ 159
Логанина В.И., Соколова Ю.А. СИЛИКАТНЫЕ КРАСКИ ДЛЯ ОТДЕЛКИ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ..... 88	Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В. НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ ЭРЛИФТНЫХ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ 169
Логанина В.И. НАНОРАЗМЕРНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ ДЛЯ ИЗВЕСТКОВЫХ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ..... 101	Наумов В.А., Шторк А.В. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ПОЛИЭТИЛЕНОВЫМИ ТРУБАМИ..... 176
Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Егоров А.Ю., Шестернин А.И. СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА, ИЗГОТОВЛЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ БЕТОННОГО ЛОМА 115	Еремкин А.И., Фильчакина И.Н., Мишин А.А., Фильчакин Н.С. НИЗКОСКОРОСТНОЙ ПЛАСТИНЧАТЫЙ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬ ДЛЯ ПОДАЧИ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА В НИЖНЮЮ ЗОНУ ПОМЕЩЕНИЙ С ТЕПЛОИЗБЫТКАМИ 184
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 122	АРХИТЕКТУРА..... 191
Глухов В.С., Панкина М.В., Вишнякова Ю.С. ФОРМИРОВАНИЕ ОКОЛОСВАЙНОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ..... 122	Бенаи Х.А., Радионов Т.В., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. АРХИТЕКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ..... 191
Снежкина О.В., Корнюхин А.В. ОЦЕНКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК НА ДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ..... 127	Попов А.О., Маилян Л.Р., Сабитов Л.С., Данилов А.М., Гарькин И.Н. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ НА ПРИМЕРЕ КОРПУСА «ОРЕШЕК» ШЛИССЕЛЬБУРГСКОЙ КРЕПОСТИ 199
Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Широкова Е.С. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТИРОЛЬНЫХ ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ (ТЭП)..... 135	Береговой А.М. ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ЧЕРЕЗ НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ В СТАДИИ УВЛАЖНЕНИЯ И ПРОМЕРЗАНИЯ МАТЕРИАЛА 206
Титова Е.И., Акимова И.В. МНОГОСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ УТЕПЛЕНИЯ: ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ..... 143	Смирнова Ю.О., Кулаков К.Ю. МОДЕРНИЗАЦИЯ И РЕНОВАЦИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ КАЧЕСТВА СРЕДЫ 211
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 149	Указатель статей, опубликованных в 2023 году 221
Кузина В.В., Кошев А.Н., Кошев Н.А., Пономарева И.К. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХМЕРНОГО ДИФфуЗИОННО- КОНВЕКТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ СВЕЧЕЙ В ХРАМЕ..... 149	

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Loganina V.I., Sokolova Yu.A. SILICATE PAINTS FOR FINISHING BUILDINGS FACADS	88
Kochergina M.P., Ivashchenko Yu.G., Strakhov A.V., Timokhin D.K. ELECTRON-MICROSCOPIC STUDIES OF MODIFIED SODIUM SILICATE COMPOSITIONS	5	Loganina V.I. NANOSCALE MODIFIERS FOR LIME DRY CONSTRUCTION MIXTURES	101
Baranov A.S. SOLUTION OF THE PROBLEM OF MANUFACTURING PRODUCTS FROM HYPER-PRESSED CONCRETE	12	Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Egorov A.Yu., Shesternin A.I. PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MADE USING PRODUCTS OF PROCESSING CONCRETE SCRAP	115
Budyлина E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. IDENTIFICATION AND INSPECTION OF COMPLEX SYSTEMS.....	21	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	122
Khmara N.O., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V., Nelyubova V.V., Duhanina U.N. INDICATORS OF BIOLOGICAL RESISTANCE OF CEMENT STONE WITH THE ADDITION OF EXPANDED PERLITE SAND.....	30	Glukhov V.S., Pankina M.V., Vishniakova Yu.S. FORMATION OF A SOIL ZONE NEAR A PILE	122
Podgornyi D.S., Bondarenko D.O., Strokova V.V., Skiba A.A. PROPERTIES OF TITANIUM POWDERS INTENDED FOR DETONATION SPRAYING ON CONCRETE.....	41	Snezhkina O.V., Korniyukhin A.V. EVALUATION OF METHODS FOR CALCULATION STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER THE ACTION OF TRANSVERSAL FORCES	127
Taraseeva N.I., Gracheva Yu.V., Makhambetova K.N. GEOSYNTHETIC BINDERS AS ALTERNATIVE TYPES OF RAW MATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION.....	49	Yurkin Yu.V., Avdonin V.V., Shirokova E.S. ANALYSIS OF DYNAMIC AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STYRENE THERMOPLASTIC ELASTOMERS (TPE)	135
Lavrov I.Yu., Bergeovoy V.A. LABORATORY COMPLEX FOR THE STUDY OF VIBRODYNAMIC PARAMETERS OF STRUCTURAL CONCRETE.....	56	Titova E.I., Akimova I.V. MULTILAYER INSULATION STRUCTURES: SOFTWARE.....	143
Romanenko I.I., Fadin A.I., Petrovnina I.N., Elichev K.A. RAPID CONCRETE FOR MONOLITHIC CONSTRUCTION.....	66	ENGINEERING SYSTEMS	149
Ochkina N.A., Ochkin I.A. KINETICS OF STRENGTH GAIN OF HIGH-DENSE SPECIAL PURPOSE COMPOSITES.....	74	Kuzina V.V., Koshev A. N., Koshev N.A., Ponomareva I.K. MATHEMATICAL MODELING OF TWO- DIMENSIONAL DIFFUSIVE-CONVECTIVE DISTRIBUTION OF CANDLE BURNING PRODUCTS IN A CHURCH.....	149
Shorstova E.S., Klyuev S.V., Klyuev A.V., Garkina I.A., Ayubov N.A. INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE ADDITION OF FINELY GROUND QUARTZITE SANDSTONE SCREENING ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF MIXTURES FOR 3D PRINTING.....	80	Andreev S.Yu., Belova L.V., Lebedinskiy K.V. THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE PROCESSES OF FLOATING AIR BUBBLES AND THIN-WALLED SPHERICAL BODIES IN CLEAN WATER.....	159
		Andreev S.Yu., Belova L.V., Lebedinsky K.V. A NEW METHOD FOR CALCULATING MIXING AIRLIFT DEVICES OPERATING IN DYNAMIC MODE	169

<p>Naumov V.A., Shtork A.V. FEATURES OF DETERMINING THE OPTIMAL DIAMETER IN THE DESIGN OF WATER SUPPLY SYSTEMS WITH POLYETHYLENE PIPES 176</p> <p>Eremkin A.I., Filchakina I.N., Mishin A.A., Filchakin N.S. LOW SPEED PLATE AIR DISTRIBUTOR FOR SUPPLYING INCOMING AIR TO THE LOWER ZONE OF ROOMS WITH EXCESS HEAT..... 184</p> <p>ARCHITECTURE.....191</p> <p>Benai H.A., Radionov T.V., Sabitov L.S., Garkin I.N. ARCHITECTURAL OPTIMIZATION OF DESIGN SOLUTIONS..... 191</p>	<p>Popov A.O., Mailyan L.R., Sabitov L.S., Danilov A.M., Garkin I.N. SYSTEM APPROACH TO ANALYZING TECHNICAL CONDITION OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS ON THE EXAMPLE OF “ORESHEK” BUILDING OF THE SHLISSELBURG FORTRESS 199</p> <p>Beregovoy A.M. HEAT LOSSES THROUGH EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES AT THE STAGE OF HUMIDIFICATION AND FREEZING OF THE MATERIAL.....206</p> <p>Smirnova Yu.O., Kulakov K.Yu. MODERNIZATION AND RENOVATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS BASED ON MODERN REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENVIRONMENT QUALITY211</p> <p>Index of articles, published in 2022 ... 221</p>
--	--

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.53

DOI 10.54734/20722958_2023_4_5

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452)99-88-90; (8452)99-89-23

Кочергина Мария Петровна,

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные материалы,
конструкции и технологии»

E-mail: m-kochergina@list.ru

Ивашенко Юрий Григорьевич,

доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные материалы,
конструкции и технологии»

Страхов Александр Владимирович,

кандидат технических наук, доцент,
директор института урбанистики,
архитектуры и строительства

Тимохин Денис Константинович,

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Строительные
материалы, конструкции и технологии»

*Yuri Gagarin State Technical University of
Saratov*

410054, Russia, Saratov, st. Polytechnic, 77,
tel.: (8452)99-88-90; (8452)99-89-23

Kochergina Maria Petrovna,

Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building Materials,
Structures and Technologies»

E-mail: m-kochergina@list.ru

Ivashchenko Yuri Grigorievich,

Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Building Materials, Structures
and Technologies»

Strakhov Aleksander Vladimirovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor,
Director of the Institute of Urban Studies,
Architecture and Construction

Timokhin Denis Konstantinovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Building Materials,
Structures and Technologies»

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СИЛИКАТНАТРИЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

М.П. Кочергина, Ю.Г. Ивашенко, А.В. Страхов, Д.К. Тимохин

Представлены результаты исследования модифицированных силикатнатриевых композиций методом просвечивающей электронной микроскопии, где в качестве модификатора использовалась цинковая соль уксусной кислоты. Показано, что характерные изменения на микроснимках могут указывать на процессы синтеза $ZnSiO_3$ в исследуемой системе. На основании результатов электронно-микроскопических исследований, дополняющих результаты ИК-спектроскопического, рентгенофазового и дифференциально-термического анализов аналогичных модифицированных силикатнатриевых композиций, предложена схема образования $ZnSiO_3$ в исследуемой системе.

Ключевые слова: жидкое натриевое стекло; силикатнатриевые связующие; цинковая соль уксусной кислоты; водостойкость; просвечивающая электронная микроскопия

ELECTRON-MICROSCOPIC STUDIES OF MODIFIED SODIUM SILICATE COMPOSITIONS

M.P. Kochergina, Yu.G. Ivashchenko, A.V. Strakhov, D.K. Timokhin

The results of the study of modified sodium silicate compositions by the method of translucent electron microscopy, where the zinc salt of acetic acid was used as a modifier, are presented. It is

shown that characteristic changes in micrographs may indicate the processes of $ZnSiO_3$ synthesis in the researched system. Based on the results of electron microscopic studies, supplementing the results of IR spectroscopic, X-ray phase and differential thermal analyzes of similar modified sodium silicate compositions, a scheme for the formation of $ZnSiO_3$ in the system under study is proposed.

Keywords: liquid sodium glass; silicate binders; zinc salt of acetic acid; water resistance; transmission electron microscopy

Перспективы применения силикатнатриевых связующих (СНС) для получения строительных материалов широкой номенклатуры с заданными свойствами обусловлены: наличием комплекса вяжущих свойств, адгезионных и когезионных составляющих; высокой химической активностью; способностью вспучиваться при воздействии повышенных температур; технологичностью и доступностью исходного сырья для их производства; комплексом свойств в изделиях – стойкостью к воздействию высоких температур, агрессивных сред (разбавленных и концентрированных кислот).

Анализ научно-технической литературы показал, что повышение водостойкости силикатнатриевых материалов достигается модифицированием СНС оксидами и гидроксидами поливалентных металлов [1-4]. Интерес представляет вариант процесса *in situ*, когда формирование MeO и $Me(OH)_2$ осуществлялось бы непосредственно в силикатнатриевой матрице. Обращают на себя внимание методы, которые используют при направленном синтезе высокодисперсных частиц металлов и их соединений в органических полимерных матрицах [5-9]. Такие методы основаны на использовании в качестве прекурсоров солей металлов (преимущественно нитратов, сульфатов, оксалатов и ацетатов), которые способны при щелочном гидролизе образовывать $Me(OH)_2$, а при термоллизе разлагаться до соответствующих MeO .

Выдвинута рабочая гипотеза, которая заключается в возможном образовании труднорастворимых комплексов через стадию термического разложения и щелочного гидролиза цинковой соли уксусной кислоты (ацетата цинка) в системе силикатнатриевого связующего.

Ранее экспериментально установлено, что модификатор – ацетат цинка (АЦ) – наиболее эффективно вводить в связующее в виде насыщенного водного раствора с концентрацией 20-28 %. Показано, что температурная обработка модифицированных образцов в области значений 440-450 °С приводит к более существенному повышению водостойкости (на 25-28 %), чем при низкотемпературном (110-180 °С) отверждении (на 20-23 %) [10-12].

С привлечением физико-химических методов анализа (РФА, ИКС, ДТА) изучен механизм взаимодействия водных растворов ацетата цинка и силиката натрия. В работе методом рентгенофазового анализа (РФА) показано, что в модифицированной системе на стадии низкотемпературного отверждения ($T=110-180$ °С) происходит образование труднорастворимого гидросиликата цинка $Zn_2SiO_4 \cdot H_2O$ и малорастворимой гидроокиси $\gamma-Zn(OH)_2$, что может быть результатом химического соосаждения при взаимодействии двух растворов. В свою очередь, ИК-спектроскопический анализ (ИКС) аналогичных модифицированных образцов достаточно хорошо согласуется с результатами РФА и свидетельствует о процессах поликонденсации SiO_4 -тетраэдров и о замене атомов Si в части кремнекислородных тетраэдров на атомы Zn. В работе с помощью РФА и дифференциально-термического (ДТА) анализов показано, что не гидролизованный АЦ и не вступившие в реакцию гидроксиды цинка способны подвергаться термоллизу в диапазоне температур 200-450 °С с образованием ZnO и дополнительно участвовать в процессах синтеза труднорастворимых комплексов в силикатнатриевой системе. На термограмме ДТА модифицированного образца обнаружен экзотермический эффект при температуре 440 °С, который может быть связан с образованием новой кристаллической фазы $ZnSiO_3$, идентифицируемой на дифрактограмме соответствующего образца [10-13].

С целью получения дополнительных сведений о структурно-химических изменениях модифицированного связующего применен метод просвечивающей электронной микроскопии аналогичных модифицированных образцов [13].

Объектом исследования являлись модифицированные силикатнатриевые композиции (СНК) на основе товарного жидкого натриевого стекла, соответствующего ГОСТ 13078-81 ($\rho=1480$ кг/м³; силикатный модуль $M=2,7$). В качестве модификатора использовали органическое цинксодержащее соединение – дигидрат ацетата цинка (ГОСТ 5823-78). В качестве отвердителя в составах применялся кремнефтористый натрий (ТУ 6-09-05807960-114-94).

Микроскопические исследования образцов проводились на просвечивающем электронном микроскопе Zeiss Libra 120 (Германия) на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием в области физико-химической биологии и нанобиотехнологии «Симбиоз» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов» Российской академии наук (г. Саратов). Образцы представляли собой тонкодисперсные порошки на основе модифицированной силикатнатриевой системы.

Микроснимки модифицированных образцов представлены на рис. 1–5.

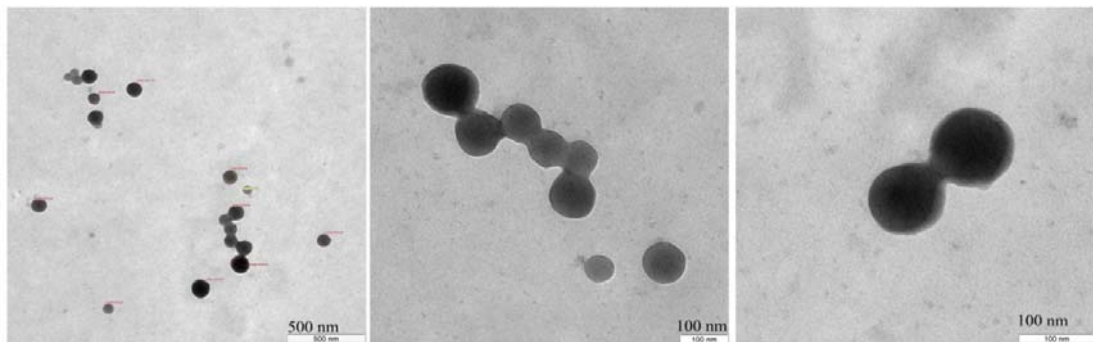


Рис. 1. Микроснимок образца №1 (СНС, КН-10 % по массе СНС), $T=110$ °С

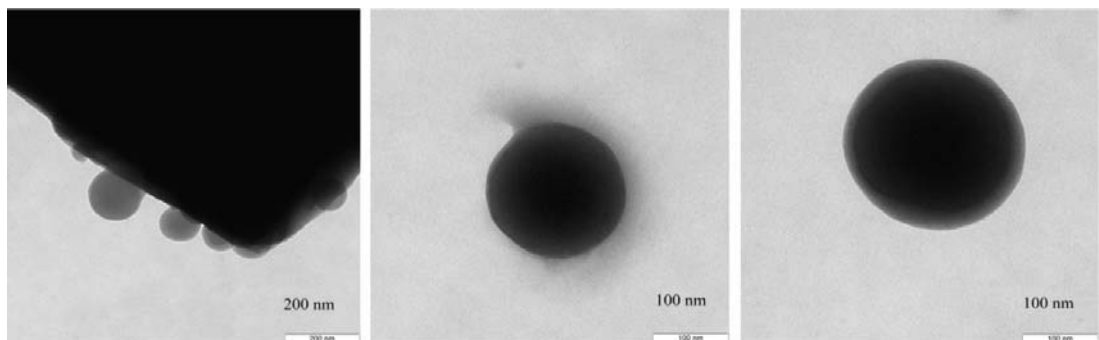


Рис. 2. Микроснимок образца №2 (СНС, 24 % водный раствор АЦ – 10 % по массе СНС), $T=110$ °С

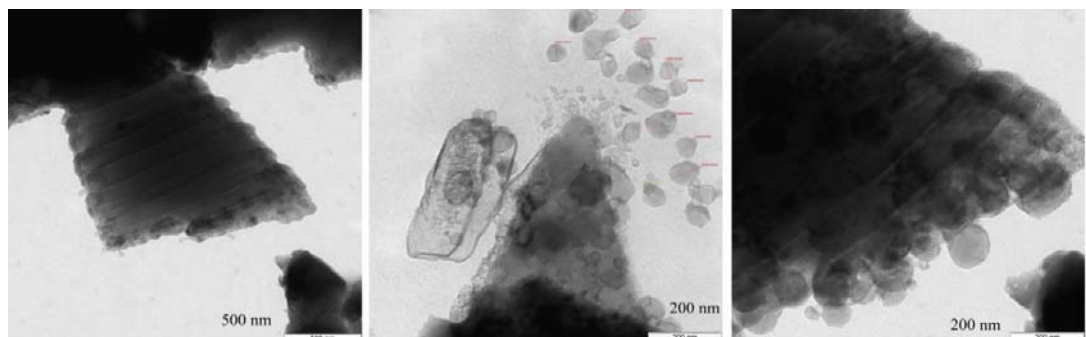


Рис. 3. Микроснимок образца №3 (СНС, КН – 10 % по массе СНС, 24 % водный раствор АЦ – 10 % по массе СНС), $T=110$ °С

На микрофотографиях образцов №1-3 (см. рис. 1-3) визуализируются частицы, которые представляют собой практически сферические монодисперсные глобулы и

относятся, очевидно, к гидратированному оксиду кремния $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. При этом размер частиц существенно зависит от состава композиций.

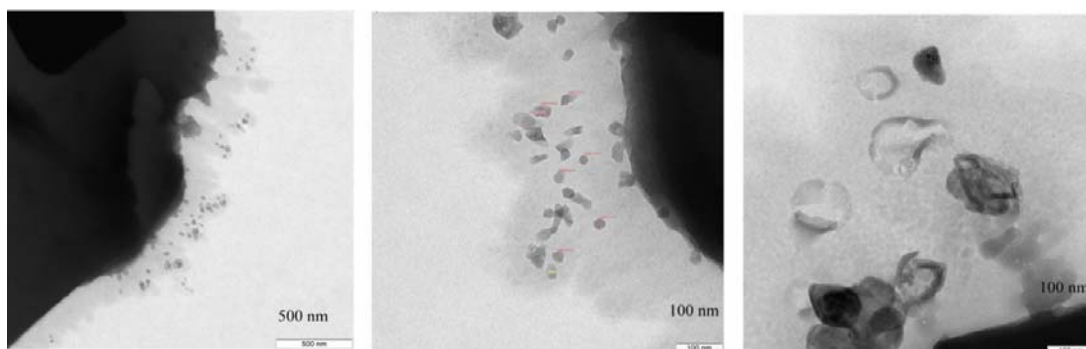


Рис. 4. Микроснимок образца №4 (СНС – 100 частей, 24 % водный раствор АЦ – 10 % по массе СНС), $T=250\text{ }^\circ\text{C}$

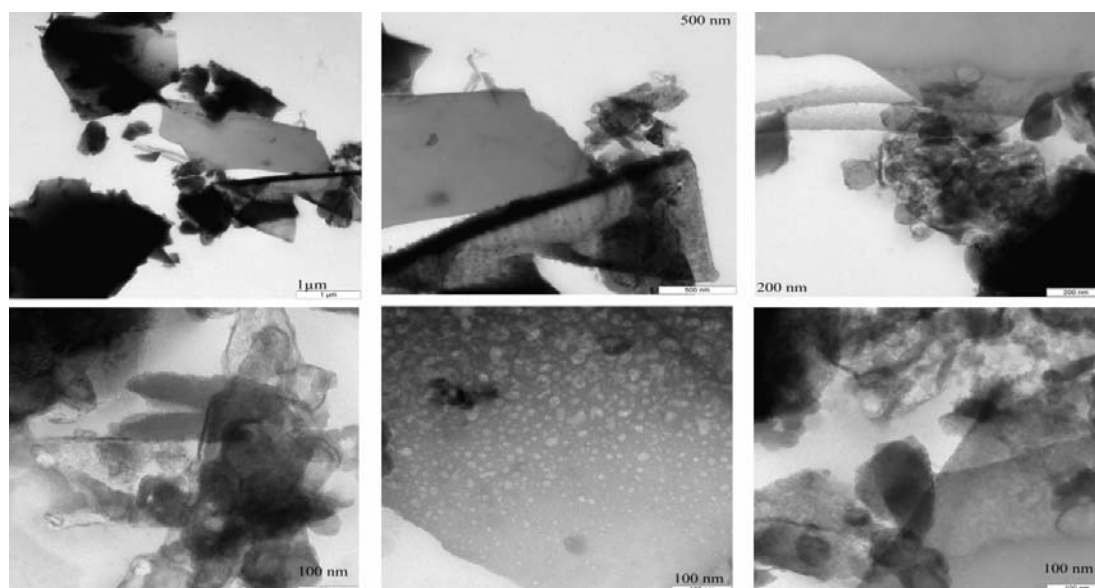
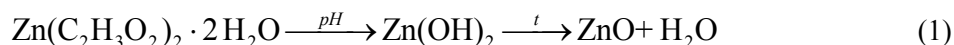
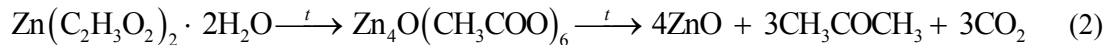


Рис. 5. Микроснимок образца №5 (СНС, КН – 10 % по массе СНС, 24 % водный раствор АЦ – 10 % по массе СНС), $T=450\text{ }^\circ\text{C}$

Также на снимках образцов №1-3 (см. рис. 1-3) можно выделить следующие особенности: образец №1 (см. рис. 1) – размер частиц находится в пределах 69-125 нм; визуализируются частицы изометрической формы, которые в работе относят к кубическому NaF ; образец №2 (см. рис. 2) – размер частиц находится в пределах 150-255 нм; сферические частицы имеют более правильную округлую форму; образец №3 (см. рис. 3) – размер частиц находится в пределах 51-87 нм; преобладают сферические частицы неправильной формы; также визуализируются частицы изометрической формы.

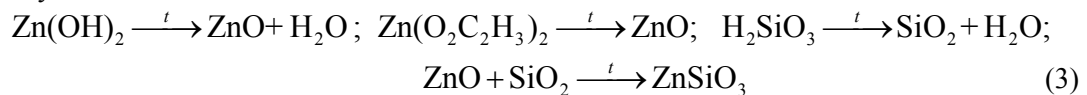
На микрофотографиях образца (см. рис. 4) на основе модифицированного СНС, подвергнутого тепловой обработке при $250\text{ }^\circ\text{C}$ (образец №4), в отличие от соответствующего образца, высушенного при $110\text{ }^\circ\text{C}$ (образец №3), присутствуют частицы, которые имеют неправильную форму, близкую к сферической, обладают более узким распределением по размерам от 22 до 32 нм и могут соответствовать окиси цинка, зафиксированной на дифрактограмме соответствующего образца. Кроме этого на микрофотографиях образца №4 аналогично образцу №3 фиксируются сферические частицы, которые имеют более правильную округлую форму с размером от 64 до 124 нм. Окись цинка может быть образована в исследуемой системе по следующим схемам:





Микроснимки образца (см. рис. 5) на основе модифицированного СНС с отвердителем, подвергнутого тепловой обработке при $T=450$ °С, принципиально отличаются от микроснимков предыдущих образцов. Следует отметить отсутствие сферических частиц с размером от 60 до 255 нм, наблюдается появление более крупных структурных образований (волокнистых и пластинчатых), что может указывать на процессы синтеза ZnSiO_3 в исследуемой системе.

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что образование метасиликата цинка ZnSiO_3 при нагреве модифицированных композиций до 450 °С осуществляется через стадию термического разложения $\text{Zn}(\text{O}_2\text{C}_2\text{H}_3)_2$ и $\text{Zn}(\text{OH})_2$ до ZnO по следующей схеме:



Следует отметить, что по справочным данным твердофазные реакции окиси цинка и кристаллической окиси кремния проходят под воздействием достаточно высоких температур ($T=900-1400$ °С). Для исследуемой системы аморфная структура SiO_2 определяет более высокую химическую активность. К тому же известно, что твердофазные реакции в значительной степени зависят от дисперсности исходных реагентов и могут протекать наиболее активно с уменьшением размера частиц.

Таким образом, установлено химическое взаимодействие в системе силикатнатриевое связующее – водный раствор ацетата цинка, подтверждаемое образованием трудно- и малорастворимых цинкосодержащих соединений, что является причиной повышения водостойкости. При этом процессы синтеза новообразований в исследуемой системе в первую очередь определяются соотношением и интенсивностью взаимодействия реагирующих компонентов, температурой нагрева. Установление взаимосвязи указанных факторов с физико-механическими, эксплуатационными свойствами, технологическими параметрами позволит осуществить конструирование и получение водостойких силикатнатриевых композиционных материалов с регулируемыми характеристиками.

Список литературы

1. Фиговский, О.Л. Жидкое стекло и водные растворы силикатов как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокomпозиционных материалов / О.Л. Фиговский, П.Г. Кудрявцев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448.
2. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin // Scientific Israel-Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14(1). – P. 7–12.
3. Малявский, Н.И. Новые способы модифицирования цинком щелочно-силикатных пеноматериалов / Н.И. Малявский, О.В. Душкин, Н.В. Великанова // Вестник МГСУ. – 2007. – №1. – С. 167–169.
4. Figovsky, O. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete / O. Figovsky, D. Beilin // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2009. – Vol. 3 (2). – P. 97–101.
5. Фиговский, О.Л. Нанокomпозитные органоминеральные гибридные материалы / О.Л. Фиговский, П.Г. Кудрявцев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476.
6. Айлер, Р. Химия кремнезема: в 2 ч. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982. – Ч. 1. – 416 с.
7. Вассерман, И.М. Химическое осаждение из растворов / И.М. Вассерман. – Л.: Химия, 1980. – 208 с.

8. Сидоров, В.И. Получение низкоосновных силикатов некоторых переходных металлов методом осаждения / В.И. Сидоров, Н.И. Малявский, Б.В. Покидько // Вестник МГСУ. – 2007. – №1. – С. 163–166.
9. Некрасов, Б.В. Основы общей химии: в 2 т. / Б.В. Некрасов. – Л.: Химия, 1973. – Т. 2. – 688 с.
10. Иващенко, Ю.Г. Роль цинкосодержащих модифицирующих добавок в формировании структуры силикатнатриевых композиционных материалов / Ю.Г. Иващенко, И.Л. Павлова, М.П. Кочергина // Инженерный вестник Дона (электронный журнал). – 2015. – №2, Ч.2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3012
11. Иващенко, Ю.Г. Структурообразование силикатнатриевого связующего, модифицированного водным раствором ацетата цинка / Ю.Г. Иващенко, И.Л. Павлова, М.П. Кочергина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: «Строительство и архитектура». – 2016. – Вып. 43(62). – С. 66–76.
12. Ivaschenko, Y. Structure formation and properties of thermochemically modified silicate-sodium compositions / Y. Ivaschenko, M. Kochergina, I. Pavlova // E3S Web of Conferences. – 2019. – 97. 7 (2019)
13. Кочергина, М.П. Структурообразование и свойства строительных композитов на основе силикатнатриевых связующих, модифицированных цинкосодержащими растворами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / М.П. Кочергина. – Пенза, 2017. – 213 с.

References

1. Figovsky, O.L. Liquid glass and aqueous solutions of silicates as a promising basis for technological processes for obtaining new nanocomposite materials / O.L. Figovsky, P.G. Kudryavtsev // Engineering Bulletin of the Don. – 2014. – №2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448.
2. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin // Scientific Israel-Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14(1). – P. 7–12.
3. Malyavsky, N.I. New ways of zinc modification of alkali-silicate foam materials / N.I. Malyavsky, O.V. Dushkin, N.V. Velikanova // Bulletin of MGSU. – 2007. – No. 1. – P. 167–169.
4. Figovsky, O. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete / O. Figovsky, D. Beilin // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2009. – Vol. 3 (2). – P. 97–101.
5. Figovsky, O.L. Nanocomposite organomineral hybrid materials / O.L. Figovsky, P.G. Kudryavtsev // Engineering Bulletin of the Don. – 2014. – №2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476.
6. Isler, R. Silica chemistry: in 2 parts / R. Isler. – M.: Mir, 1982. – Part 1. – 416 p.
7. Wasserman, I.M. Chemical precipitation from solutions / I.M. Wasserman. – L.: Chemistry, 1980. – 208 p.
8. Sidorov, V.I. Obtaining low-base silicates of some transition metals by precipitation method / Sidorov V.I., Malyavsky N.I., Ostavko B.V. // Bulletin of MGSU. – 2007. – No. 1. – P. 163–166.
9. Nekrasov, B.V. Fundamentals of general chemistry: in 2 vol. / B.V. Nekrasov. – L.: Chemistry, 1973. – Vol.2. – 688 p.
10. Ivashchenko, Yu.G. The role of zinc-containing modifying additives in the formation of the structure of silicate sodium composite materials / Yu.G. Ivashchenko, I.L. Pavlova, M.P. Kochergina // Engineering Bulletin of the Don (electronic journal). – 2015. – No.2, Part 2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3012
11. Ivashchenko, Yu.G. Structure formation of a silicate sodium binder modified with an aqueous solution of zinc acetate / Yu.G. Ivashchenko, I.L. Pavlova, M.P. Kochergina // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: "Construction and Architecture". – 2016. – Issue 43(62). – P. 66–76.

12. Ivaschenko, Y. Structure formation and properties of thermochemically modified silicate-sodium compositions / Y. Ivaschenko, M. Kochergina, I. Pavlova // E3S Web of Conferences. – 2019. – 97. 7 (2019).

13. Kochergina, M.P. Structure formation and properties of building composites based on silicate sodium binders modified with zinc-containing solutions: dis. ... Candidate of Sciences: 05.23.05 / M.P. Kochergina. – Penza, 2017. – 213 p.

Самарский государственный университет
путей сообщения

443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2Б

Баранов Александр Сергеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Железнодорожный путь
и строительство»
E-mail: a.baranov@samgups.ru

Samara State University of Railways

443066, Russia, Samara, Svoboda street, 2B

Baranov Aleksander Sergeevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Railway and Construction»
E-mail: a.baranov@samgups.ru

ПОИСК РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ГИПЕРПРЕССОВАННОГО БЕТОНА

А.С. Баранов

Рассмотрен недостаток производства изделий из бетона, уплотненного гиперпрессованием. Намечены рецептурно-технологические факторы, способствующие снижению эффекта распрессовки. Применен комплексный подход при решении вопроса снижения влияния деформации упругого последействия на физико-механические характеристики гиперпрессованного бетона и изделий из него. Предложена технологическая линия по производству тротуарной плитки из дисперсно-армированного гиперпрессованного бетона.

Ключевые слова: дисперсное армирование, упругое последействие, фибробетон, гиперпрессование, структурная прочность, прочность при сжатии, технологическая линия

SOLUTION OF THE PROBLEM OF MANUFACTURING PRODUCTS FROM HYPER-PRESSED CONCRETE

A.S. Baranov

The article discusses the lack products from concrete, compacted by hyperpressing. Recipe-technological factors that lower the effect of pressing out are outlined. An integrated approach has been applied to the study of the statistical characteristics of the aftereffect elasticity on physical and mechanical characteristics of hyperpressed concrete and products from it. A technological line for the production of paving slabs from dispersed-reinforced hyperpressed concrete is proposed.

Keywords: dispersed reinforcement, elastic aftereffect, fiber-reinforced concrete, hyperpressing, structural strength, compressive strength, production line

Введение. В рамках концепции устойчивого развития строительной отрасли проблема повышения прочности и долговечности изделий из бетона приобрела еще большую актуальность. Развитие новых технологий требует решения ряда инженерных и научных задач. К ним можно отнести как поиск новых способов повышения прочности и долговечности изделий из бетона, так и модернизацию существующих технологических приемов. Методика повышения физико-механических характеристик прежде всего зависит от назначения изделия и предъявляемых требований к ним. С этой целью применяются различные способы формования изделий, особенно применительно к мелкоштучным изделиям. В строительной практике можно выделить такие технологические приемы, как литевой способ формования и метод полусухого прессования.

Теоретический анализ. Литьевое формование – это самый простой способ, не требующий дополнительных машин и механизмов для формования смеси. Однако данный способ не позволяет получить изделие хорошего качества с высокими проч-

ностными и деформативными характеристиками. С помощью метода полусухого прессования, особенно при повышенных давлениях (гиперпрессование), можно изготовить изделие с качественными геометрическими и эксплуатационными показателями. Однако технология полусухого прессования имеет существенный недостаток. При повышении интенсивности прессования возникает так называемое «упругое последствие». Выпрессовка бетонной смеси и увеличение объема запрессованного бетона происходят при снятии прессующего давления, что говорит о нарушении структурной прочности [1]. В то же время увеличение расхода цемента для снижения водоцементного отношения сопровождается не только возможной потерей формы, но и снижением прочностных характеристик. Вопросу влияния упругого последствия на прочность бетона при длительном прессовании посвящены работы Г.В. Мурашкина, И.Е. Сеськина [2]. Однако вопросу технологических аспектов формирования прочности и долговечности бетона при кратковременном прессовании должного внимания не уделялось.

Очевидно, что снижение негативного воздействия после снятия прессующего давления способствует увеличению структурной (начальной) прочности гиперпрессованного бетона [3-7]. С целью повышения как начальной прочности, так и прочности гиперпрессованного бетона при сжатии и на растяжение представляется возможным применение дисперсного армирования [9-13].

Методика и материалы. Как известно, прессование позволяет получить более компактную упаковку структуры, удалить значительную часть несвязанной воды. Прочность бетона во многом предопределяется прочностью цементного камня. Для проведения экспериментальных исследований и моделирования технологии формирования бетона в изделиях применялись специальные образцы цилиндрической формы диаметром 5 см и высотой 7 см. В качестве вяжущего использовался рядовой цемент марки ЦЕМ II/A-K (Ш-II) 32.5 Б. При установлении зависимости между интенсивностью прессования и прочностью продолжительность прессования составила не более 15 с, интенсивностью до 24 МПа.

Для дисперсного армирования принят вариант армирования высокомодульными базальтовыми волокнами диаметром до 17 мкм и длиной до 18 мм с расходом 1,5 и 3 % от массы цемента.

Величина начального водоцементного отношения – 0,4. Для релаксации внутренних напряжений и повышения подвижности бетонной смеси использована полифункциональная добавка С-3 с расходом 0,5 и 1 % от массы вяжущего. С введением добавки в бетонную смесь расход воды затворения снижали на 10 % и 20 % соответственно. Выбор данной добавки обусловлен экономическими соображениями и широким ее распространением на строительном рынке.

Экспериментальная часть. По результатам экспериментальных исследований зависимости структурной прочности при сжатии гиперпрессованного цементного камня от интенсивности прессования и армирования высокомодульными волокнами видно, что применение базальтовых волокон способствует повышению прочности гиперпрессованного цементного камня на 100-280 %, в зависимости от интенсивности прессования. Структурная прочность неармированного гиперпрессованного цементного камня составила 1,34 МПа (рис. 1), а армированного – 4,36 МПа (рис. 2).

Прежде всего это объясняется повышением плотности гиперпрессованного фибробетона примерно на 2 % по сравнению с неармированным. Также это объясняется тем, что фибра является «подложкой», на границе которой ускоренными темпами образуются новые структуры. Протекание процесса кристаллизации происходит в более стесненных условиях. Новообразования на границе раздела фаз способствуют улучшению сцепления (рис. 3).

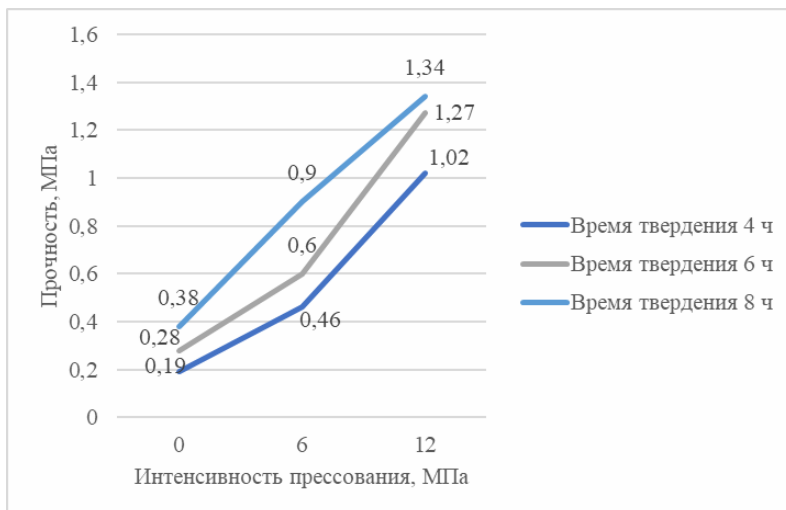


Рис. 1. Начальная прочность гиперпрессованного неармированного цементного камня

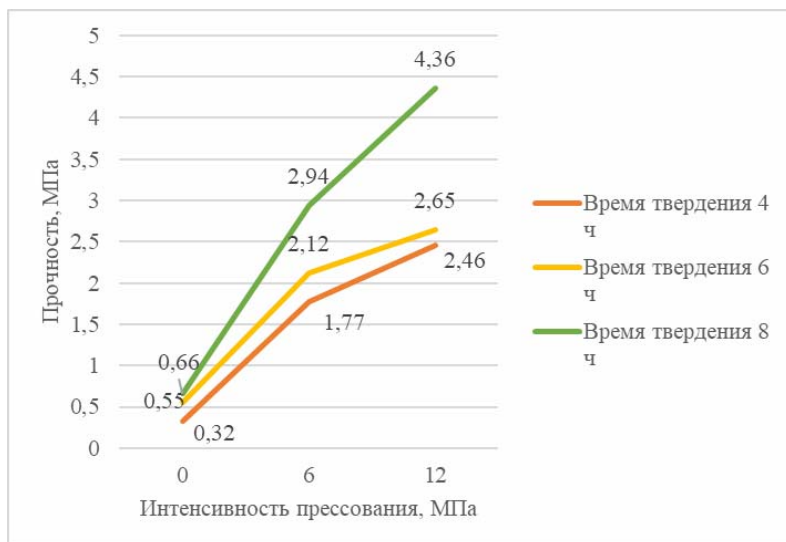


Рис. 2. Начальная прочность гиперпрессованного дисперсно-армированного цементного камня

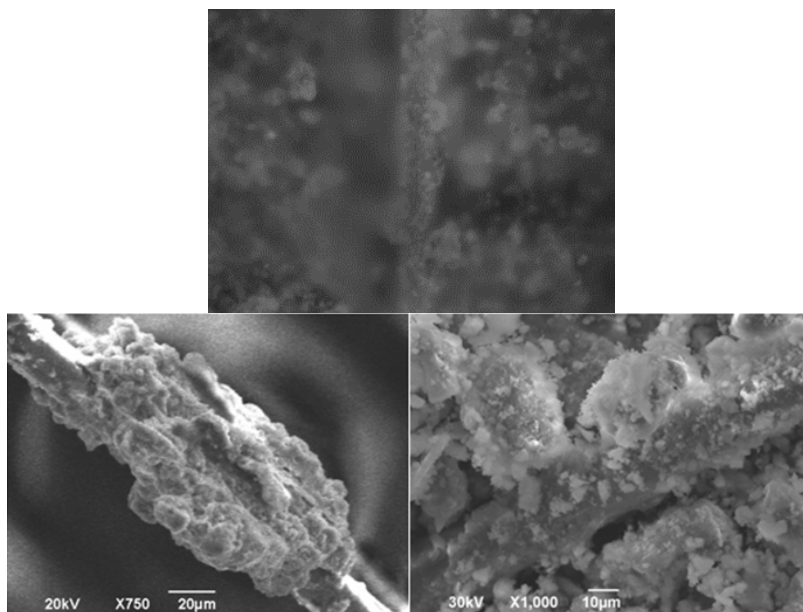


Рис. 3. Микроструктура дисперсно-армированного гиперпрессованного цементного камня

Введение фибры в бетонную матрицу имеет как ряд достоинств, так и один недостаток. Прежде всего данный недостаток связан с разрушением поверхности волокна при химическом взаимодействии растворной части и фибры [14]. Данный процесс имеет временный (затухающий) характер. Следует учитывать, что разрушение фибробетонов происходит в результате разрушения границы между волокном и цементной матрицей [15]. Таким образом, прочностные характеристики фибробетона предопределяются не свойствами бетонной матрицы, а механическими свойствами самой фибры.

Эффективность применения высокомодульных волокон не могла не отразиться на прочности бетона на растяжение (рис. 4).

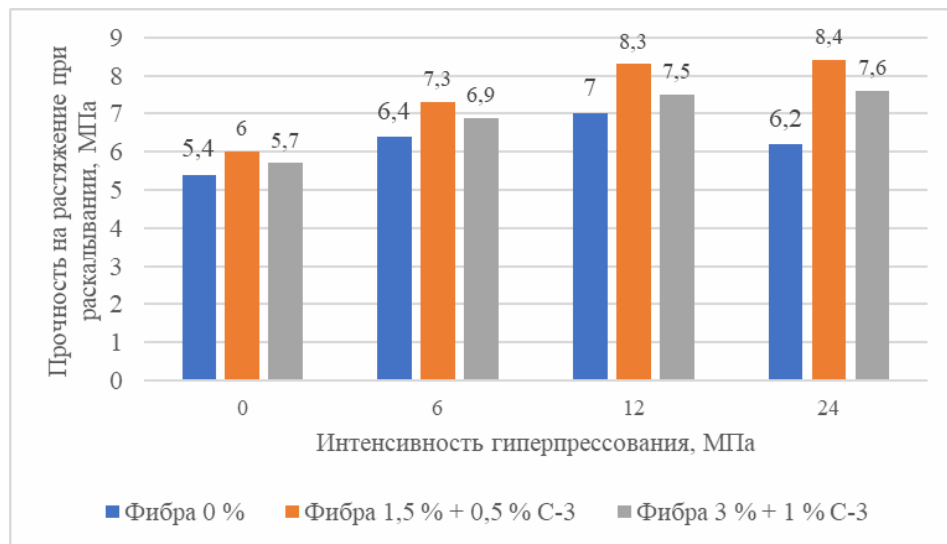


Рис. 4. Изменение прочности гиперпрессованного фибробетона на растяжение при раскалывании в зависимости от количества пластификатора и содержания армирующих волокон

Результаты экспериментальных исследований показали, что при прессовании бетонной смеси с интенсивностью, превышающей 12 МПа, происходит значительное снижение прочности бетона на растяжение. Эффект от прессования с интенсивностью в 24 МПа получается ниже, чем при интенсивности в 6 МПа [3], что, в свою очередь, говорит о разуплотнении структуры при прессовании с повышенными давлениями. С введением высокомодульных волокон снижения прочности гиперпрессованного бетона при интенсивности свыше 12 МПа не наблюдалось, что говорит о снижении деструктивных процессов структуры гиперпрессованных бетонов при их разуплотнении. Также уменьшению деформации упругого последствия способствует изменение рецептуры гиперпрессованного бетона при введении пластифицирующей добавки, способствующей перераспределению напряжений в растворе бетона. При увеличении давления гиперпрессования эффективность от применения базальтовых волокон значительно повышается. Использование базальтовой фибры в гиперпрессованных бетонах позволило увеличить их прочность на растяжение при раскалывании до 16 %. При расходе базальтовой фибры и добавки 1,5 % и 0,5 % соответственно наблюдался наибольший эффект от их совместной работы. При интенсивности прессования 24 МПа применение базальтовых волокон и пластифицирующей добавки позволило увеличить прочность гиперпрессованного бетона на 26 %.

Существующая методика определения прочности на растяжение при раскалывании образцов-цилиндров гиперпрессованного фибробетона является гораздо менее точной, чем при испытании образцов на растяжение при изгибе и тем более на осевое растяжение, которое в настоящее время является эталонным. Следовательно, реальное повышение прочности на растяжение при введении дисперсного армирования в бетонную смесь при воздействии повышенных давлений будет существенно больше

полученных значений. Так, при давлении гиперпрессования 12-24 МПа снижения прочности на растяжение не наблюдалось, по сравнению с неармированным гиперпрессованным бетоном. Рост прочности наблюдается и при интенсивности 24 МПа, что свидетельствует о снижении влияния деформации упругого последействия.

В подтверждение сказанному были проведены исследования величины деформации упругого последействия в зависимости от интенсивности прессования, содержания базальтовых волокон и расхода добавки (см. таблицу, рис. 5).

Величина деформации упругого последействия

Процентное содержание добавок, %	Опрессовочное давление, МПа	Величина деформаций, мм
Без добавок	0	-
	6	0,16±0,02
	12	0,31±0,01
	24	0,40±0,02
1,5 % базальтовой фибры + 0,5 % пластифицирующей добавки	0	-
	6	0,12±0,02
	12	0,25±0,01
	24	0,33±0,02
3 % базальтовой фибры + 1 % пластифицирующей добавки	0	-
	6	0,09±0,01
	12	0,2±0,02
	24	0,28±0,02

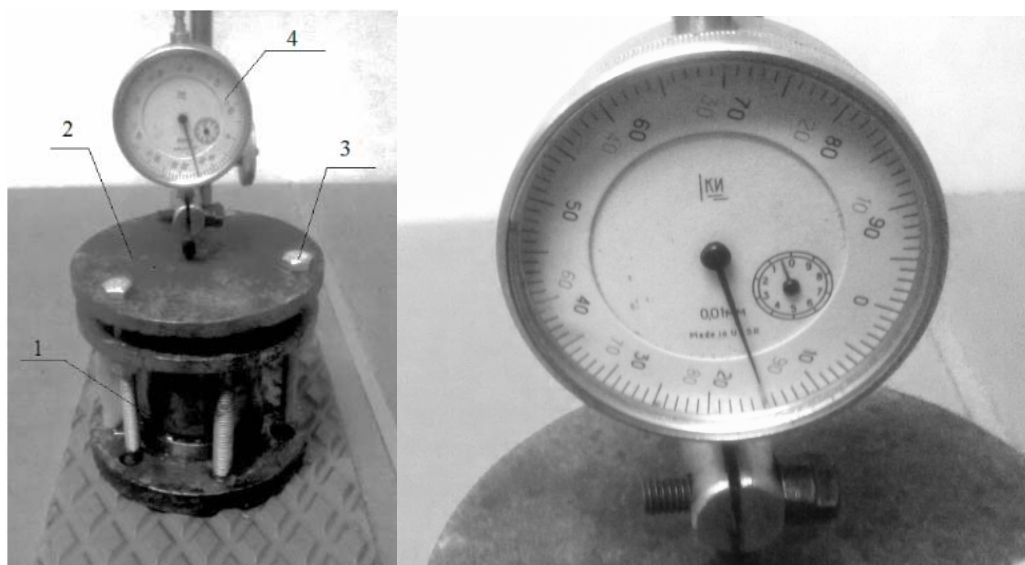


Рис. 5. Методика изучения величины деформации упругого последействия:
1 – цилиндрическая форма; 2 – крышка-поршень; 3 – фиксирующие тяги;
4 – индикатор часового типа

При снятии опрессовочного давления крышка-поршень закрепляется фиксирующими тягами. Жёсткое соединение позволяет сохранить давление прессования на бетонную смесь после снятия усилия с цилиндрической формы. Перемещения поршня при ослаблении фиксирующих тяг будут указывать на увеличение в объеме запрессованного бетона, а индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм, закрепленный на штативе, позволит измерить величину данной деформации [3].

Экспериментальными исследованиями установлено, что эффективное использование армирующих волокон и пластифицирующей добавки при интенсивности прессования в диапазоне от 6 до 24 МПа способствует снижению величины деформации распрессовки в гиперпрессованном бетоне до 44 %, что, в свою очередь,

способствует активному влиянию на формирование прочности гиперпрессованных бетонов.

По полученным результатам экспериментальных исследований была модернизирована типовая технологическая линия по производству мелкоштучных изделий (тротуарной плитки), представленная на рис. 6.

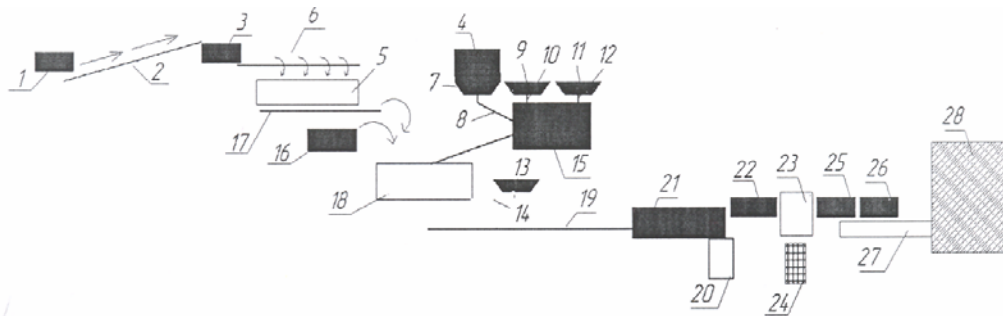


Рис. 6. Технологическая линия по производству мелкоштучных изделий из дисперсно-армированного гиперпрессованного бетона:

1 – приёмный бункер-питатель; 2 – наклонный транспортёр; 3 – вибросито; 4 – ёмкость под цемент; 5 – бункер-накопитель; 6 – раздаточный транспортёр; 7, 9, 11, 13 – бункер-дозатор цемента, добавки, песка, фибры; 8, 10, 12 – шнек подачи цемента, добавки, песка в барабан-смеситель; 14 – металлический стол; 15 – барабан; 16 – ёмкость-дозатор воды; 17 – транспортёр подачи заполнителя в бетоносмеситель; 18 – бетоносмеситель; 19 – транспортёр для подачи смеси в бункера гиперпресса; 20 – маслостанция; 21 – гиперпресс; 22 – укладчик-автомат; 23 – автомат-съёмник; 24 – возвратный ярус пустых металлических поддонов к гиперпрессу; 25 – укладчик; 26 – упаковщик-автомат; 27 – линия отправки на склад; 28 – склад

Крупный заполнитель доставляется в приёмный бункер-питатель и подается из него по системе нижнего и наклонного транспортеров. Транспортируемый крупный заполнитель попадает на вибросито, предназначенное для отсева крупного заполнителя фракцией более 5 мм. Просеянный крупный заполнитель попадает в бункер-накопитель, в котором осуществляются его хранение и дальнейшая подача в бетоносмеситель.

Остальные компоненты бетонной смеси подаются из бункеров-дозаторов (цемент, песок, пластифицирующая добавка, фибра) с весовым устройством УВТЭ на соответствующие шнеки. Базальтовая фибра поступает на металлический стол с бортами. Самая большая проблема в данной операции заключается в равномерном распределении фибры и предотвращении ее комкования. С этой целью рабочий вручную размельчает ее на металлическом столе и отправляет в бетоносмеситель. В этот момент цемент, песок, добавка попадают в барабан-смеситель для перемешивания компонентов до однородной массы и подачи её в бетоносмеситель.

В бетоносмеситель по транспортёрам поступают измельчённый крупный заполнитель и сухая смесь из барабана-смесителя. В бетоносмеситель из ёмкости-дозатора подаётся норма воды затворения. В бетоносмесителе происходит перемешивание всех компонентов смеси до однородной массы. Через днище корпуса производится выгрузка готовой бетонной смеси из бетоносмесителя.

Для более качественного перемешивания бетонной смеси и фибры предложено использовать двухвалый бетоносмеситель с горизонтальным расположением валов, с закреплёнными на них скребковыми лопастями-лопатками.

Бетонная смесь по наклонному и перекидному транспортеру доставляется в бункер гиперпресса, на котором производится двустороннее прессование с интенсивностью 24 МПа.

Перед отправкой на склад тротуарная плитка попадает на съёмник, автомат-укладчик и автомат-упаковщик.

Результаты. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Результатами экспериментальных исследований доказано увеличение начальной прочности гиперпрессованного бетона при армировании его базальтовыми волокнами на 100-280 % при различной интенсивности прессования. Такое увеличение объясняется ускоренными темпами образования новых структур на границе фибры.

2. Выявлено, что рост начальной прочности и повышение давления прессования приводят к снижению прочности на растяжение за счет проявления деформации упругого последействия. Совокупное применение дисперсного армирования и пластифицирующей добавки позволяет активно влиять на формирование прочности на растяжение и способствует снижению величины деформации распрессовки на 44 %, что подтверждает эффективность применения рецептурных приемов в технологии производства изделий из гиперпрессованного бетона.

3. Предложена модернизация технологической линии по производству мелкоштучных изделий из гиперпрессованного бетона. Экономический эффект достигается за счет более высоких эксплуатационных показателей изделия и высокой производительности технологической линии. Для более качественного и равномерного распределения фибры по объему в данной технологии обосновано применение двухвального бетоносмесителя с горизонтальным расположением валов, с закреплёнными на них скребковыми лопастями-лопатками.

Вопрос подачи и равномерного распределения фибры по объему в бетонной смеси до сих пор остается спорным. В результате чего и дальше планируется совершенствовать технологию производства изделий из гиперпрессованного бетона с целью получения изделий с высокими эксплуатационными показателями.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов. – М.: АСВ, 2006. – 368 с. – ISBN 5-93093-422-3. – EDN QNMNZZ.
2. Сеськин, И.Е. Технологические аспекты формирования прочности и деформативности прессованного бетона / И.Е. Сеськин // Бетон и железобетон. – 2008. – № 2. – С. 5–8. – EDN ISDKBJ.
3. Баранов, А.С. Прочность и долговечность мелкоштучных изделий из гиперпрессованного фибробетона / А.С. Баранов // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, № 3(28). – С. 46–49. – DOI 10.17673/Vestnik.2017.03.8. – EDN ZXOLPB.
4. Пухаренко, Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов / Ю.В. Пухаренко // Вестник гражданских инженеров. – 2004. – № 1. – С. 98–103. – EDN JZFFVJ.
5. Смирнова, О.М. Прочностные и деформационные свойства фибробетона с макрофиброй на основе полиолефинов / О.М. Смирнова, А.М. Харитонов // Строительные материалы. – 2018. – № 12. – С. 44–49. – DOI 10.31659/0585-430X-2018-766-12-44-48. – ЭДН ДЖЯМГИ.
6. Смирнова, О.М. Свойства тяжелого бетона дисперсно-армированного синтетическим микроволокном / О.М. Смирнова, Е.В. Андреева // Строительные материалы. – 2016. – № 11. – С. 17–20. – ЭДН ХБКБУТ.
7. Пустовгар, А.П. Эффективность использования дисперсного армирования бетонов и строительных растворов полипропиленовой и базальтовой фиброй / А.П. Пустовгар, А.Ю. Абрамова, Н.Е. Еремина // Технологии бетонов. – 2019. – № 7–8 (156–157). – С. 34–42. – ЭДН ЭЙФЕА.
8. Begich, Y.E. Fine-grained concrete with various types of fibers / Y.E. Begich, S.V. Klyuev, V.A. Jos, A.V. Cherkashin // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – Vol. 97, No. 5. – 9702. – P. 1–9.
9. Heravi, A.A. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) / A.A. Heravi, O. Smirnova, V. Mechtcherine // RILEM Bookseries. – 2018. – Vol. 15. – P. 266–274.

10. Smirnova, O.M. Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete / O.M. Smirnova, Y.A. Belentsov, A.M. Kharitonov // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. – 2019. – Vol. 6, No. 4. – P. 407–417.
11. Amran, M. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review / M. Amran, R. Fediuk, H.S. Abdelgader, G. Murali, T. Ozbakkaloglu, Y.H. Lee, Y.Y. Lee // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – Vol. 45. – 103638. – P. 1–34.
12. Kurlapov, D. Reinforcement of flexural members with basalt fiber mortar / D. Kurlapov, S. Klyuev, Y. Biryukov, N. Vatin, D. Biryukov, R. Fediuk, Y. Vasilev // *Fibers*. – 2021. – Vol. 9, No. 4. – 26. – P. 1–14.
13. Пухаренко, Ю.В. Анализ поведения фибробетона, армированного различными видами фибры, под нагрузкой / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному перспективному развитию архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук*. Т. 2. – М.: АСВ, 2022. – С. 358–363. – ЭДН МКУТУС.
14. Urkhanova, L.A. Reducing alkaline corrosion of basalt fiber in concrete / L.A. Urkhanova, S.A. Lkhasaranov, S.L. Buyantuev, R.S. Fediuk, A.V. Taskin // *Magazine of Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 91, No. 7. – P. 112–120.
15. Совершенствование метода определения величины сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков, М.П. Кострикин // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: сборник научных трудов РААСН: в 2 т. / Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН)*. Т. 2. – М.: АСВ, 2021. – С. 208–216. – EDN MBEDKO.

References

1. Bazhenov, Yu.M. Modified high-quality concretes / Yu.M. Bazhenov. – М.: DIA Publishing House, 2006. – 368 p. – ISBN 5-93093-422-3. – EDN QNMNZZ.
2. Seskin, I.E. Technological aspects of the formation of strength and deformability of pressed concrete / I.E. Seskin // *Concrete and reinforced concrete*. – 2008. – No. 2. – P. 5–8. – EDN ISDKBJ.
3. Baranov, A.S. Strength and durability of small-piece products from hyperpressed fiber-reinforced concrete / A.S. Baranov // *Urban planning and architecture*. – 2017. – Vol. 7, No. 3 (28). – P. 46–49. – DOI 10.17673/Vestnik.2017.03.8. – EDN ZXOLPB.
4. Pukhareno, Yu.V. Principles of structure formation and strength prediction of fiber-reinforced concrete / Yu.V. Pukhareno // *Bulletin of civil engineers*. – 2004. – No. 1. – P. 98–103. – EDN JZFZVJ.
5. Smirnova, O.M. Strength and deformation properties of fiber-reinforced concrete with macrofiber based on polyolefins / O.M. Smirnova, A.M. Kharitonov // *Building materials*. – 2018. – No. 12. – P. 44–49. – DOI 10.31659/0585-430X-2018-766-12-44-48. – EDN JYAMGI.
6. Smirnova, O.M. Properties of heavy concrete reinforced with synthetic microfiber / O.M. Smirnova, E.V. Andreeva // *Building materials*. – 2016. – No. 11. – P. 17–20. – EDN XBKBUT.
7. Pustovgar, A.P. Efficiency of using dispersed reinforcement of concretes and mortars with polypropylene and basalt fiber / A.P. Pustovgar, A.Yu. Abramova, N.E. Eremina // *Concrete technology*. – 2019. – No. 7–8 (156–157). – P. 34–42. — EDN EIFEA.
8. Begich, Y.E., Klyuev, S.V., Jos, V.A., and Cherkashin, A.V. (2020). «Fine-grained concrete with various types of fibers / Y.E. Begich, S.V. Klyuev, V.A. Jos, A.V. Cherkashin // *Magazine of Civil Engineering*. – 2020. – Vol. 97, No. 5. – 9702. – P. 1–9.

9. Heravi, A.A. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) / A.A. Heravi, O. Smirnova, V. Mechtcherine // RILEM Bookseries. – 2018. – Vol. 15. – P. 266–274.
10. Smirnova, O.M. Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete / O.M. Smirnova, Y.A. Belentsov, A.M. Kharitonov // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2019. – Vol. 6, No. 4. – P. 407–417.
11. Amran, M. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review / M. Amran, R. Fediuk, H.S. Abdelgader, G. Murali, T. Ozbakkaloglu, Y.H. Lee, Y.Y. Lee // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 45. – 103638. – P. 1–34.
12. Kurlapov, D. Reinforcement of flexural members with basalt fiber mortar / D. Kurlapov, S. Klyuev, Y. Biryukov, N. Vatin, D. Biryukov, R. Fediuk, Y. Vasilev // Fibers. – 2021. – Vol. 9, No. 4. – 26. – P. 1–14.
13. Pukharenko, Yu.V. Analysis of the behavior of fiber reinforced with common fiber under the influence / Yu.V. Pukharenko, D.A. Pantelev, M.I. Zhavoronkov // Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on the scientific perspective development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021: Collection of scientific papers of the RAASN / Russian Academy of Sciences Architecture and Construction Sciences. Vol. 2. – Moscow: DIA, 2022. – P. 358–363. – EDN MKUTUS.
14. Urkhanova, L.A. Reducing alkaline corrosion of basalt fiber in concrete / L.A. Urkhanova, S.A. Lkhasaranov, S.L. Buyantuev, R.S. Fediuk, A.V. Taskin // Magazine of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 91, No. 7. – P. 112–120.
15. Pukharenko, Yu.V. Improvement of the method for determining the adhesion value of reinforcing fibers with a matrix in fibrous concrete / Yu.V. Pukharenko, D.A. Pantelev, M.I. Zhavoronkov, M.P. Kostrikin // Fundamental, search and applied research of the RAASN on scientific support for development architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2020: Collection of scientific papers of the RAACS: in 2 vol. / Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAASN). Vol. 2. – M.: DIA Publishing House, 2021. – P. 208–216. – EDN MBEDKO.

УДК 69:519.7

DOI 10.54734/20722958_2023_4_21

Московский политехнический университет
Россия, 107023, г. Москва,
ул. Б.Семёновская, д. 38

Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Инфокогнитивные
технологии»
E-mail: bud-ea@yandex.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

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН
E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University

Russia, 107023, Moscow,
38, B.Semenovskaya St.

Budylna Eugenia Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor of the
Department «Infocognitive technologies»
E-mail: bud-ea@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

Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Danilov Aleksander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences
E-mail: fmatem@pguas.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ЭКСПЕРТИЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Приведена концепция проектирования сложных систем и показан пример ее реализации при синтезе строительных материалов с использованием классической теории управления, методов системного анализа в сочетании с экспериментальными эвристическими методами строительного материаловедения. Показано, что предлагаемая концепция может использоваться при проектировании и других сложных управляемых систем, в частности, она успешно использовалась при синтезе симуляторов из условий формирования у обучаемых требуемых навыков управления. Дан анализ современных методов управления качеством сложных систем. Указаны методы получения экспертных оценок и обработки результатов опроса и анализа полученных данных, а также установления степени достижения цели экспертизы. Приведены примеры оценки качества конкретных систем и отдельных задач построения экспериментальных моделей композитов. Рассмотрен трансфер указанных методов для оценки качества человеко-машинных систем.

Ключевые слова: сложные системы, идентификация, управление, оценка, экспертиза, композиционный материал

IDENTIFICATION AND INSPECTION OF COMPLEX SYSTEMS

E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

The concept of designing complex systems and its implementation in the synthesis of building materials using classical control theory, methods of system analysis in combination with experimental, heuristic methods of building materials science is presented. The proposed concept can be used in the design of other complex controlled systems, in particular, it has been successfully used in the synthesis of simulators from the conditions for the formation of the required control skills in trainees. The analysis of modern methods of quality management of complex systems is given. Methods for obtaining expert assessments and processing the results of a survey and analyzing the

data obtained, as well as establishing the degree of achievement of the purpose of the examination are indicated. Examples of assessing the quality of specific systems and individual problems of constructing experimental models of composites are given. The transfer of these methods for assessing the quality of man-machine systems is considered.

Keywords: complex systems, identification, control, assessment, expertise, composite material

Введение

При исследовании сложных систем использование детерминированного подхода (основанного на установлении с достаточной степенью достоверности причинно-следственных связей) малоэффективно. Необходима разработка других алгоритмов оптимизации параметров исследуемых систем, учитывающих специфические требования к ним. По-видимому, целесообразно использовать методики, аналогичные ПАТТЕРН и ее модификациям (особенно для прогнозирования того, как могут быть достигнуты сформулированные цели). Они основаны на разделении сложной проблемы на более мелкие, чтобы обеспечить разностороннюю количественную оценку экспертами каждой из частных проблем по различным критериям. Основные элементы в структуре исследований:

- выбор темы прогноза;
- выявление текущих внутренних и внешних закономерностей;
- подготовка сценария (например, развития);
- формулировка общей цели прогноза и задач ее достижения;
- анализ иерархии закономерностей с указанием относительной значимости (например, весовых констант, сумма которых равна единице) каждого уровня;
- опрос;
- математическая обработка данных анкеты;
- стандарт качества конструкции;
- проверка;
- разработка алгоритма распределения ресурсов;
- распределение ресурсов;
- оценка результатов распределения.

Все это позволяет:

- сформулировать внутреннюю структуру (дерево цели), включая принципы построения, функциональные подсистемы, научно-технические задачи и т.д.;
- определить внешнюю структуру (систему локальных критериев);
- разработать варианты ресурсного обеспечения элементов системы;
- определить перечень конечных целей, суммарный вес целей (показатели научно-технической значимости; сумма коэффициентов относительной значимости для каждого уровня иерархии принимается равной единице);
- на завершающем этапе обеспечить рациональное распределение ресурсов по уровню этих коэффициентов.

При таком системном подходе можно уменьшить или исключить неопределенность, свойственную решаемой задаче, и реконструировать ее в моделях, отвечающих задачам исследования; выявить объекты, свойства и связи изучаемой системы с учетом взаимного влияния внешней среды. Здесь можно использовать важнейшие принципы системного анализа. Процесс принятия решений должен начинаться с определения и четкой формулировки конечных целей и выделения критериев, по которым оценивается их достижение. Предполагается учет всех взаимосвязей каждого частного решения с анализом возможных альтернативных способов достижения целей. Естественно, цели подсистем не должны вступать в противоречие с целями всей системы. Центральной процедурой является создание моделей, отражающих все факторы и взаимосвязи реальной ситуации, которые могут проявиться в процессе решения. Основное преимущество такой методики заключается в возможности учета относительной важности, взаимной полезности, статуса и сроков разработки.

Моделирование структуры и свойств сложных систем. Концепция проектирования сложных систем и ее реализация при синтезе строительных материалов сводится к выполнению приведенных ниже основных процедур.

1. По экспериментальным данным на основе классификации наиболее распространенных видов кинетических процессов формирования физико-механических характеристик материалов специального назначения строится их обобщенная модель в классе обыкновенных дифференциальных уравнений. Каждый из рассматриваемых кинетических процессов (набор прочности, изменение модуля упругости, усадка, изменение внутренних напряжений, тепловыделение, химическая стойкость, водопоглощение и водостойкость и др.) – частный случай обобщенной модели при различных начальных условиях.

2. Предлагаются алгоритмы параметрической идентификации кинетических процессов.

3. Для оценки и управления качеством материала используются специально разработанные функционалы.

4. Аналогично 10-балльной шкале Купера – Харпера, применяемой в авиации и космонавтике при оценке пилотажных характеристик летательных аппаратов, для N -балльной шкалы определяются области равных оценок качества.

5. При изучении вопросов формирования структуры и свойств в композиционных строительных материалах широко используются модели, полученные для локальной области. Однако, как правило, полученные модели не используются для решения задач прогнозирования; не устанавливаются связи параметров моделей с рецептурно-технологическими параметрами (свойствами и структурой материала). Изолинии носят лишь иллюстративный характер (характеризуют фундаментальные процессы формирования структуры и свойств материала; качественные изменения особенно отчетливо проявляются в области скачкообразных изменений вида линий равного уровня, соответствующих, как правило, структурно-фазовым переходам). Дается алгоритм качественного анализа структуры и свойств материала в области структурно-фазовых переходов в приложении к разработке радиационно-защитных материалов нового поколения. Часто факторное пространство (x_1, x_2) – двумерное; модель параметра оптимизации – квадратичная; изолинии – гиперболического типа (частный случай – пара пересекающихся прямых).

6. Целостный системологический подход позволяет на основе междисциплинарных исследований и интеграции различных знаний (для изучения отдельных аспектов) комплексно и всесторонне изучить проблему, выделить приоритеты и оптимизировать основные параметры системы. Например, высший уровень иерархии – национальные интересы страны: территориальная целостность страны; независимость и свобода; благополучие ее граждан; обеспечение высокого качества жизни; защита жизни, собственности и конституционных прав. На втором уровне иерархии находятся целостные подсистемы: экономическая, политическая, социальная, духовная, международных отношений, экологии и др. При этом критерий качества подсистемы должен быть частью общего критерия качества системы, определяемого ее интегративными свойствами (организмический принцип).

7. В основе предлагаемых методологических принципов синтеза строительных материалов лежит представление их как систем с соответствующими системными атрибутами. В их числе: сложность объекта; целостность; интегративность; целостное свойство больше суммы свойств составных элементов; наличие двух и более совокупностей составных элементов, их взаимосвязей и отношений; наличие обмена информацией, энергией или веществом с другими системами или окружающей средой. Определяются парадоксы целостности и иерархичности в использовании системного мышления при синтезе строительных материалов. В соответствии с парадоксом целостности познание системы как целостности невозможно без анализа ее частей; целостное описание системы возможно лишь при «целостном» ее разбиении на части (описание данной системы как некоторой целостности). Возможны два способа декомпозиции:

– после разбиения системы получают элементы, которые не несут на себе целостные свойства исходной системы;

– «целостное» разбиение: выделяются части, сохраняющие в специфической форме целостные свойства системы.

Целостное разбиение системы возможно лишь при наличии целостно-нецелостного свойства системы. Подходы системного анализа и его развития (синергетический, информационный подходы), а также гомеостатический подход легко распространяются на изучение задач строительного материаловедения. При приближении интегративных параметров системы к предельно допустимым возникает системный кризис (система вступает в зону бифуркации). В соответствии с парадоксом иерархичности описание системы возможно только при наличии ее описания как элемента надсистемы (более широкой системы), и обратно, описание системы как элемента надсистемы возможно только при наличии описания данной системы. Каждая система входит в некоторую надсистему. Целостную систему нельзя разложить на отдельные компоненты без потери интегративных свойств, если изменение любого элемента системы ведет к изменению всей системы.

9. Основное внимание уделяется структурным исследованиям (строение, фазовый состав, связи, топология и др.) и функциональным (динамические характеристики, стойкость в эксплуатационной среде, экономическая эффективность и др.).

10. Определение условий для переноса результатов автономных исследований на систему в целом связано с полнотой понимания процессов формирования структуры и свойств системы. Использование эталонных моделей с децентрализацией модулей по входам не нова (Земляков С.Д.; синтез систем управления в авиации и космонавтике). Здесь же делается попытка распространения метода для решения задач строительного материаловедения. Традиционно используемые в строительном материаловедении данные о кинетических процессах формирования структуры и физико-механических характеристик материала по существу являются автономными исследованиями отдельных сепаратных модулей. При этом требуемые параметры кинетических процессов определяются с учетом межсистемных связей.

Современные методы экспертизы. Несмотря на отсутствие единых правил подготовки и проведения экспертизы, в ней можно выделить следующие основные этапы: формулировка цели экспертного анализа; формирование группы организаторов экспертизы; разработка процедур проведения экспертной оценки; подбор экспертов; получение экспертных оценок; обработка результатов опроса и анализ полученных данных; установление степени достижения цели экспертизы. Среди методов экспертных оценок основными являются индивидуальные (интервью и аналитическая экспертиза) и коллективные. В методе *интервью* оценку системы эксперт осуществляет в процессе беседы исследователя с экспертом (ответы на заранее подготовленные вопросы). При *аналитической экспертизе* результаты анализа оформляются в виде экспертного заключения. Для компенсации возможных ошибок эксперта и получения обобщенного коллективного мнения используются методы коллективной экспертизы. Они позволяют при оценке практически исключить влияние случайных факторов, связанных с недостаточной компетентностью и необъективностью отдельных специалистов. По характеру взаимодействия между экспертами различают методы открытой дискуссии (комиссий, суда, мозговой атаки) и опроса с помощью анкет (метод простого анкетирования экспертов и метод Дельфи), который не предполагает прямого обмена мнениями между членами экспертной группы. При **методе простого анкетирования** осуществляется одноразовый опрос экспертов с помощью анкет (обобщение результатов статистическими методами обработки данных; метод обладает большой разбросанностью ответов). В **методике SEER** предусматривается проведение двух туров опроса групп экспертов разного состава. В первом туре составляется перечень событий, определяется их приоритет, проводятся технико-экономические и вероятностные оценки; во втором проходит переоценка и пополнение банка данных, сформированного в первом туре, уточняются результаты экспертного заключения. В усовершенствованной разновидности метода используется системная концепция альтернатив – **картирование (иерархическая система, содержащая**

перечень распределенных по времени приемлемых альтернативных вариантов выбора).

При наличии в системе (процессе) нескольких структурных (иерархических) уровней используется **метод построения «дерева целей»**, где «корнем» дерева целей является генеральная цель. Дерево строится последовательным выделением все более мелких компонентов на постепенно понижающихся уровнях. На каждом из уровней каждая ветвь имеет, по крайней мере, два разветвления более низкого уровня (вершина – точка разветвления).

Аналогично, используя принципы системного анализа, можно построить и дерево альтернативных решений. Дерево становится нормативным, если указывается важность каждой задачи по отношению к другим. **В морфологическом методе Ф. Цвикки** проблема разбивается на составные части (на основе комбинации выделенных элементов или их признаков) с несколькими подходами к ее решению (методы систематического покрытия поля, отрицания и конструирования морфологического ящика). Все альтернативные пути и последовательности решения задач оформляются в виде блок-схемы (облегчает процесс поиска оптимальных путей). Если на схеме указываются и соответствующие коэффициенты относительной важности задач, то обнаруживается очевидная аналогия с методикой ПАТТЕРН-анализа. Дальнейшие исследования проводятся с помощью формализованных методов системного анализа на основе аналитической справки экспертной группы.

Особое место занимает формирование экспертных комиссий. Предполагается использование концепции и методов многовариантной коллективной экспертизы (список кандидатов в эксперты; выявление существенно различных точек зрения; классификация экспертов, а также групп неконфликтующих экспертов; оценка их условной компетенции и др.).

Эффективность использования приведенных методов многократно подтверждалась при разработке сложных систем (композиционные материалы, тренажеры и имитаторы и др.) [1...3], особенно на этапе когнитивного моделирования.

Многовариантная коллективная экспертиза. Для любой сложной организационной системы важным этапом при ее создании является идентификация основных ее составляющих – организационной структуры, процедур функционирования, методов стимулирования и т.д. При ретроспективной идентификации используются параметры реально сложившейся структуры, а не нормативной (в соответствии с уставом, штатным расписанием и т.д.). Сложная динамика и непрозрачность взаимоотношений в системе не позволяют эффективно использовать формальные методы моделирования и идентификации. Основными являются экспертная информация, в том числе методы коллективной многовариантной экспертизы [4, 5]. Наличие неопределенности (в основном структурного характера) затрудняет использование количественной информации классическими методами. Практически всегда имеется несколько различных, иногда прямо противоположных точек зрения. Каждая из точек зрения объективно может иметь свои достоинства и недостатки. Однако опыт показывает, совместная работа в одной комиссии экспертов, придерживающихся разных точек зрения, оказывается малопродуктивной. Нельзя сталкивать между собой экспертов, придерживающихся взаимоисключающих точек зрения, не имеющих возможности обсуждать спорные вопросы на равных. Комиссия должна состоять из экспертов приблизительно одинаковых взглядов и не имеющих конфликтных взаимоотношений. Возможно приглашение консалтинговой группы для многовариантной экспертизы со стороны.

Наиболее перспективной является методика формирования экспертных комиссий, состоящая из пяти этапов:

- формирование списка кандидатов в эксперты (например, стандартная схема типа «снежный ком»);
- выявление существенных точек зрения и классификация экспертов (экспертами указываются варианты, которые считаются целесообразными или более предпочтительными, если эксперты имеют совпадающие мнения по одним, несовпадающие – по

другим вопросам; выявление типовых точек зрения и классификация экспертов осуществляется методами многомерной автоматической классификации);

– выявление групп неконфликтующих экспертов (по специальной математической процедуре упорядочивания по степени неконфликтности);

– оценка условной компетенции экспертов (компетентность каждого эксперта оценивается только теми экспертами, с которыми он будет работать в одной комиссии);

– формирование экспертных комиссий (по специальной процедуре; возможно использование мнения дополнительных экспертных комиссий, состоящих из высококомпетентных экспертов, не включенных ни в одну из комиссий (по соображениям конфликтности), либо высокопоставленных представителей исследуемой организации (из соображений престижа)).

Работа экспертных комиссий обычно состоит из трех этапов:

– этап анализа (заочное обсуждение отдельных аспектов существующего положения в организации; ретроспективный анализ ее динамики, выявление узких мест);

– этап разработки предложений по совершенствованию систем управления (начиная от суммирования существенных недостатков до выбора вариантов предложений по их устранению);

– процедура перекрестной экспертизы для получения объективных характеристик предложений (итерация перекрестных экспертиз заканчивается, когда дополнительное обсуждение не дает изменений предварительного проекта).

Предложенная процедура многократно использовалась при разработке сложных систем различного назначения (имитаторы, материалы специального назначения) и показала свою эффективность [6, 7].

Качество систем. Обычно оценка качества материалов осуществляется на основании сведений о его свойствах (единичных показателях). Комплексный показатель представляется в виде линейной или квадратичной функции единичных

или частных критериев. В случае линейной функции $Y = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i$, $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ поиск

весовых коэффициентов α_i продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто

условие $|\alpha_i^{(h)} - \alpha_i^{(h-1)}| < \varepsilon$, $i = \overline{1, m}$ (ε – заданная малая величина). По этой методике по

данным таблицы определялись весовые коэффициенты для оценки качества эпоксидного композита.

Свойства	Эксперты					$\alpha_i^{(1)}$
	1	2	3	4	5	
Плотность	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1	0,2
Пористость	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3
Прочность	0,5	0,4	0,6	0,3	0,7	0,5

На первой итерации «степень доверия» ко всем экспертам принималась одинаковой ($k_i^{(0)} = 1$). На второй итерации весовые коэффициенты определялись с учётом

разнородности экспертов и их различной компетентности (коэффициенты $k_i^{(1)}$ отличаются друг от друга). Поэтому на второй итерации весовые коэффициенты определялись в виде

$$\alpha_i^{(r)} = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r k_j^{(1)} \alpha_{ij}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Для вычисления коэффициентов $k_j^{(1)}$ вводилась мера

$$\delta_j^{(1)} = \sum_{i=1}^m |\alpha_i^{(1)} - \alpha_{ij}|, \quad j = \overline{1, r}.$$

Принималось:

$$\begin{cases} k_j^{(1)} = \frac{\alpha}{1 + \delta_j^{(1)}}, j = \overline{1, r}; \\ \sum_{j=1}^r k_j^{(1)} = r. \end{cases}$$

При указанных условиях

$$k_j^{(1)} = \frac{r \prod_{\omega=1}^r (1 + \delta_{\omega}^{(1)})}{(1 + \delta_j^{(1)}) \sum_{\mu=1}^r \left[\prod_{\omega=1}^r (1 + \delta_{\omega}^{(1)}) \cdot \frac{1}{1 + \delta_{\mu}^{(1)}} \right]}, \quad i = \overline{1, r}$$

с учетом

$$\delta_j^{(1)} = \sum_{i=1}^3 |\alpha_i^{(1)} - \alpha_{ij}|, \quad j = \overline{1, r}$$

получили:

$$\delta_1^{(1)} = 0; \delta_2^{(1)} = 0,2; \delta_3^{(1)} = 0,2; \delta_4^{(1)} = 0,4; \delta_5^{(1)} = 0,4.$$

По значениям

$$\prod_{\omega=1}^r (1 + \delta_{\omega}^{(1)}) = 2,82, \quad \sum_{\mu=1}^r \left(\prod_{\omega=1}^r (1 + \delta_{\omega}^{(1)}) \cdot \frac{1}{1 + \delta_{\mu}^{(1)}} \right) = 11,55$$

были получены коэффициенты

$$k_1^{(1)} = 1,22; k_2^{(1)} = \frac{5 \cdot 2,82}{1 \cdot 11,55} = 1,22; k_3^{(1)} = k_4^{(1)} = 1,02; k_5^{(1)} = k_6^{(1)} = 0,87.$$

Далее определялись весовые коэффициенты

$$\alpha_i^{(2)} = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r k_j^{(1)} \alpha_{ij}; \quad \alpha_1^{(2)} = 0,2; \alpha_2^{(2)} = 0,3; \alpha_3^{(2)} = 0,5.$$

Комплексный показатель является линейной функцией единичных (частных) показателей (критериев):

$$Y = 0,2y_1 + 0,3y_2 + 0,5y_3.$$

Как видим, наиболее значимым показателем является прочность.

Если определение весовых коэффициентов осуществляется методом попарного сопоставления, то предполагается линейная зависимость комплексного от единичных показателей:

$$Y_i = \sum_{j=1}^m \alpha_i y_{ij}, \quad \sum_{j=1}^m \alpha_i = 1.$$

Комплексный показатель

$$Y_i = \sum_{j=1}^m \alpha_i^{(0)} y_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}$$

на первом этапе вычисляется по значениям весовых коэффициентов

$$\alpha_1^{(0)} = \alpha_2^{(0)} = \dots = \alpha_m^{(0)} = \frac{1}{m}.$$

Затем определяются коэффициенты корреляции оценок y_i с оценкой Y :

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i) (y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}}$$

и уточнённое значение весовых коэффициентов

$$\alpha_i^{(1)} = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^m \rho_i},$$

а по ним и уточнённое значение оценки

$$Y_j = \sum_{j=1}^m \alpha_i^{(1)} y_{ij}.$$

Итерационная процедура поиска α_i^ℓ повторяется до выполнения условия

$$|\alpha_i^{(\ell)} - \alpha_i^{(\ell-1)}| < \varepsilon.$$

Предложенная методика позволяет получить аналитическую зависимость обобщенного критерия качества по полиномиальным зависимостям частных критериев в факторном пространстве, полученным с использованием методов планирования эксперимента:

$$Y = Y(x_1, x_2, \dots, x_p) = Y(y_1(x_1, x_2, \dots, x_p), y_2(x_1, x_2, \dots, x_p), \dots, y_m(x_1, x_2, \dots, x_p)).$$

Достоинством метода является возможность произвольного выбора начальных значений весовых коэффициентов.

Выводы

Дан анализ современных методов управления качеством сложных систем.

Сформулированы цели экспертного анализа; определены группы организаторов экспертизы; приведена методика разработки процедур экспертной оценки и подбора экспертов; указаны методы получения экспертных оценок и обработки результатов опроса и анализа полученных данных, а также установления степени достижения цели экспертизы.

Определена процедура многовариантной коллективной экспертизы.

Даны примеры оценки качества конкретных систем и отдельных задач построения экспериментальных моделей композитов.

Рассмотрен трансфер указанных методов для оценки качества человеко-машинных систем.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 30–37.
2. Данилов, А.М. Итеративный теоретико-экспериментальный метод построения критериев качества многоцелевых систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина, Я.И. Сухов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 2 (23). – С. 120–124.
3. Будылина, Е.А. Основы качественной и количественной оценки качества сложных систем иерархической структуры / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 77–85.
4. Дорофеюк, А.А. Методология экспертно-классификационного анализа в задачах управления и обработки сложноорганизованных данных (история и перспективы развития) / А.А. Дорофеюк // Проблемы управления. – 2009. – №3.1. – С. 19–28.
5. Дорофеюк, А.А. Процедуры коллективной многовариантной экспертизы в задачах анализа и совершенствования социально-экономических систем / А.А. Дорофеюк, М.Д. Гольдовская, Н.Е. Киселева, И.В. Покровская, А.Г. Спири, А.Л. Чернявский // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2016 – Вып. 4. – С. 53–68.
6. Гарькина, И.А. Проблема многокритериальности при управлении качеством сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 2 (41). – С. 123–129.

7. Бudyлина, Е.А. Аналитико-синтетический подход к разработке материалов / Е.А. Бudyлина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1 (54). – С. 46–51.

References

1. Garkina, I.A. Cognitive modeling in the synthesis of composite materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – №. 3–4 (603–604). – P. 30–37.
2. Danilov, A.M. An iterative theoretical-experimental method for constructing quality criteria for multi-purpose systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina, Ya.I. Sukhov // Regional architecture and engineering. – 2015. – №. 2 (23). – P. 120–124.
3. Budylina, E.A. Fundamentals of qualitative and quantitative assessment of the quality of complex systems of hierarchical structure / E.A. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 1 (46). – P. 77–85.
4. Dorofeyuk, A.A. Methodology of expert-classification analysis in the problems of control and processing of complex data (history and development prospects) / A.A. Dorofeyuk // Problems of management. – 2009. – № 3.1. – P. 19–28.
5. Dorofeyuk, A.A. Procedures for collective multivariate expertise in the problems of analysis and improvement of socio-economic systems / A.A. Dorofeyuk, M.D. Goldovskaya, N.E. Kiseleva, I.V. Pokrovskaya, A.G. Spiro, A.L. Chernyavsky // Information technologies and computing systems. – 2016. – Iss. 4. – P. 53–68.
6. Garkina, I.A. The problem of multi-criteria in the quality management of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // World of Transport and Technological Machines. – 2013. – №2 (41). – P. 123–129.
7. Budylina, E.A. Analytical-synthetic approach to the development of materials / E.A. Budylina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – №1 (54). – P. 46–51.

УДК 691.32

DOI 10.54734/20722958_2023_4_30

*Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова*

Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46,
тел.: (4722) 54-90-41; факс: (4722) 30-99-91

Хмара Наталья Олеговна,
младший научный сотрудник НИИ
«Наносистемы в строительном
материаловедении»
E-mail: nataly26071992@mail.ru

Огурцова Юлия Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Материаловедение
и технология материалов»
E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru

Строкова Валерия Валерьевна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Материаловедение
и технология материалов»
E-mail: vvstrokova@gmail.com

Нелюбова Виктория Викторовна,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Материаловедение и технология
материалов»
E-mail: nelubova@list.ru

Духанина Ульяна Николаевна,
младший научный сотрудник
НИИ «Наносистемы в строительном
материаловедении»
E-mail: duhanina777@yandex.ru

*Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,
tel.: (4722) 54-90-41; fax: (4722) 30-99-91

Khmara Natalia Olegovna,
Junior Researcher of the Research Institute
«Nanosystems in Building Materials Science»
E-mail: nataly26071992@mail.ru

Ogurtsova Yulia Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Assistant Professor of
the Department «Materials Science and
Technology»
E-mail: ogurtsova.y@yandex.ru

Strokova Valeria Valerievna,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Materials Science and
Technology»
E-mail: vvstrokova@gmail.com

Nelyubova Viktoriya Viktorovna,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department «Materials
Science and Technology»
E-mail: nelubova@list.ru

Duhanina Ulyana Nikolaevna,
Junior Researcher of the Research Institute
«Nanosystems in Building Materials Science»
E-mail: duhanina777@yandex.ru

*Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.
Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

ПОКАЗАТЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ДОБАВКОЙ ВСПУЧЕННОГО ПЕРЛИТОВОГО ПЕСКА

Н.О. Хмара, Ю.Н. Огурцова, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова, У.Н. Духанина

Рассмотрен вопрос стойкости к биологической агрессии белого портландцемента с добавкой вспученного перлитового песка, который предлагается к использованию в бетонах для малых архитектурных форм. Для оценки показателей биологического сопротивления цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка использовали два подхода: проводили экспозицию образцов цементного камня в модельной среде (смеси органических кислот), имитирующей продукты метаболизма микроорганизмов, с последующим контролем прочности; осуществляли заражение образцов суспензией спор гриба *Aspergillus niger* и наблюдали его развитие. После месяца выдерживания в модельной среде коэффициент биостойкости составил 0,80 для чистого цементного камня и 0,65 для цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка. При продолжении экспозиции образцов в модельной среде до шести месяцев: у контрольного цементного камня дальнейшего падения средней прочности на сжатие не

происходит, у образцов со вспученным перлитовым песком отмечается рост средней прочности на сжатие. Рентгеноаморфная составляющая вспученного перлита, являясь пуццолановоактивным компонентом, обеспечивает связывание свободного гидроксида кальция с образованием гидросиликатов кальция второй генерации, что и приводит к росту прочности цементной матрицы. По результатам оценки интенсивности роста гриба *Aspergillus niger* на поверхности материала цементный камень из белого портланд-цемента с добавкой вспученного перлитового песка проявил грибостойкость: под микроскопом прорастание спор и конидий не обнаружено. Полученные результаты позволяют рекомендовать исследованные материалы для изготовления малых архитектурных форм, для которых важными показателями качества являются высокие эксплуатационные и эстетические характеристики.

Ключевые слова: малые архитектурные формы, белый портландцемент, вспученный перлитовый песок, мицелиальные грибы, модельная среда, прочность на сжатие, *Aspergillus niger*, грибостойкость

INDICATORS OF BIOLOGICAL RESISTANCE OF CEMENT STONE WITH THE ADDITION OF EXPANDED PERLITE SAND

N.O. Khmara, Y.N. Ogurtsova, V.V. Strokova, V.V. Nelyubova, U.N. Duhanina

The paper considers the issue of resistance to biological aggression of white Portland cement with the addition of expanded perlite sand, which is proposed for use in concrete for small architectural forms. To assess the biological resistance of cement stone with the addition of expanded perlite sand, two approaches were used: cement stone samples were exposed in a model medium (a mixture of organic acids) simulating the products of microbial metabolism with subsequent strength control; the samples were infected with a suspension of *Aspergillus niger* fungus spores and its development was observed. After a month of exposure in the model environment, the biostability coefficient was 0.80 for pure cement stone and 0.65 for cement stone with the addition of expanded perlite sand. With the continuation of the exposure of samples in the model medium for up to six months: the control cement stone does not have a further drop in the average compressive strength, the samples with expanded perlite sand show an increase in the average compressive strength. The X-ray amorphous component of the expanded perlite, being a pozzolanoactive component, provides binding of free calcium hydroxide with the formation of calcium hydrosilicates of the second generation, which leads to an increase in the strength of the cement matrix. According to the results of the assessment of the intensity of growth of the fungus *Aspergillus niger* on the surface of the material, the cement stone made of white Portland cement with the addition of expanded perlite sand showed resistance to fungi: no germination of spores and conidia was detected under the microscope. The results obtained allow to recommend the studied materials for the manufacture of small architectural forms, for which high operational and aesthetic characteristics are important quality indicators.

Keywords: small architectural forms, white Portland cement, expanded perlite sand, mycelial fungi, model medium, compressive strength, *Aspergillus niger*, resistance to fungi

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень урбанизации и стремительное развитие инфраструктуры городов сформировали агрессивную гомогенную среду для человека, разделив город и живую природу. Пространство, окружающее городского жителя, перенасыщено однообразными элементами, полями информации. Большие плоскости, прямые углы и линии, отсутствие природного ландшафта ухудшают визуальную среду, влияют на процесс зрительного восприятия и негативно воздействуют на состояние человека [1–3].

В свою очередь, комфортное восприятие видимой среды определяется разнообразием цветовой гаммы, разряжением элементов фасада сооружений и правильным наполнением среды, обилием деталей и малых архитектурных форм [1]. Малые архитектурные формы (МАФ) – это сооружения либо изделия, предназначенные для архитектурно-планировочной организации объектов ландшафтной архитектуры, создания комфортной среды жизнедеятельности человека, ландшафтно-эстетического обогащения территории в целом. МАФ дополняют дизайн ландшафта, помогают создать определенный стиль и подчеркнуть индивидуальность городской застройки, гармонично сочетая удобство и оригинальность, добавляют эстетическую привлекательность окружающему пространству [3].

МАФ играют важную роль в формировании психологического состояния человека при визуальном и функциональном восприятии окружающей среды, они практически постоянно попадают в поле зрения, создают и дополняют архитектурный ансамбль, а значит, должны соответствовать ряду высоких требований: уровень качества материала, отвечающий современному состоянию материаловедения, художественное и дизайнерское оформление, эстетичность цвета и формы, но при этом ненавязчивость, функциональное удобство, экологичность и долговечность [1, 2]. Специфические условия эксплуатации МАФ, а именно непрерывное нахождение на открытом воздухе под воздействием атмосферных явлений в виде кислотных осадков, перепадов температуры, биологической агрессии, вибраций от проезжающих автомобилей, оказывают негативное влияние на внешний вид изделий и снижают их долговечность. В связи с этим бетоны для декоративных элементов должны иметь достаточный уровень прочности, коррозионной и морозостойкости, что обеспечит сохранение декоративности и функциональности МАФ, в том числе их целостность, отсутствие сколов, трещин, сохранение яркости цвета [3].

Повышение объемов и темпов строительного производства сопровождается увеличением количества промышленных выбросов и накоплением отходов. Это, в свою очередь, провоцирует нарушение экологического равновесия экосистем и выводит угрозу биологической коррозии на новый уровень. Одними из наиболее опасных микроорганизмов для бетонных изделий являются мицелиальные грибы [4, 5]. Воздействие процессов и продуктов их жизнедеятельности на состав и структуру строительного материала приводит к нарушению его целостности, снижению срока эксплуатации и, что наиболее важно для МАФ, ухудшает эстетические свойства изделия.

В связи с вышеописанным исследованием в данном направлении необходимы для расширения производства и применения бетонных МАФ как важной составляющей современной архитектурной среды и повышения их долговечности, в том числе эстетической.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящий момент накоплен существенный опыт исследования причин и последствий биологической коррозии строительных материалов. Анализ стойкости органических и минеральных вяжущих к воздействию различных микроорганизмов и их влияния на эксплуатационные характеристики уже готовых изделий различного назначения является актуальным направлением для исследований [4–12].

Биоповреждения цементных материалов, сопровождающиеся изменением состава и структуры, во многом связаны с химическими реакциями продуцируемых микроорганизмами кислот с компонентами цементной системы, что приводит к связыванию извести и снижению pH поровой жидкости, кристаллизации солей [4, 5]. Механизм коррозии бетона под воздействием микроорганизмов объединяет в себе I и II виды коррозии (по Москвину), поскольку на начальном этапе происходит выщелачивание кальция под воздействием воды, затем в связи с размножением микроорганизмов на поверхности бетона и накоплением продуктов их жизнедеятельности протекает кислотная коррозия, а образование в порах бетона карбоната кальция приводит к закупориванию пор и увеличению внутреннего напряжения [5].

В качестве основного метода исследования стойкости строительных материалов к воздействию микроорганизмов используют моделирование биоагрессии на материал, в ходе которого контролируют: рост микроорганизмов, изменение pH модельного раствора, изменение массы и прочности исследуемых образцов, их химического и фазового состава, микроструктуры [4–7].

Для повышения биологической стойкости путём объемного модифицирования композитов предлагается [4, 8–12]:

- увеличение плотности матрицы материала за счет, например, подбора оптимального зернового состава заполнителей, использования активных минеральных добавок (диатомит, микрокремнезем, зола-унос);
- введение биоцидов различной природы в состав сырьевой смеси.

Анализ отечественных и зарубежных источников показал актуальность исследования строительных материалов, в частности бетона, на стойкость к биологической коррозии. Большинство исследований затрагивают бетоны, бетонные смеси, композиционные вяжущие на основе серого портландцемента, гипса, извести. Вопросы стойкости к биологическим агентам материалов и изделий на основе белого портландцемента в литературе освещены недостаточно. Поэтому в контексте разработки бетонов на основе белого портландцемента для МАФ, одной из главных характеристик которых должна быть эстетическая выразительность, вопрос изучения и повышения биологической стойкости является крайне актуальным. И тем более, когда состав модифицируется минеральными добавками, которые могут оказать как положительное, так и отрицательное влияние на показатели биологического сопротивления материала.

На предмет стойкости к биоагрессии нами исследован цементный камень с добавлением вспученного перлитового песка. При его добавлении становится возможным обеспечить белый цвет МАФ на основе белого цемента при одновременном использовании химической активности данной минеральной добавки в цементной системе. Ранее было показано, что замена 10 % белого портландцемента на активированный вспученный перлитовый песок обеспечивает сохранение физико-механических характеристик цементного камня [13]. Однако при замене части цемента на пуццолановую добавку снижается щелочность жидкой фазы цементного камня, что повышает уязвимость последнего к биологической агрессии. В связи с этим необходимым является контроль показателей биологического сопротивления модифицированного цементного камня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки показателей биологического сопротивления цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка использовали следующие материалы: белый портландцемент СЕМ I 52,5 R производства CIMSA (Турция), соответствующий требованиям EN 197-1:2011; вспученный перлитовый песок ОАО «Осколснаб» (Белгородская область, РФ); пластификатор на полиэфиркарбоксилатной основе MELFLUX 1641 F производства BASF (Германия).

Минеральный состав вспученного перлитового песка представлен более чем на 80 % рентгеноаморфной фазой алюмосиликатного состава, идентифицируются кварц, полевой шпат, кристобалит [13]. Вспученный перлитовый песок предварительно активировали в планетарной мельнице для повышения его физико-химической активности и до достижения гранулометрического состава, близкого к используемому портландцементу. Гранулометрический состав используемого вспученного перлитового песка представлен на рис. 1.

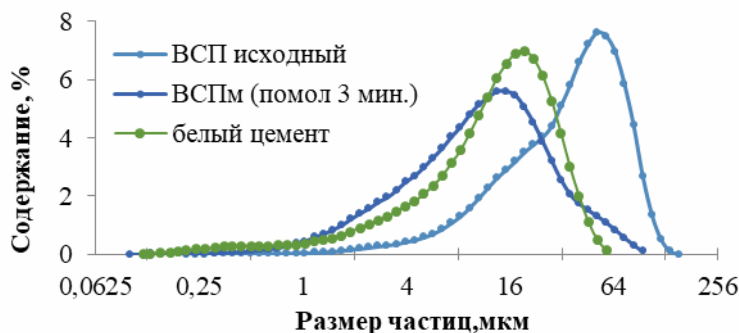


Рис. 1. Гранулометрический состав белого портландцемента и вспученного перлитового песка (ВСП) [13]

Для получения образцов цементного камня активированный вспученный перлитовый песок смешивали в сухом состоянии с белым портландцементом в соотношении 1:9.

В качестве контрольного готовили цементный камень из белого портландцемента. Содержание пластификатора составляло 0,3 % от массы цемента, В/Т=0,4.

Для оценки показателей биологического сопротивления цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка использовали два подхода:

1) экспозиция образцов в модельной среде (смеси органических кислот), имитирующей продукты метаболизма микроорганизмов, по методике испытания строительных материалов на биостойкость [6];

2) заражение образцов суспензией спор грибов согласно методам лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов [14, 15].

1. Экспозиция образцов в модельной среде (смеси органических кислот)

После твердения в течение 28 суток во влажных условиях образцы цементного камня размером 2×2×2 см погружали в модельный раствор следующего состава: уксусная кислота (концентрация 1 %) – 35 %, щавелевая кислота (концентрация 0,1 %) – 49 %, лимонная кислота (концентрация 1 %) – 16 % [6]. Образцы экспонировались в модельном растворе в течение 6 месяцев. Каждый месяц модельный раствор обновляли и часть каждой серии образцов извлекали для определения прочности на сжатие с использованием гидравлического пресса ПГМ-100. Коэффициент биостойкости определяли по формуле: $K=R_t/R_0$, где R_t – средняя прочность образцов, экспонированных один месяц в модельной среде, МПа, R_0 – средняя прочность образцов до испытаний на биостойкость, МПа [10]. Анализ микроструктурных изменений образцов цементного камня проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

2. Заражение образцов суспензией спор грибов

После твердения в течение 28 суток во влажных условиях половина образцов от каждой партии была подвергнута принудительной карбонизации: выдерживание образцов в среде углекислого газа обеспечивает снижение щелочности цементной системы, которая наблюдается на ранних стадиях твердения и может препятствовать росту микроорганизмов в процессе исследования. Принудительная карбонизация моделирует длительную эксплуатацию изделия на открытом воздухе и позволяет оценить стойкость материала к воздействию плесневых грибов в условиях, приближенных к реальным.

Оценка стойкости образцов к воздействию плесневых грибов производилась в соответствии с методом 4 ГОСТ 9.048–89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов» [14]. Фунгицидные и фунгистатические свойства образцов оценивали в соответствии с методом 3 ГОСТ 9.049–91 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов» [15]. Для оценки стойкости цементного камня к воздействию плесневых грибов применялся грибок вида *Aspergillus niger*, который обладает среди ряда исследуемых мицелиальных грибов наиболее агрессивным воздействием с высокой степенью деградационного эффекта.

В соответствии с методом 4 ГОСТ 9.048–89 [14] была приготовлена суспензия спор гриба *Aspergillus niger* и питательная среда Чапека – Докса. Питательная среда в количестве по 15 мл помещалась в чашки Петри. После ее застывания в каждую чашку Петри помещали по одному образцу цементного камня размером 1×1×3 см и обрабатывали спорами гриба из пульверизатора. Чашки Петри закрывали крышкой с плотным прилеганием на 28 суток. Чашки находились в термостате при постоянной температуре 29±2 °С и относительной влажности 90 %.

Оценку степени обрастаемости поверхности образцов тест-культурой проводили как невооруженным глазом, так и с использованием микробиологического микроскопа АХЮ SCOPE А1 по шкале от 0 до 5 баллов, критерии которой приведены в ГОСТ 9.048–89 [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты экспозиции образцов в модельной среде (смеси органических кислот), имитирующей продукты метаболизма микроорганизмов

Через месяц экспозиции цементного камня в модельной среде можно отметить значительное снижение прочности в сравнении с исходными значениями: на 20 % для контрольного цементного камня из белого портландцемента и на 35 % – с добавкой вспученного перлитового песка. Такое негативное влияние добавки может быть обусловлено изначальным разуплотнением структуры цементного камня в присутствии алюмосиликатного компонента, наличием дефектных контактных зон «цементный камень – вспученный перлит», что повысило проницаемость для агрессивной среды. Также при замене части цемента на алюмосиликатную добавку соответственно снижается количество формируемых продуктов гидратации, отвечающих за плотность и прочность матрицы. Таким образом, после месяца выдерживания в модельной среде коэффициент биостойкости составил 0,80 для чистого цементного камня и 0,65 – с добавлением вспученного перлитового песка.

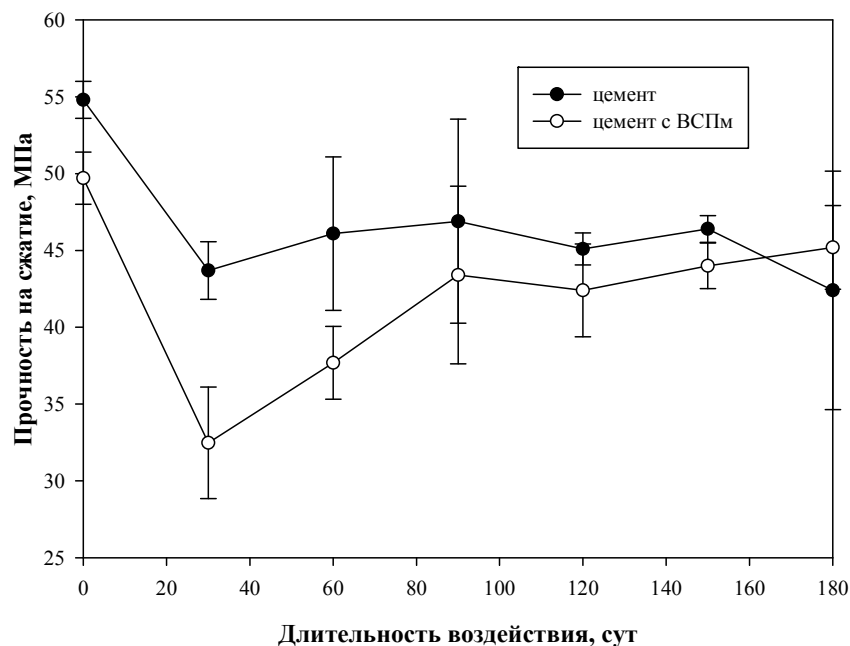


Рис. 2. Изменение прочности на сжатие цементного камня в зависимости от времени экспозиции в модельной среде

После продолжения экспозиции образцов в модельной среде дальнейшего падения прочности не происходит. Для чистого цементного камня на протяжении последующих пяти месяцев выдерживания в модельной среде значения средней прочности на сжатие сохраняются около 45 МПа, но иногда со значительными отклонениями от образца к образцу. Такое поведение можно частично объяснить, изучив микроструктуру цементного камня (рис. 3). Сравнив микроструктуру исходного цементного камня (рис. 3, а) с экспонированным один месяц в растворе кислот (рис. 3, б), можно отметить наличие разуплотнений, вероятно, связанных с вымыванием растворимых соединений цементного камня в результате кислотной агрессии. При этом на шестой месяц экспозиции подобных полостей становится меньше, однако наблюдаются сростки столбчатых, игольчатых, пластинчатых кристаллов (рис. 3, в), сформированных, вероятно, в местах наблюдаемых ранее разуплотнений. Микроструктура выглядит местами более монолитной, но сохраняется большое количество дефектов, формируемые новообразования не заполняют все пространство полостей, что и приводит к варьированию значений прочности на сжатие.

Аналогичные процессы наблюдаются и в цементном камне со вспученным перлитовым песком. Изначально структура менее однородна в результате присутствия частиц перлита (рис. 3, г). Через месяц экспозиции в растворе кислот в структуре обнаруживаются полости (рис. 3, д). Через 6 месяцев отмечается развитая сетка новообразований (рис. 3, е). При этом в случае цементного камня со вспученным перлитовым песком в процессе экспозиции в модельной среде с первого по шестой месяц средняя прочность на сжатие увеличивается (см. рис. 2) и практически достигает прочности контрольного цементного камня. Это можно объяснить тем, что рентгеноаморфная составляющая вспученного перлита, являясь пуццолановоактивным компонентом, обеспечивает связывание свободного гидроксида кальция с образованием гидросиликатов кальция второй генерации, что и приводит к росту прочности цементной матрицы.

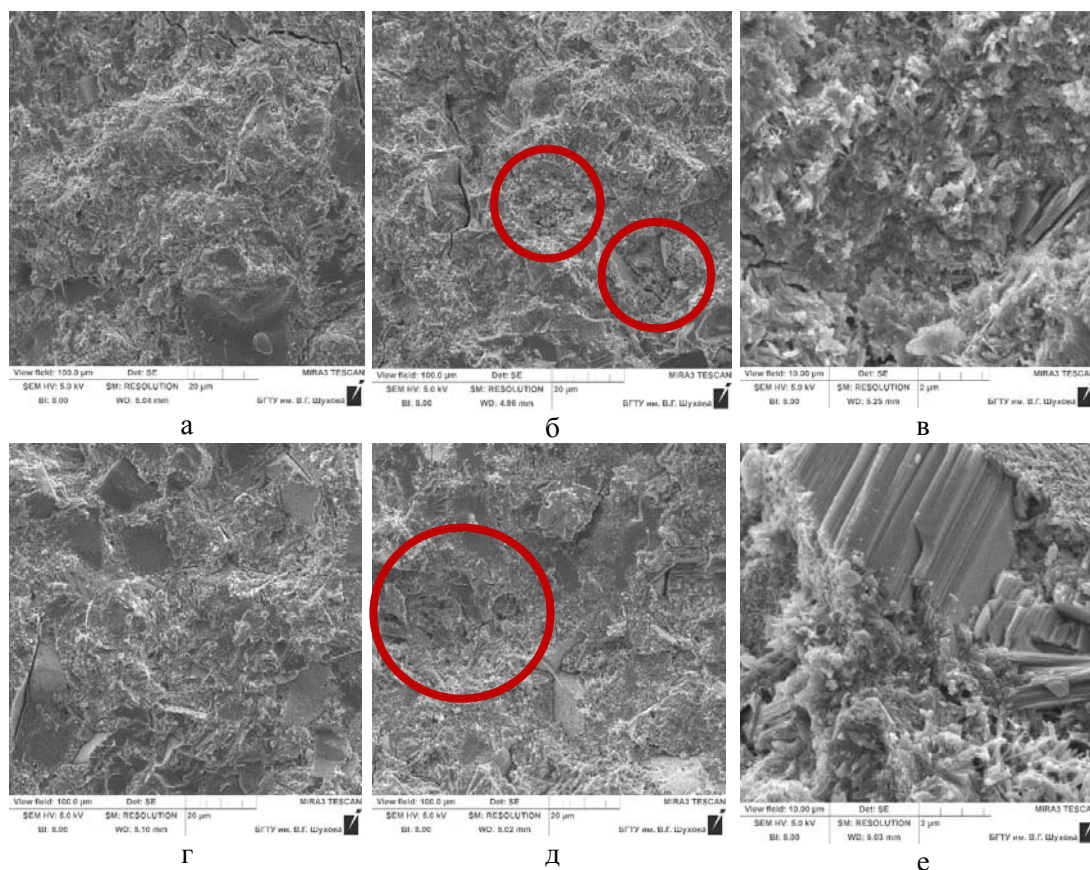


Рис. 3. Изменение микроstructures цементного камня контрольного (а–в) и со вспученным перлитовым песком (г–е) в зависимости от времени экспозиции в модельной среде: а, г – исходные образцы; б, д – 1 месяц экспозиции; в, е – 6 месяцев экспозиции

Результаты заражения образцов суспензией спор грибов

При исследовании образцов цементного камня, не подвергнутых принудительной карбонизации, как чистых, так и со вспученным перлитовым песком, наблюдаемая картина схожа: к 28 суткам развития гриба на питательной среде отмечается значительная зона фунгицидности (рис. 4, а, б). Из-за диффундирования в питательную среду межпоровой жидкости цементного камня с высоким рН отмечается сильный фунгицидный эффект. Поэтому в дальнейшем исследованы только образцы, подвергнутые после 28 суток твердения принудительной карбонизации в среде углекислого газа.

Визуальная оценка предварительно карбонизованных и затем выдержанных 28 суток в чашках Петри образцов цементного камня (рис. 5) показала развитие и распределение гриба по чашке Петри тонким равномерным слоем. У чистого цементного камня (рис. 5, а) зоны ингибирования роста гриба не наблюдается, но и спор и

развития мицелия на поверхности образцов также не наблюдается (рис. 6, а). У цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка наблюдается небольшая зона ингибирования роста гриба (рис. 5, б). Такое отличие может быть связано с изменением характера поровой структуры или состава поровой жидкости, что опять-таки привело к ее диффундированию в питательную среду при замене части портланд-цемента вспученным перлитовым песком. Спор и развития мицелия на поверхности образцов не наблюдается (рис. 6, б).



Рис. 4. Развитие гриба *Aspergillus niger* на питательной среде в присутствии цементного камня контрольного (а) и со вспученным перлитовым песком (б)



Рис. 5. Развитие гриба *Aspergillus niger* на питательной среде в присутствии принудительно карбонизованного цементного камня контрольного (а) и со вспученным перлитовым песком (б)

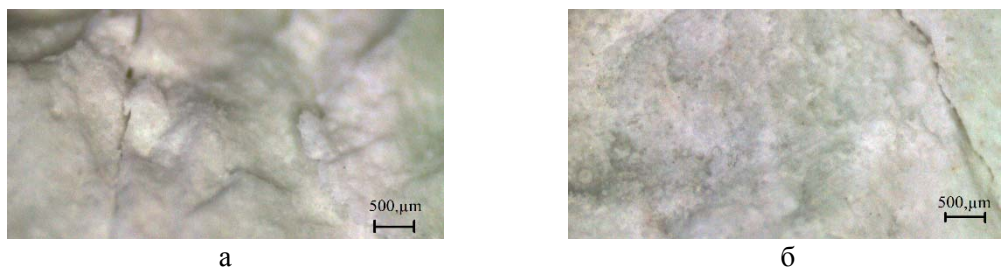


Рис. 6. Поверхность принудительно карбонизованного цементного камня контрольного (а) и со вспученным перлитовым песком (б) после эксперимента с *Aspergillus niger* (вид в биологический микроскоп)

Результаты оценки грибостойкости предварительно карбонизованного цементного камня по интенсивности роста гриба *Aspergillus niger* сведены в таблицу.

Можно говорить о стойкости цементного камня из белого цемента, в том числе с перлитом, к воздействию мицелиального гриба *Aspergillus niger*.

Оценка грибостойкости по интенсивности роста гриба *Aspergillus niger*

Цементный камень	Степень развития плесневых грибов в баллах по Методу 4 ГОСТ 9.048–89	Зона ингибирования роста грибов, мм	Оценка материала по Методу 3 ГОСТ 9.049–91
Контрольный	0*	0	Фунгистатичный
Со вспученным перлитовым песком	0*	5	Фунгицидный

Примечание: * – под микроскопом прорастания спор и конидий не обнаружено.

Таким образом, полученные результаты показывают, что замена части белого портландцемента на пуццолановую добавку, в частности вспученный перлитовый песок, не приводит к снижению показателей биологического сопротивления цементного камня.

ВЫВОДЫ

Исследованы показатели биологического сопротивления белого портландцемента с добавкой вспученного перлитового песка с целью подтверждения возможности разработки на его основе бетонов для малых архитектурных форм.

В качестве показателей биологического сопротивления цементного камня использовали: значения прочности на сжатие после выдерживания материала в модельной среде, имитирующей продукты метаболизма микроорганизмов, и интенсивность роста гриба *Aspergillus niger* на поверхности материала.

После месяца выдерживания в модельной среде коэффициент биостойкости составил 0,80 для чистого цементного камня и 0,65 для цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка. При продолжении экспозиции образцов в модельной среде до шести месяцев: у контрольного цементного камня дальнейшего падения средней прочности на сжатие не происходит, у образцов со вспученным перлитовым песком отмечается рост средней прочности на сжатие. Рентгеноаморфная составляющая вспученного перлита, являясь пуццолановоактивным компонентом, обеспечивает связывание свободного гидроксида кальция с образованием гидросиликатов кальция второй генерации, что и приводит к росту прочности цементной матрицы.

По результатам оценки интенсивности роста гриба *Aspergillus niger* на поверхности материала цементный камень из белого портландцемента с добавкой вспученного перлитового песка проявил грибостойкость: под микроскопом прорастания спор и конидий не обнаружено.

Полученные результаты позволяют рекомендовать исследованные материалы для изготовления малых архитектурных форм, для которых важными показателями качества являются высокие эксплуатационные и эстетические характеристики. Однако при разработке составов бетонов с использованием вспученного перлитового песка рекомендуется предусмотреть меры по повышению плотности цементно-песчаной матрицы для увеличения биостойкости конечного композита.

Список литературы

1. Шаймарданова, К.А. К вопросу о влиянии визуальной среды города на состояние человека / К.А. Шаймарданова // Известия КазГАСУ. – 2020. – № 2 (52). – С. 160–167.
2. Лапшина, Е.Г. Динамическая архитектура в пространстве современного города / Е.Г. Лапшина, Я.И. Сухов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2(43). – С. 171–177.

3. Строкова, В.В. Малые архитектурные формы: состав и свойства бетонов для их получения / В.В. Строкова, Н.О. Хмара, В.В. Нелюбова, Н.А. Шаповалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 11. – С. 8–31. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-8-31.
4. Гришина, А.Н. Био- и химическая стойкость наномодифицированного композиционного цементного камня, содержащего гидросиликаты металлов / А.Н. Гришина, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1(54). – С. 4–14. – DOI 10.54734/20722958_2023_1_4.
5. Строкин, К.Б. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из железобетона в условиях микробиологической коррозии / К.Б. Строкин, Д.Г. Новиков, В.С. Коновалова, С.А. Логинова, Б.Е. Нармания // Современные проблемы гражданской защиты. – 2020. – № 4. – С. 62–69.
6. Пат. 2471188 Российская Федерация, Б № 36. Способ испытания строительных материалов на биостойкость / Строганов В.Ф., Куколева Д.А.; заявитель и патентообладатель КазГАСУ, Строганов В.Ф., Куколева Д.А. – № 2011142738/15; заявл. 21.10.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36. – 5 с.
7. Grengg, C. Long-Term in Situ Performance of Geopolymer, Calcium Aluminate and Portland Cement-Based Materials Exposed to Microbially Induced Acid Corrosion / C. Grengg, N. Ukrainczyk, G. Koraimann, B. Mueller, M. Dietzel, F. Mittermayr // Cement and Concrete Research. – Vol. 131. – 2020. – P. 106034. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106034>.
8. Qiu, L. Antimicrobial Concrete for Smart and Durable Infrastructures: A Review / L. Qiu, S. Dong, A. Ashour, B. Han // Construction and Building Materials. – 2020. – № 10, Vol. 260. – P. 120456.
9. Sharafutdinov, K.B. The Use of Copper Nanomodified Calcium Carbonate as a Bactericidal Additive for Concrete / K.B. Sharafutdinov, K.A. Saraykina, G.G. Kashevarova, V.T. Erofeev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Vol. 18, № 2. – P. 143–155. – DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-143-155.
10. Строганов, В.Ф. Исследование влияния модификаторов различной структуры и механоактивации вяжущего на биостойкость цементных композитов / В.Ф. Строганов, Е.В. Сагадеев, Р.А. Ибрагимов [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 4 (50). – С. 368–375.
11. Ерофеев, В.Т. Повышение коррозионной стойкости цементных композитов активными добавками / В.Т. Ерофеев, А.П. Федорцов, В.А. Федорцов // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2(88). – С. 51–60. – DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-51-60.
12. Фомичев, В.Т. Защита строительных материалов и конструкций от повреждений микромицетами / В.Т. Фомичев, С.В. Камкова, И.А. Куликова, Г.В. Чичерина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2021. – № 4(85). – С. 183–191.
13. Строкова, В.В. Вспученный перлитовый песок как эффективная добавка к вяжущему / В.В. Строкова, В.В. Нелюбова, Н.О. Хмара, А.И. Буковцова, Ю.В. Денисова // Строительные материалы. – 2022. – № 6. – С. 61–66. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-61-66>
14. ГОСТ 9.048–89. Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. – Введ. 1991–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 23 с.
15. ГОСТ 9.049–91. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. – Введ. 1992–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 15 с.

References

1. Shaimardanova, C.A. On the Question of the Impact of the Visual Environment of the City on the Human Condition / C.A. Shaimardanova // *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. – 2020. – № 2 (52). – P. 160–167.
2. Lapshina, E.G. Dynamic Architecture in Space of a Modern City / E.G. Lapshina, Ya.I. Sukhov // *Regional Architecture and Engineering*. – 2020. – № 2(43). – P. 171–177.
3. Strokova, V.V. Small Architectural Forms: Composition and Properties of Concrete for Their Production / V.V. Strokova, N. Hmara, V.V. Nelyubova, N.A. Shapovalov // *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V G Shukhov*. – 2021. – № 11. – P. 8–31.
4. Grishina, A.N. Bio- and Chemical Resistance of Nanomodified Composite Cement Stone Containing Metal Hydrosilicates / A.N. Grishina, E.V. Korolev // *Regional Architecture and Engineering*. – 2023. – № 1(54). – P. 4–14. – DOI 10.54734/20722958_2023_1_4.
5. Strokin, K.B. Determination of Safe Service Life of Structures Made of Reinforced Concrete at Microbially Induced Corrosion / K.B. Strokin, D.G. Novikov, V.S. Konovalova, S.A. Loginova, B.E. Narmaniya // *Modern Problems of Civil Protection*. – 2020. – № 4 – P. 62–69.
6. Patent № 2471188 RF. IPC G01N33/38. Method of Testing Structural Materials for Biostability / Stroganov V. F., Kukoleva D. A.; Kazan State University of Architecture and Engineering, Stroganov V.F., Kukoleva D.A. № 2011142738/15; appl. 21/10/2011; published 27.12.2012; Bull. № 36.
7. Grengg, C. Long-Term in Situ Performance of Geopolymer, Calcium Aluminate and Portland Cement-Based Materials Exposed to Microbially Induced Acid Corrosion / C. Grengg, N. Ukrainczyk, G. Koraimann, B. Mueller, M. Dietzel, F. Mittermayr // *Cement and Concrete Research*. – 2020. – № 131. – P. 106034.
8. Qiu, L. Antimicrobial Concrete for Smart and Durable Infrastructures: A Review / L. Qiu, S. Dong, A. Ashour, B. Han // *Construction and Building Materials*. – 2020. – № 10, Vol. 260. – P. 120456.
9. Sharafutdinov, K.B. The Use of Copper Nanomodified Calcium Carbonate as a Bactericidal Additive for Concrete / K.B. Sharafutdinov, K.A. Saraykina, G.G. Kashevarova, V.T. Erofeev // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2022. – Vol. 18, № 2. – P. 143–155.
10. Stroganov, V.F. Investigation of the Effect of Modifiers of Various Structures and Mechanical Activation of a Binder on the Biostability of Cement Composites / V.F. Stroganov, R.A. Sagadeev, R.A. Ibragimov, S.I. Pimenov // *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. – 2019. – № 4 (50). – P. 368–375.
11. Erofeev, V.T. The Increasing of Corrosive Resistance of Cement Composites by Active Additives / V.T. Erofeev, A.P. Fedortsov, V.A. Fedortsov // *Building and Reconstruction*. – 2020. – № 2 (88). – P. 51–60.
12. Fomichev, V.T. Protection of Building Materials and Structures from Damage by Micromycetes / V.T. Fomichev, S.V. Kamkova, I.A. Kulikova, G.V. Chicherina // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2021. – № 4(85). – P. 183–191.
13. Strokova, V.V. Expanded Perlite Sand as an Effective Binder Additive / V.V. Strokova, V.V. Nelubova, N.O. Khmara, A.I. Bukovsova, Yu.V. Denisova // *Construction materials*. – 2022. – № 6. – P. 61–66.
14. GOST 9.048–89. Unified System of Corrosion and Ageing Protection. Technical Items. Methods of Laboratory Tests for Mould Resistance. – Introduction. 1991–07–01. – Moscow: Publishing House of Standards, 1989. – 23 p.
15. GOST 9.049–91. Unified System of Corrosion and Ageing Protection. Polymer Materials and Their Components. Methods of Laboratory Tests for Mould Resistance. – Introduction. 1992–07–01. – M.: Publishing House of Standards, 1992. – 15 p.

УДК 691-408:691-492:546.82

DOI 10.54734/20722958_2023_4_41

*Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова*

Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46,
тел.: (4722) 54-90-41; факс: (4722) 30-99-91

Подгорный Даниил Сергеевич,
инженер-исследователь НИИ
«Наносистемы в строительном
материаловедении»
E-mail: dan_podgor@mail.ru

Бондаренко Диана Олеговна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Материаловедение
и технология материалов»
E-mail: di_bondarenko@mail.ru

Строкова Валерия Валерьевна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Материаловедение
и технология материалов»
E-mail: vvstrokova@gmail.com

Скиба Андрей Александрович,
младший научный сотрудник Центра
высоких технологий
E-mail: ansk1986@mail.ru

*Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,
tel.: (4722) 54-90-41; fax: (4722) 30-99-91

Podgornyi Daniil Sergeevich,
Research Engineer of the Research Institute
«Nanosystems in Building Materials Science»
E-mail: dan_podgor@mail.ru

Bondarenko Diana Olegovna,
Candidate of Sciences, Assistant Professor of
the Department «Materials Science and
Technology»
E-mail: di_bondarenko@mail.ru

Stroкова Valeria Valerievna,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Materials Science and
Technology»
E-mail: vvstrokova@gmail.com

Skiba Andrey Aleksandrovich,
Junior Researcher at the Center of High
Technologies
E-mail: ansk1986@mail.ru

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ
№ FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ
им. В.Г. Шухова.

СВОЙСТВА ПОРОШКОВ ТИТАНА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА БЕТОН

Д.С. Подгорный, Д.О. Бондаренко, В.В. Строкова, А.А. Скиба

Представлены результаты исследования основных характеристик трёх видов порошков титана: ПТС-1, ПТМ-1, ПТН8-ВТ1.0. Оценена возможность их применения для создания фотокаталитических покрытий на бетоне методом детонационного напыления. Согласно требованиям, предъявляемым к порошкам для детонационного напыления, а также с учетом специфики бетона как напыляемой поверхности выявлено, что наиболее эффективными для данной цели являются порошки титана марки ПТН и его аналоги. Это обусловлено их правильной геометрической формой (сферичностью) и слабо развитой морфологией поверхности, что будет способствовать равномерному распределению энергии и окислению порошка при детонации, а также созданию более плотного покрытия с низкой пористостью.

Ключевые слова: детонационное напыление, порошок титана, защитные покрытия, микроструктура, гранулометрический состав, фотокаталитические покрытия

PROPERTIES OF TITANIUM POWDERS INTENDED FOR DETONATION SPRAYING ON CONCRETE

D.S. Podgornyi, D.O. Bondarenko, V.V. Stroková, A.A. Skiba

The results of study of the main characteristics of three types of titanium powders are presented: PTS-1, PTM-1, PTN8-WT1.0. The possibility of their application for the creation of photocatalytic

coatings on concrete by detonation spraying is evaluated. According to the requirements for powders for detonation spraying, and taking into account the specifics of concrete as a sprayed surface, it was revealed that the most effective for this purpose are titanium powders of the PTN brand and their analogues. This is due to their correct geometric shape (sphericity) and underdeveloped surface morphology, that will contribute to the uniform distribution of energy and oxidation of the powder during detonation, as well as the creation of a denser coating with low porosity.

Keywords: detonation spraying, titanium powder, protective coatings, microstructure, granulometric composition, photocatalytic coatings

Введение. За последние десятилетия технология строительных материалов претерпела значительные изменения, способствующие повышению их эффективности и долговечности. Однако необходимость обеспечения защиты материалов от различных видов повреждений остается важной технологической задачей [1]. Создание защитных покрытий на бетонах имеет большие перспективы и является активной областью исследований и разработок [2–4].

Регулярное очищение и обслуживание бетонных поверхностей с помощью механических или химических средств, особенно в условиях, где есть высокий риск развития коррозии, является классическим и эффективным, но в то же время дорогостоящим способом предотвращения ее возникновения [5]. Фотокаталитические материалы способны эффективно удалять загрязнения и снижать уровень вредных веществ в окружающей среде [6, 7]. Одним из наиболее распространенных и доступных фотокаталитических материалов является диоксид титана в модификации анатаза [8].

Покрытия из диоксида титана позволяют разрушать органические загрязнения (грязь, масла, краски), способствуют самоочищению от биологических загрязнений (плесень и водоросли), защищают от воздействия агрессивных факторов (химические соединения, коррозия и ультрафиолетовое излучение), а также разлагают некоторые загрязняющие вещества окружающей среды (оксиды азота, летучие органические соединения). Данные преимущества актуальны для бетонов, находящихся во влажных климатических условиях или подверженных воздействию морской воды. Кроме того, покрытия могут применяться для улучшения эстетического вида бетонных поверхностей, изменяя их оттенок и внешний вид, что может быть особенно полезно в архитектурных проектах.

Среди способов создания анатазсодержащих покрытий на бетонах можно выделить технологию введения фотокаталитического агента в состав бетонной смеси [9], нанесение агента в составе лакокрасочного покрытия [10]. В качестве перспективных технологий создания фотокаталитически активных покрытий на строительных материалах стоит остановиться на различных термомеханических и газодинамических методах [4, 11, 12].

Среди последних в настоящее время получает распространение высокоскоростное детонационное напыление (ВДН) порошков [13, 14], которое основано на сжигании смеси горючего газа (обычно ацетилена или пропана в смеси с кислородом и воздухом) в специальном камерном устройстве. Дуговая свеча зажигает горючую смесь в камере, в результате чего создается взрывная волна, которая ускоряет порошок, подаваемый на конце ствола детонационной установки. При этом порошок нагревается до высоких температур (1000 °C и выше), размягчается и прикрепляется к поверхности, образуя плотное и прочное покрытие. Эта технология используется для получения высококачественных функциональных покрытий на поверхности металлов и сплавов [11–14], специальной керамики [15], но до настоящего времени еще не получила столь же широкого распространения для нанесения покрытий на изделия из бетона.

Бетон является полиминеральным, полиструктурным композиционным материалом с развитой (по сравнению, например, с металлами) морфологией поверхности, которая, в свою очередь, зависит от пористости, определяемой совокупностью пор цементной матрицы и контактной зоной заполнителя с цементным камнем. Все это в совокупности с полиминеральностью поверхности, на которую наносится покрытие, определяет качество покрытия и его эксплуатационные характеристики. Таким образом, специфика состава бетона и морфологии его поверхности обуславливает

необходимость адаптации технологии ВДН, которую необходимо начать с выбора рациональных видов порошков с точки зрения технологических параметров нанесения.

Для получения фотокаталитических покрытий методом детонационного напыления используют порошки металлического титана. В процессе напыления порошок нагревается и окисляется как кислородом из горючей смеси, так и кислородом из воздуха, создавая плотное покрытие из диоксида титана со смешанным фазовым составом (с содержанием аморфной и кристаллической (рутил, анатаз, брукит) фаз). На соотношение фаз и качество получаемых покрытий значительное влияние оказывает морфология и размер применяемых титановых порошков. В работах [8, 13, 14] отмечено, что наиболее эффективными для детонационного напыления являются порошки с размером частиц 20–40 мкм, а также наименее развитой морфологией поверхности. Это обусловлено тем, что при малых размерах порошка (<20 мкм) происходит его интенсивное окисление с быстрым переходом в рутил. Несовершенства поверхности исходного порошка (продолговатые неровности и дендритные образования) также подвержены данному процессу.

Нами рассмотрены морфологические и гранулометрические особенности ряда титановых порошков с целью их применения для создания фотокаталитических покрытий на бетоне с помощью детонационного напыления.

Материалы и методы исследований. В качестве исследуемых материалов использовали порошки титана трёх марок: ПТС-1 и ПТМ-1 производства АО «Полема», получаемые в соответствии с требованиями ТУ 14-22-57-92 «Порошок титановый. Технические условия»; ПТН8-ВТ1.0 производства ООО «Нормин», получаемый в соответствии с требованиями ТУ 1791-001-11805089-2014 «Порошок титановый». Содержание примесей в данных порошках не превышает 1 % по массе (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Содержание примесей в порошках титана

Марка порошка	Ti	Примеси, масс. %, не более							
		N	C	H	Si	Fe+Ni	Fe	Cl	O
ПТС-1	основа	0,08	0,05	0,35	0,10	0,40	–	0,004	–
ПТМ-1	основа	0,08	0,05	0,35	0,10	0,40	–	0,004	–
ПТН8-ВТ1.0	основа	0,04	0,07	0,01	0,10	–	0,25	–	0,20

Анализ микроструктуры порошков проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Анализ гранулометрического состава порошков проводили с использованием лазерного дифракционного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoTec plus.

Истинную плотность определяли с использованием газового пикнометра Русномат АТС. Насыпную плотность определяли с помощью воронки в соответствии с ГОСТ 19440-94 «Порошки металлические. Определение насыпной плотности».

Результаты и их анализ. Визуально исследуемые материалы представляют собой порошок темно-серого цвета с истинной плотностью в диапазоне 4300–4600 кг/м³ и насыпной плотностью в диапазоне 1300–1800 кг/м³ для порошков марок ПТС-1 и ПТМ-1 и около 3000 кг/м³ для порошка марки ПТН8-ВТ1.0 (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Содержание примесей в порошках титана

Марка порошка	Истинная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³
ПТС-1	4372	1757
ПТМ-1	4581	1344
ПТН8-ВТ1.0	4468	2976

Анализ микроструктуры показал, что порошки ПТС-1 и ПТМ-1 (рис. 1, а–г) имеют дендритную структуру с наличием мелких дроблёных включений, что характерно для порошков, получаемых методом измельчения титановой губки. Кроме того, выявлена

деформированность частиц порошка ПТС-1, имеются сколы и трещины. При рассеве фракций могут встречаться элементы игольчатой и продолговатой формы, что отрицательно скажется на качестве детонационного напыления, так как тонкие и длинные частицы подвергаются более интенсивному окислению с образованием устойчивой и слабофотокаталитической формы оксида титана – рутила.

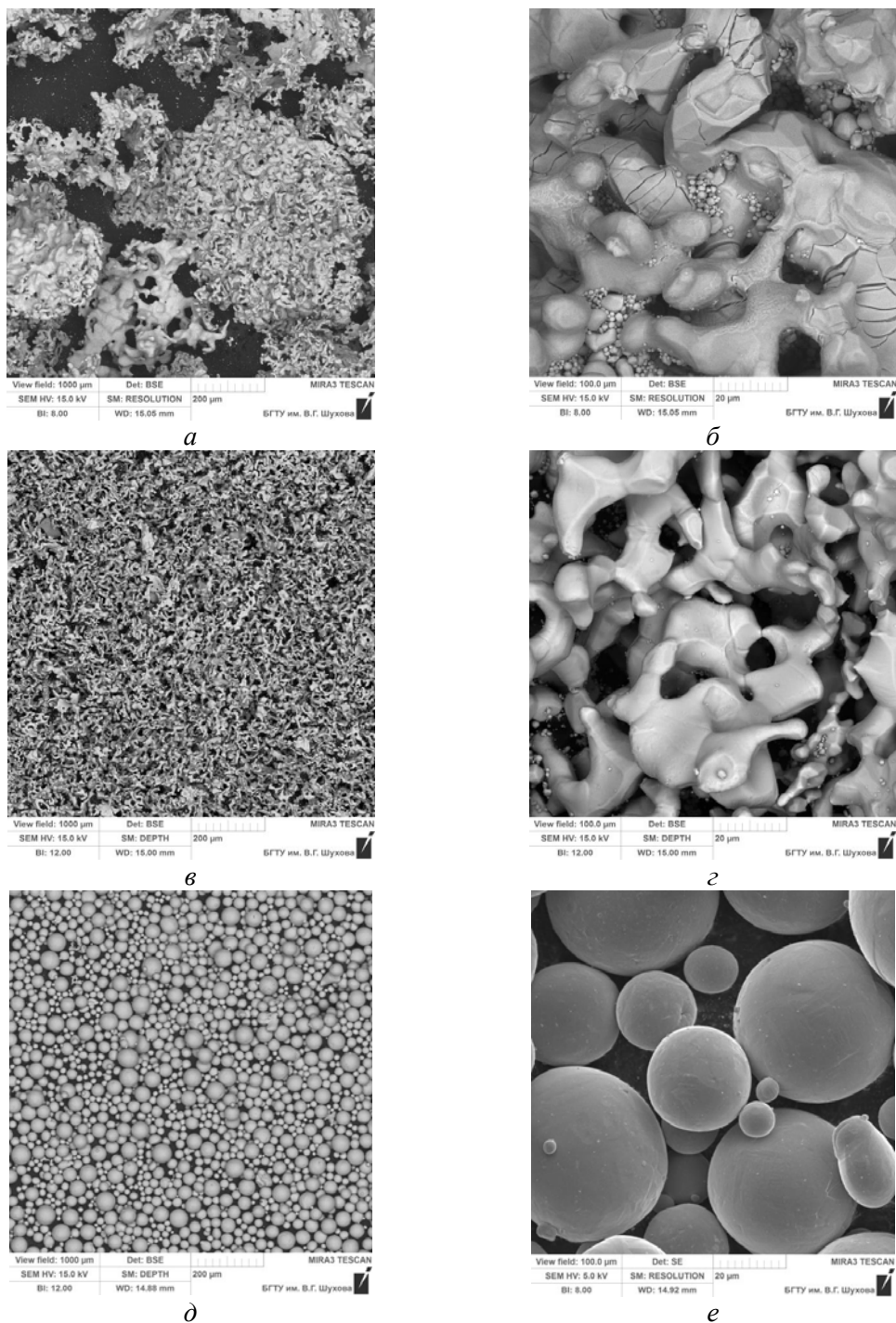


Рис. 1. Микроструктура титановых порошков:
а, б – ПТС-1; в, г – ПТМ-1; д, е – ПТН8-ВТ1.0

Частицы порошка ПТН8-ВТ1.0 (рис. 1, д, е) характеризуются изометрической формой, что также обусловлено технологией его получения – плазменной атомизацией металлов в среде аргона. Частицы находятся в небольшом размерном диапазоне,

видимые дефекты поверхности отсутствуют. При рассеивании ввиду правильной шарообразной формы частиц повышается «чистота» остатка на сите заданного размера.

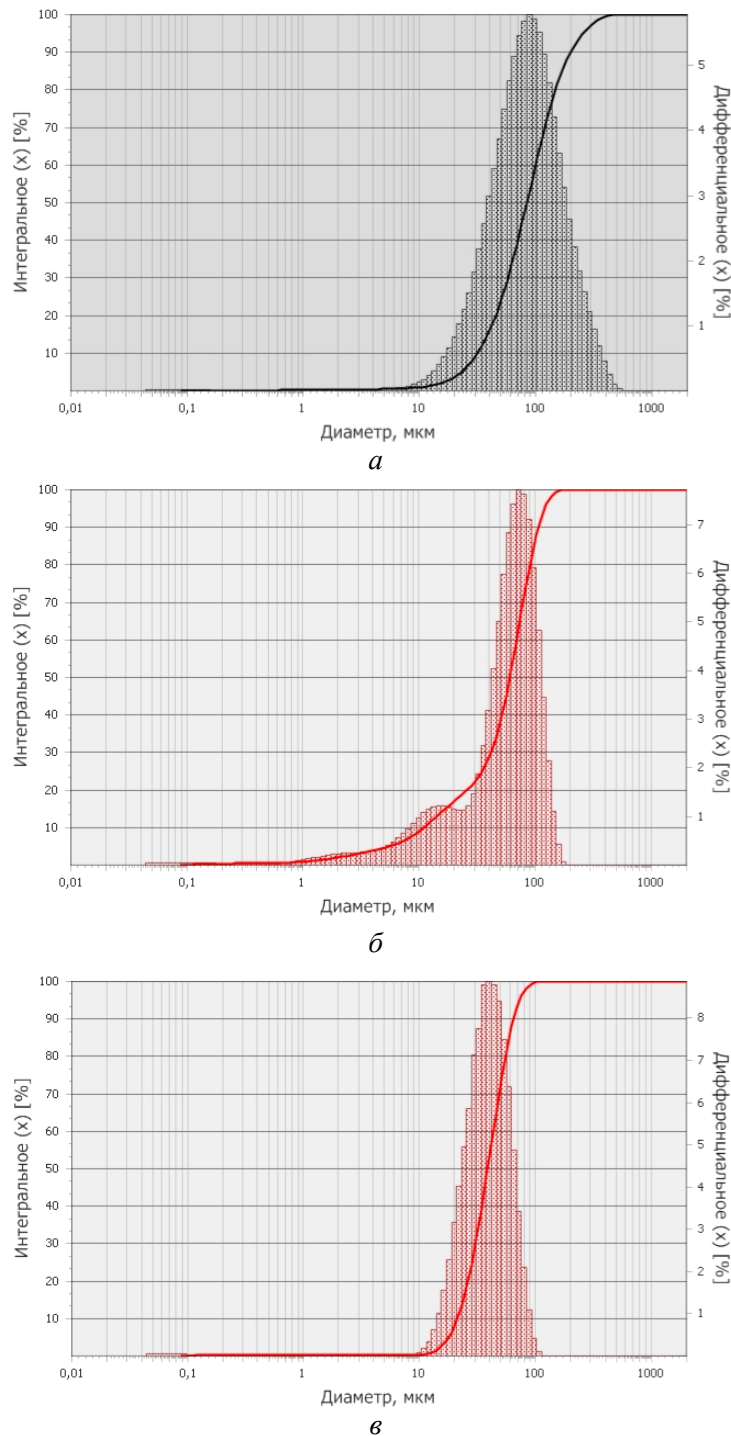


Рис. 2. Гранулометрический состав титановых порошков:
а – ПТС-1; б – ПТМ-1; в – ПТН8-ВТ1.0

Анализ гранулометрического состава порошков показал, что ПТМ-1 характеризуется полимодальным распределением частиц с пиками в области 20 и 80 мкм (рис. 2), тогда как ПТС-1 и ПТН8-ВТ1.0 имеют по одному пику – 100 и 50 мкм соответственно. При этом интегральное значение в размерном диапазоне ниже 10 мкм для порошков ПТС-1 и ПТН8-ВТ1.0 составляет менее 1 %, для ПТМ-1 – 9 %. Интегральное значение

в размерном диапазоне выше 100 мкм составляет для ПТС-1 – 40 %, ПТМ-1 – 20 % и ПТН8-ВТ1.0 – 100 %.

При использовании порошков ПТС-1 и ПТМ-1 для детонационного напыления необходимо проводить предварительный рассев с выделением фракции 20–40 мкм, дальнейшее измельчение и повторный рассев крупной фракции (>40 мкм). При использовании порошка ПТН8-ВТ1.0 также необходимо проводить рассев для удаления частиц с размером ниже 20 мкм и выше 40 мкм, однако рассев порошков правильной формы является менее энергозатратным.

Выводы. Исследованы три вида порошков титана с целью оценки возможности их применения для создания фотокаталитических покрытий на поверхности бетонов методом детонационного напыления.

По результатам исследований наиболее предпочтительным для детонационного напыления является порошок марки ПТН8-ВТ1.0, который обладает шарообразной формой частиц и слабо развитой морфологией. Это будет способствовать равномерному распределению энергии и окислению порошка при детонации, а также созданию более плотного покрытия с низкой пористостью. Также преимуществом данного порошка является наличие большего количества необходимой фракции без дополнительного измельчения.

Дальнейшие исследования будут направлены на выявление закономерностей формирования структурно-сопряженного плотного титанового покрытия от технологических параметров и условий (режимов) его нанесения, а также от состава и свойств бетона.

Создание и применение строительных материалов с фотокаталитическими покрытиями, обладающими антибактериальными свойствами и эффектом самоочищения, могут стать особенно эффективными для защиты морских гидротехнических сооружений, а также в убойных цехах и предприятиях, работающих с органическими веществами. Такие места представляют риск развития различных видов коррозии, а защитное покрытие способно снизить этот риск и обеспечить долговечность строительных конструкций.

Список литературы

1. Chaudhari, B. Microbiologically induced concrete corrosion: a concise review of assessment methods, effects, and corrosion-resistant coating materials / B. Chaudhari // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, Iss. 12. – 21 p. – DOI: 10.3390/ma15124279.
2. Массалимов, И.А. Новые защитные покрытия на основе наночастиц серы, полученные из полисульфида калия / И.А. Массалимов, А.Е. Чуйкин, Б.И. Массалимов, А.Г. Мустафин // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 27–36. – DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-1-27-36.
3. Степанова, В.Ф. Защитные лакокрасочные покрытия для бетонных и железобетонных конструкций / В.Ф. Степанова, С.Е. Соколова, А.Л. Полушкин // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 2018. – № 6. – С. 30–34.
4. Бондаренко, Д.О. Подбор и анализ сырьевых компонентов для защитного и декоративного слоя композиционного материала / Д.О. Бондаренко // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2021. – № 12. – С. 27–33. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-27-33.
5. Fytianos, G. Least cost analysis for biocorrosion mitigation strategies in concrete sewers / G. Fytianos, E. Tziolas, E. Papastergiadis, P. Samaras // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, Iss.11. – 13 p. – DOI: 10.3390/su12114578.
6. Лабузова, М.В. Свойства фотокаталитического композиционного материала на основе кремнеземного сырья / М.В. Лабузова, Е.Н. Губарева, Ю.Н. Огурцова, В.В. Строкова // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2018. – № 8. – С. 85–92. – DOI: 10.12737/article_5b6d5863076c49.45633399.
7. Antonenko, M.V. The effect of titanium dioxide sol stabilizer on the properties of photocatalytic composite material / M.V. Antonenko, Y.N. Ogurtsova, V.V. Strokova,

E.N. Gubareva // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 95. – P. 16–22. – DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_3.

8. Sirota, V.V. TiO₂ coatings on the surface of buildings structural elements / V.V. Sirota, S.V. Zaitsev, M.V. Limarenko, D.S. Prochorenkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 945 (1). – Article number 012084. – DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012084.

9. Антоненко, М.В. Фотокаталитически активные самоочищающиеся материалы на основе цемента. Составы, свойства, применение / М.В. Антоненко, Ю.Н. Огурцова, В.В. Строкова, Е.Н. Губарева // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2020. – № 3. – С. 16–25. – DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25.

10. Бондаренко, А.В. Функциональные строительные материалы для пассивной деградации органических поллютантов воздуха / А.В. Бондаренко, Б.А. Бондарев, П.В. Борков, М.Л. Руэлло, В.В. Бондаренко // *Строительные материалы*. – 2023. – № 1–2. – С. 4–10. – DOI: 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-4-10.

11. Kovaleva, M. Effect of processing parameters on the microstructure and properties of WC–10Co–4Cr coatings formed by a new multi-chamber gas-dynamic accelerator / M. Kovaleva, Y. Tyurin, N. Vasilik, O. Kolisnichenko, M. Prozorova, M. Arsenko, M. Yaprntsev, V. Sirota, I. Pavlenko // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41 (10). – P. 15067–15074. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.169.

12. Seremak, W. Preliminary study on low-pressure cold spray process parameters: effect on mechanical and photocatalytic properties of TiO₂ coatings / W. Seremak, M. Jasiorski, A. Baszczuk, M. Winnicki // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2023. – 14 p.

13. Sirota, V. NiB–CrC Coatings prepared by magnetron sputtering using composite ceramic NiCr–BC target produced by detonation spray coating / V. Sirota, S. Zaitsev, D. Prokhorenkov, M. Limarenko, A. Skiba, M. Kovaleva // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, Iss. 20. – 13 p. – DOI:10.3390/nano12203584.

14. Sirota, V. Detonation Spraying of Composite Targets Based on Ni, Cr and B4C for Magnetron Multi-Functional Coating / V. Sirota, S. Zaitsev, D. Prokhorenkov, M. Limarenko, A. Skiba, M. Kovaleva // *Key Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 909. – P. 115–120. – DOI: 10.4028/p-74w31h.

15. Chmielewski, T. Selected properties of Ti coatings deposited on ceramic AlN substrates by thermal spraying / T. Chmielewski, D. Golański // *Welding International*. – 2013. – Vol. 27, Iss. 8. – P. 604–609. – DOI: 10.1080/09507116.2011.606146.

References

1. Chaudhari, B. Microbiologically induced concrete corrosion: a concise review of assessment methods, effects, and corrosion-resistant coating materials / B. Chaudhari // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, Iss. 12. – 21 p. – DOI: 10.3390/ma15124279.

2. Massalimov, I.A. New protective coatings based on sulfur nanoparticles obtained from potassium polysulfide / I.A. Massalimov, A.E. Chuikin, B.I. Massalimov, A.G. Mustafin // *Nanotechnology in construction*. – 2023. – Vol. 15, Iss. 1. – P. 27–36. – DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-1-27-36.

3. Stepanova, V.F. Protective paint coatings for concrete and reinforced concrete structures / V.F. Stepanova, S.E. Sokolova, A.L. Polushkin // *Paint materials and their use*. – 2018. – Vol. 6. – P. 30–34.

4. Bondarenko, D.O. Selection and analysis of raw materials for a protective and decorative layer of composite material // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. – 2021. – Vol. 12. – P. 27–33. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-27-33.

5. Fytianos, G. Least cost analysis for biocorrosion mitigation strategies in concrete sewers / G. Fytianos, E. Tziolas, E. Papastergiadis, P. Samaras // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, Iss.11. – 13 p. – DOI: 10.3390/su12114578.

6. Labuzova, M.V. Properties of photocatalytic composite material based on silica raw materials / M.V. Labuzova, E.N. Gubareva, Y.N. Ogurtsova, V.V. Strokova // *Bulletin of*

BSTU named after V.G. Shukhov. – 2018. – Iss. 8. – P. 85–92. – DOI: 10.12737/article_5b6d5863076c49.45633399

7. Antonenko, M.V. The effect of titanium dioxide sol stabilizer on the properties of photocatalytic composite material / M.V. Antonenko, Y.N. Ogurtsova, V.V. Strokova, E.N. Gubareva // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 95. – P. 16–22. – DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_3.

8. Sirota, V.V. TiO₂ coatings on the surface of buildings structural elements / V.V. Sirota, S.V. Zaitsev, M.V. Limarenko, D.S. Prochorenkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 945 (1). – Article number 012084. – DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012084.

9. Antonenko, M.V. Photocatalytic active self-cleaning cementbased materials. Compositions, properties, application / M.V. Antonenko, Yu.N. Ogurtsova, V.V. Strokova, E.N. Gubareva // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. – 2020. – Iss. 3. – P. 16–25. – DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25.

10. Bondarenko, A.V. Functional building materials for passive degradation of organic air pollutants / A.V. Bondarenko, B.A. Bondarev, P.V. Borkov, M.L. Ruello, V.V. Bondarenko // *Construction Materials*. – 2023. – Iss. 1–2. – P. 4–10. – DOI: 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-4-10.

11. Kovaleva, M. Effect of processing parameters on the microstructure and properties of WC–10Co–4Cr coatings formed by a new multi-chamber gas-dynamic accelerator / M. Kovaleva, Y. Tyurin, N. Vasilik, O. Kolisnichenko, M. Prozorova, M. Arsenko, M. Yapyntsev, V. Sirota, I. Pavlenko // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41 (10). – P. 15067–15074. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.169.

12. Seremak, W. Preliminary study on low-pressure cold spray process parameters: effect on mechanical and photocatalytic properties of TiO₂ coatings / W. Seremak, M. Jasiorski, A. Baszczuk, M. Winnicki // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2023. – 14 p.

13. Sirota, V. NiB–CrC Coatings prepared by magnetron sputtering using composite ceramic NiCr–BC target produced by detonation spray coating / V. Sirota, S. Zaitsev, D. Prokhorenkov, M. Limarenko, A. Skiba, M. Kovaleva // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, Iss. 20. – 13 p. – DOI:10.3390/nano12203584.

14. Sirota, V. Detonation Spraying of Composite Targets Based on Ni, Cr and B4C for Magnetron Multi-Functional Coating / V. Sirota, S. Zaitsev, D. Prokhorenkov, M. Limarenko, A. Skiba, M. Kovaleva // *Key Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 909. – P. 115–120. – DOI: 10.4028/p-74w31h.

15. Chmielewski, T. Selected properties of Ti coatings deposited on ceramic AlN substrates by thermal spraying / T. Chmielewski, D. Golański // *Welding International*. – 2013. – Vol. 27, Iss. 8. – P. 604–609. – DOI: 10.1080/09507116.2011.606146.

УДК 691.217/.33–492:661.3

DOI 10.54734/20722958_2023_4_49

*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**Тарасеева Нелли Ивановна,**кандидат технических наук, доцент
кафедры «Геотехника и дорожное
строительство»

E-mail: gds@pguas.ru

Грачева Юлия Вячеславовна,кандидат технических наук, доцент
кафедры «Геотехника и дорожное
строительство»

E-mail: gds@pguas.ru

Махамбетова Камажай Нурабуллаевна,кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

E-mail: gds@pguas.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**Taraseeva Nelly Ivanovna,**Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department "Geotechnics and Road
Construction"

E-mail: gds@pguas.ru

Gracheva Yulia Vyacheslavovna,Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department "Geotechnics and Road
Construction"

E-mail: gds@pguas.ru

Makhambetova Kamazhay Nurabullayevna,Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department "Technology of Building
Materials and Woodworking"

E-mail: gds@pguas.ru

ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ СЫРЬЯ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Н.И. Тарасеева, Ю.В. Грачева, К.Н. Махамбетова

Внедрение современных проектных решений в строительство невозможно без усовершенствования материальной и технической базы. Увеличение объемов производства связано с поиском альтернативных видов сырья. Поэтому актуальным является исследование возможности использования пока мало востребованных, но повсеместно распространенных кремнеземсодержащих пород.

Экспериментальная часть представлена 9 комбинациями составов: подобраны добавки-модификаторы, способные стабилизировать структуру геосинтетических материалов с целью повышения коэффициента водостойкости. Рассмотрена возможность замены дорогостоящей щелочи щелочными солями (Na_2CO_3 , K_2CO_3) по результатам исследования реакционных процессов. На основе использования регенируемой щелочи в теле вяжущего при реакции каустификации соды известью осуществлен синтез цементирующих новообразований из различных порошков. Изготовление опытно-промышленной партии вибропрессованных тротуарных блоков подтвердило высокую практическую значимость приведенного подхода.

Ключевые слова: геосинтетическое вяжущее, грунтосиликаты, длительная водостойкость, добавка-модификатор, кремниевая кислота, дорожное строительство, тротуарные блоки

GEOSYNTHETIC BINDERS AS ALTERNATIVE TYPES OF RAW MATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION

N.I. Taraseeva, Yu.V. Gracheva, K.N. Makhambetova

The introduction of modern design solutions in building is impossible without the improvement of materials and technical base. The increase in production volumes is associated with the search for alternative types of raw materials. The task of this work is to study the possibility of using little demanded but widespread silica-containing rocks.

The experimental part is represented by 9 combinations of compositions: additives-modifiers were selected to stabilize the structure of geosynthetic materials and increase the coefficient of water resistance. In this work, reaction processes are considered in order to determine the possibility of

replacing expensive alkali with alkaline salts (Na_2CO_3 , K_2CO_3). The synthesis of cementing neoplasms from various powders was carried out due to the use of regenerated alkali in the body of the binder during the reaction of causticization of soda with lime. The practical significance of this was confirmed during the manufacture of a pilot batch of vibrocompressed paving blocks.

Keywords: geosynthetic binder, long-term water resistance, pre-binder modifier, silicic acid, road construction, sidewalk blocks

Активное развитие промышленности строительных материалов связано не только с использованием природных, но и синтезированием/получением новых композитов. В связи с этим важное значение имеет исследование свойств используемых материалов, а также их изменений в процессе всего жизненного цикла объекта. При этом условия и специфика формирования структуры композита оказывают большое влияние на свойства материалов и выбор технологии [1...3].

Дорожно-строительные материалы и изделия, как и основание, на которое они укладываются, имеют неоднородные свойства. В частности, к важнейшим физическим свойствам, которые характеризуют состояние материала или определяют его отношение к воздействиям окружающей среды, относятся плотность, пористость и пустотность, влияющие на водонасыщение, водопоглощение и, как результат, морозостойкость. На городских дорогах и мостах / путепроводах наиболее подвержены воздействиям влаги участки сопряжения с тротуарами вдоль ливневой канализации. Применение геосинтетических вяжущих, разработанных авторами на основе местного сырья, для изготовления бордюрного камня позволит не только сохранить границу раздела между проезжей частью и пешеходной, но и защитить основные элементы дорожного покрытия от чрезмерного увлажнения в период повышенного количества осадков, а также в случае техногенного воздействия (аварийного подтопления) и, как результат, повысить безопасность дорожного и пешеходного движения.

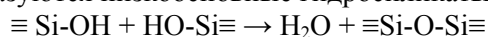
Нами исследованы пути рационального использования молотых горных пород вулканического и осадочного происхождения. В [3...6] рассмотрены безобжиговые минерально-шлаковые вяжущие на основе использования глин, известняков, доломитов, молотого гравия, кремнеземистых и глауконитовых песчаников, базальта, диабазы, гранита, сиенита, диорита. Установлено, что многие молотые горные породы при взаимодействии со щелочным активизатором (2–3 % щелочи) или смесью извести и соды в прессованных условиях способны к образованию твердеющих систем.

Вяжущие, полученные из тонкомолотых осадочных пород, в которых 80–90 % составляет доля минерального порошка и до 20 % – доля шлака, модифицированные реакционно-активными добавками по отношению к кремнекислоте, получили название геосинтетических [3]. В [3...5] установлено, что молотый песчаник при взаимодействии со щелочным раствором проявляет вяжущие свойства.

Для активизации тонкодисперсных осадочных и вулканических пород в данном исследовании применялись следующие методы: введение малых добавок щелочей 2–3 % NaOH и KOH или смеси соды и извести (по 2–3 %); повышение удельной поверхности молотой породы, повышение температуры термохимической активации, введение различных добавок.

Исходя из результатов исследований [7...9] нами принимается гипотеза о механизме твердения геосинтетического вяжущего с учетом процессов гидратации. Установлено, что при взаимодействии аморфного кремнезема со щелочным раствором происходит образование кремнегеля с последующим переходом молекул в олигомеры, т.е. мы наблюдаем увеличение молекулярной массы и образование коллоидных частиц. Именно гель поликремниевой кислоты и обладает вяжущими свойствами [3]. С повышением температуры и в результате реакции коллоидных частиц со щелочью происходит обезвоживание геля с последующим его старением и как результат – затвердевание структуры.

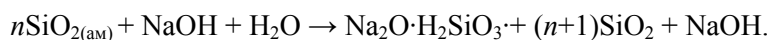
В [3] показана возможная реакция гидратации минералов при наличии Ca^{2+} и OH^- , в результате которой образуются низкоосновные гидросиликаты $\equiv\text{Si-OH}$:



Протекание данной реакции предусматривает достаточное содержание гидроксил-ионов, которые могут обеспечить щелочные основания или гидролизующиеся соли.

Взаимодействие аморфного кремнезема со щелочным раствором протекает по реакции $\text{SiO}_{2(\text{ам})} + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

При малом количестве щелочного компонента процесс протекает по схеме



Технология производства геосинтетических вяжущих предполагает использование в процессе изготовления сырьевой смеси щелочного активизатора NaOH, KOH [3...6]. Дорогостоящую щелочь можно заменить щелочными солями (Na_2CO_3 , K_2CO_3).

Синтез цементирующих новообразований из различных порошков возможен за счет регенерируемой щелочи в теле вяжущего при реакции каустификации соды известью (табл. 1). Обычно для реакции каустификации используются поташ и известь; $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, NaF, Na_2HPO_4 являются побочными продуктами отдельных производств.

В соответствии с [3] для полноценного протекания процесса гидратации вяжущего, включающего поляризацию и разрыв ковалентных связей $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$, можно увеличить дозировку $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ в смеси при уменьшении количества щелочи NaOH. Смесь $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ не может быть полноценной заменой активизатора NaOH.

Т а б л и ц а 1

Каустифицируемые вещества и реакции каустификации известью

Каустифицируемые вещества	Формула	Молекулярная масса	Реакционный процесс	Количество активизатора в г/г $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Выход NaOH в г/г активизатора
Углекислый натрий, калий	Na_2CO_3	106	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3 + 2\text{NaOH}$	1,43	0,75
	K_2CO_3	138	$\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3 + 2\text{KOH}$	1,86	0,81
Тетрагидроксоалюминат натрия	$\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$	118	$2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}[\text{Al}(\text{OH})_4]_2 + 2\text{NaOH}$	3,20	0,34
Тетраборат натрия	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	202	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaB}_4\text{O}_7 + 2\text{NaOH}$	2,73	0,40
Фториды натрия, калия	NaF	42	$2\text{NaF} + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaF}_2 + 2\text{NaOH}$	1,05	0,95
	KF	58	$2\text{KF} + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaF}_2 + 2\text{KOH}$	1,57	0,97
Фосфаты натрия, калия	Na_3PO_4	164	$2\text{Na}_3\text{PO}_4 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 2\text{NaOH}$	1,48	0,73
	K_3PO_4	212	$2\text{K}_3\text{PO}_4 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 2\text{KOH}$	1,91	0,79
Гидроортофосфаты натрия, калия	NaH_2PO_4	120	$2\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + 2\text{NaOH}$	3,24	0,33
	KH_2PO_4	136	$2\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + 2\text{KOH}$	3,68	0,41
	Na_2HPO_4	142	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaH}_2\text{PO}_4 + 2\text{NaOH}$	1,92	0,56
	K_2HPO_4	158	$\text{K}_2\text{HPO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaH}_2\text{PO}_4 + 2\text{KOH}$	2,14	0,71
Натрий, калий углекислый	$\text{KNaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	230	$\text{KNaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCO}_3 + \text{NaOH} + \text{KOH} + 6\text{H}_2\text{O}$	3,11	0,46

По [3...5] кремнеземистые породы, состоящие из тонкодисперсного кварца, сцементированного высокоактивными опаловидными разновидностями кремнезема, взаимодействуют с добавкой щелочи; цементируются кремнекислотой. Получается

высокопрочный камень с пределом прочности на сжатие до 100–150 МПа со способностью сохранять прочность в воздушно-сухих условиях на протяжении многих десятилетий (следует помнить: при воздействии воды происходит саморазрушение в процессе набухания геля кремнекислоты). В [3...5] представлен подбор добавок-модификаторов, способных вступать в реакцию с коллоидными частицами кремнекислоты с образованием устойчивых к воде соединений.

Нами методом полусухого прессования при $P=25$ МПа, содержании NaOH 7 % и влажности 14 % изготавливались образцы-кубы диаметром и высотой 50 мм на основе двух видов песчаников Пензенской области: кремнеземистого (архангельского) и глауконитового. В качестве добавок-модификаторов использовали: тонкомолотый шлак в дозировке 20 %, комплекс «тонкомолотый шлак 20 % + гидроксид алюминия 5 %» и комплекс «тонкомолотый шлак 20 % + гидроксид алюминия 5 % + вулканический дацит 50 %». Образцы подвергались тепловой обработке: увеличение температуры в течение 4 часов, изотермическая выдержка при $t_{из} = 140$ °С – 6 часов, естественное остывание – 4 часа; составы смесей и результаты испытаний представлены табл. 2.

Т а б л и ц а 2

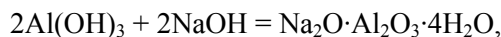
Составы смесей и результаты испытаний

№ п/п	Соотношение компонентов вяжущего, %	Прочность при сжатии, МПа, после ТО при $t_{из} = 140$ °С	Прочность при сжатии, МПа Коэффициент водостойкости, через ... суток водонасыщения			
			3	90	120	180
1	2	3	4	5	6	7
1	Песчаник архангельский – 100	131,2	$\frac{52,5}{0,4}$	Образцы саморазрушились		
2	Песчаник архангельский – 80, шлак липецкий – 20	84,5	$\frac{75,2}{0,89}$	$\frac{64,2}{0,76}$	$\frac{57,5}{0,68}$	$\frac{30,4}{0,36}$
3	Песчаник архангельский – 75, шлак липецкий – 20, Al(OH) ₃ – 5	72,8	$\frac{64,8}{0,89}$	$\frac{59,7}{0,82}$	$\frac{58,2}{0,8}$	$\frac{40,1}{0,55}$
4	Песчаник архангельский – 50, шлак липецкий – 20, Al(OH) ₃ – 5, дацит – 50	53,4	$\frac{48,6}{0,91}$	$\frac{46,5}{0,87}$	$\frac{47,5}{0,89}$	$\frac{55,0}{1,03}$
6	Песчаник глауконитовый – 100	89,8	$\frac{17,8}{0,2}$	Образцы саморазрушились		
7	Песчаник глауконитовый – 80, шлак липецкий – 20	73,2	$\frac{59,3}{0,81}$	$\frac{52,0}{0,71}$	$\frac{44,7}{0,61}$	$\frac{22,9}{0,31}$
8	Песчаник глауконитовый – 75, шлак липецкий – 20, Al(OH) ₃ – 5	36,7	$\frac{31,6}{0,86}$	$\frac{29,0}{0,79}$	$\frac{30,8}{0,84}$	$\frac{25,3}{0,69}$
9	Песчаник глауконитовый – 50, шлак липецкий – 20, Al(OH) ₃ – 5, дацит – 50	44,2	$\frac{41,1}{0,93}$	$\frac{34,9}{0,79}$	$\frac{44,6}{1,01}$	$\frac{50,4}{1,14}$

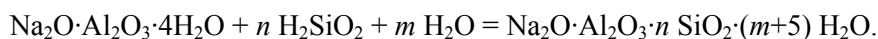
У бездобавочных образцов (составы 1, 6) через 3 суток водонасыщения коэффициенты водостойкости соответственно равны 0,4 и 0,2; после 3 суток происходит саморазрушение образцов. Введение добавок в состав вяжущего способствовало снижению прочностных показателей относительно бездобавочных образцов. Комплексное введение в сырьевую смесь 20 % шлака и 10 % $Al(OH)_3$ привело к значительному снижению прочностных характеристик. Добавки-модификаторы снижают прочность перколяционного каркаса геосинтетического вяжущего. Наблюдалась положительная тенденция роста коэффициента водостойкости.

Разработанные составы рекомендуются как альтернатива применению геосинтетической решетки в дорожном строительстве. Так, при срезке увлажненного грунта под основанием насыпи земляного полотна (например, на торфянике) их можно смешивать с грунтом для образования водонепроницаемого слоя или использовать в качестве гидроизоляции наружных стен подземной части здания или транспортного сооружения. Желаемый эффект пропорционален увеличению количественного содержания добавок. Через 120 суток коэффициент водостойкости образцов, модифицированных комплексной добавкой «20 % шлака + 10 % $Al(OH)_3$ », достигает 0,74–0,82, через 180 суток – 0,34–0,55. У образцов из смеси двух пород (песчаник и дацит с добавкой), модифицированных тонкомолотым шлаком и гидроксидом алюминия, наблюдались наихудшие прочностные характеристики. Потеря в прочности составила более чем 2,5 раза (составы 4, 9), но при этом у них лучшие показатели по долговременному водонасыщению модифицированного композита. Коэффициент водостойкости через 120 суток равен 0,89–1,01, через 180 суток – 1,03–1,14. Вероятно, это объясняется образованием гидроалюмосиликатов натрия и кальция в результате реакции гидроксида алюминия со щелочью и кремнекислотой в структуре композитов. Эти соединения стабилизировали структуру геокомпозитов в воде и обеспечили длительную водостойкость.

Реакция взаимодействия гидроксида алюминия с гидроксидом натрия с образованием гидроксоалюмината натрия имеет вид



а реакция взаимодействия гидроксоалюмината натрия с активным кремнеземом с образованием гидроалюмосиликатов натрия осуществляется по схеме



Исследования химико-минералогического состава полученных композиционных материалов показали, что в сильной щелочной среде в присутствии гидроксида алюминия силикаты могут образовывать соединения водных алюмосиликатов натрия.

Нами разрабатывались варианты использования известково-содовой смеси, каустифицированной в теле композита, вместо щелочи для получения каустифицированных геосинтетических вяжущих и материалов на их основе. Подбирались добавки-модификаторы, способные стабилизировать структуру геосинтетических материалов и повысить их коэффициент водостойкости через 2 суток до 0,9–0,95, через 380 суток – до 1,03–1,14 (подтверждается возможность использования при производстве гидравлических вяжущих веществ).

Учитывая актуальность вопросов благоустройства городской и загородной инфраструктуры, а также с целью оценки практической значимости выполненных исследований была изготовлена опытно-промышленная партия вибропрессованных блоков на основе геошлакового вяжущего (75 % молотого песчаника, 20 % молотого липецкого шлака, 5 % $Al(OH)_3$), песка и щебня. При изготовлении данной опытно-промышленной партии тротуарных блоков, полученных методом полусухого прессования и подверженных тепловой обработке, а также долговременному водонасыщению, была использована сырьевая смесь «вяжущее : песок : крупный заполнитель» в пропорциях по массе: 1:1:1,5. Свойства смеси (главным образом – механические, физические и химические; при производстве материалов – технологические) определялись в процессе лабораторных, полевых и производственных испытаний.

По результатам испытаний установлена целесообразность использования рассмотренных сырьевых смесей для улучшения физико-механических свойств и повышения качества блоков, снижения себестоимости продукции. Практика изготовления изделий показала возможность получения сухих смесей на основе геошлакового вяжущего.

Выводы

Исследованы геосинтетические вяжущие как альтернативные виды сырья для дорожного строительства. Подобраны добавки-модификаторы, способные стабилизировать структуру геосинтетических материалов с целью повышения коэффициента водостойкости, для 9 комбинаций составов.

Проанализирована возможность получения активизированного геошлакового вяжущего на основе молотого песчаника из отсевов камнедробления, а также вибропрессованных изделий повышенного качества с высокими физико-механическими характеристиками и достаточной долговечностью.

Показана целесообразность применения геошлакового вяжущего из отсевов камнедробления с существенным снижением себестоимости выпускаемой продукции по сравнению с цементным вяжущим с одновременным повышением рентабельности производства и с улучшением экологической обстановки по региону.

Разработанное вяжущее использовалось при изготовлении бордюрных и тротуарных блоков, кирпичей, элементов архитектурных деталей и т.д.

Показана возможность замены дорогостоящей щелочи щелочными солями (Na_2CO_3 , K_2CO_3) на основе изучения реакционных процессов. На основе использования регенерируемой щелочи в теле вяжущего при реакции каустификации соды известью осуществлен синтез цементирующих новообразований из различных порошков.

Список литературы

1. Будылина, Е.А. Системный анализ как методология решения проблем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №2(55). – С.14–20.
2. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32. – DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-2-25-32.
3. Грачева, Ю.В. Длительная водостойкость модифицированных геосинтетических вяжущих для дорожного строительства / Ю.В. Грачева, Н.И. Тарасеева, Н.М. Иванов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №1. – С.63–69.
4. Грачева, Ю.В. Теоретические и технологические аспекты получения низкощелочных геосинтетических вяжущих и развитие методологии оценки их долговечности: моногр. / Ю.В. Грачева. – Пенза: ПГУАС, 2020. – 160 с.
5. Тарасеева, Н.И. Каустифицированные геосинтетические вяжущие для дорожного строительства / Н.И. Тарасеева, Ю.В. Грачева, А.С. Крылов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2021. – №1(12). – С. 20–26.
6. Тарасеева, Н.И. Твердение цементных композиций с добавками на основе отходов предприятий энергетики / Н.И. Тарасеева, А.В. Воскресенский, С.А. Киселева // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5–2 (38). – С. 382–385.
7. Дергунов, С.А. Создание современных строительных материалов и технологические процессы строительства автомобильных дорог и транспортных сооружений / С.А. Дергунов, А.Б. Сатюков, С.В. Сериков, М.С. Гаркави, Г.В. Федосеенко, М.А. Ганенко, А.Ю. Спирина, А.К. Мазепа, А.С. Латыпова, Е.П. Орехова, В.Д. Лебеденко, П.А. Беляев // Отчет о НИР № 075-15-2021-1171 от 30.09.2021. – М.: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 2022.
8. Береговой, В.А. Перспективы импортозамещения сырьевых компонентов высококачественного дисперсно-армированного бетона и исследование его физико-механических свойств / В.А. Береговой, К.Н. Махамбетова, И.Ю. Лавров, Ф.А. Вос-

токов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2023. – №1(16). – С. 16–21.

9. Шитова, И.Ю. Водопоглощение и водостойкость композиционных материалов на аппретированном наполнителе / И.Ю. Шитова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – № 2 (9). – С. 225–231.

References

1. Budylna, E.A. System Analysis as a Problem Solving Methodology / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – No. 2 (55). – P.14–20.

2. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32. – DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-2-25-32.

3. Gracheva, Yu.V. Long-term water resistance of modified geo-synthetic binders for road construction / Yu.V. Gracheva, N.I. Taraseeva, N.M. Ivanov // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1. – P.63–69.

4. Gracheva, Yu.V. Theoretical and technological aspects of obtaining low-alkaline geosynthetic binders and the development of the methodology for assessing their durability: monogr. / Yu.V. Gracheva. – Penza: PGUAS, 2020. – 160 p.

5. Taraseeva, N.I. Caustic geosynthetic binders for road construction / N.I. Taraseeva, Yu.V. Gracheva, A.S. Krylov // Vestnik PGUAS: construction, science and education. – 2021. – No.1(12). – P. 20–26.

6. Taraseeva, N.I. Hardening of cement compositions with additives based on waste from energy enterprises / N.I. Taraseeva, A.V. Voskresensky, S.A. Kiseleva // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2011. – № 5–2 (38). – P. 382–385.

7. Dergunov, S.A. Creation of modern building materials and technological processes for the construction of highways and transport structures / S.A. Dergunov, A.B. Satyukov, S.V. Serikov, M.S. Garkavi, G.V. Fedoseenko, M.A. Ganenko, A.Yu. Spirina, A.K. Mazepa, A.S. Latupova, E.P. Orekhova, V.D. Lebedenko, P.A. Belyaev // Research and Development Report No. 075-15-2021-1171 dated 30.09.2021. – M.: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, 2022.

8. Beregovoy, V.A. Prospects for import substitution of raw material components of high-quality dispersed reinforced concrete and research of its physical and mechanical properties / V.A. Beregovoy, K.N. Makhambetova, I.Yu. Lavrov, F.A. Vostokov // Vestnik PGUAS: construction, science and education. 2023. – №1(16). – P. 16–21.

9. Shitova, I.Yu. Water absorption and water resistance of composite materials on finished filler / I.Yu. Shitova // Education and science in the modern world. Innovation. – 2017. – № 2 (9). – P. 225–231.

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

Лавров Иван Юрьевич,
аспирант

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Lavrov Ivan Yurievich,
Postgraduate

Beregovoy Vitaly Aleksandrovich,
Doctor of Science, Professor, Head of the
Department «Building Materials and
Woodworking Technology»

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ

И.Ю. Лавров, В.А. Береговой

Разработан лабораторный комплекс для исследования вибродинамических показателей бетонов, применяемых в конструктивных элементах станков и промышленного оборудования. Для определения динамического модуля упругости и демпфирующих характеристик использован метод вынужденных колебаний, фиксирующий их изменение после продолжительного динамического воздействия с заданными параметрами. Выбор консольной схемы закрепления образцов обеспечил эффективную оценку отклика работы образцов при генерации поперечных колебаний в частотном диапазоне 0-1000 Гц.

Ключевые слова: цементные бетоны, промышленное оборудование, базовые детали, вибродинамические показатели, лабораторный комплекс, демпфирование

LABORATORY COMPLEX FOR THE STUDY OF VIBRODYNAMIC PARAMETERS OF STRUCTURAL CONCRETE

I.Yu. Lavrov, V.A. Beregovoy

A laboratory complex has been developed for the study of hydrodynamic parameters of structural concrete. To determine the dynamic modulus of elasticity and damping characteristics, a method of forced oscillations was used, which records their change after prolonged dynamic action with specified parameters. The cantilever pattern of fixing the samples provided an effective assessment of the response of the samples when generating transverse oscillations in the frequency range of 0-1000 Hz.

Keywords: cement concretes, industrial equipment, basic parts, aerodynamic parameters, laboratory complex, damping

Введение. Современные тенденции роста точности и производительности промышленного оборудования сопровождаются дополнением перечня требований, предъявляемых к материалам конструкций, за счет учета их влияния на интегральные вибродемпфирующие показатели технологической системы. Наряду с этим остается актуальной проблема снижения металлоемкости промышленного оборудования, предполагающая разработку и внедрение опережающими темпами базовых элементов, изготовленных из цементных и полимерных бетонов [1–3]. Использование бетонов в области машиностроения сдерживается отсутствием систематизированной информации о закономерностях влияния рецептурно-технологических факторов на характер распространения волн внутренних напряжений различной частоты и амплитуды по структуре материала, работающего под нагрузкой.

Проблематика, связанная со спецификой поведения бетона в условиях динамического нагружения, изложена в ряде ранее опубликованных работ. Публикации посвящены как вопросам ударного или низкочастотного воздействия [4], так и распространению в бетоне высокочастотных [5] и ультразвуковых колебаний [6]. Расчетные значения, полученные нами с использованием справочных данных, указывают на значительную долю частот промышленных вибраций, лежащих в диапазоне 100-1000 Гц [7], при этом аналогичный параметр для металлорежущих станков составляет 60-800 Гц [8]. Это позволило уточнить технические требования к разрабатываемому испытательному комплексу: он должен обеспечивать эффективную генерацию поперечных колебаний и корректную фиксацию отклика испытываемых образцов в диапазоне частот 0-1000 Гц. Далее конфигурацию образцов и особенности их закрепления подбирали расчётно-экспериментальным путём, исходя из условия расположения резонансных частот в середине указанного диапазона.

Вибродинамические свойства материалов определяют методами затухающих [9, 10] или вынужденных колебаний (резонансный метод) [5, 11–13]. Последний является более информативным: наряду с динамическим модулем упругости и демпфирующими характеристиками фиксируется их изменение после продолжительного динамического воздействия. Это обуславливает возможность проведения оценки важнейшего дополнительного показателя – вибростойкости материала. В исследованиях вибродинамических свойств материалов при воздействии поперечных колебаний применяют свободное размещение образца на опорах [5, 10, 11] или его консольное закрепление [9, 14].

С учетом результатов реперных экспериментов для проведения дальнейших исследований выбраны образцы-балочки размерами 300×19×28 мм, испытываемые по консольной схеме. Блок-схема вибрационных испытаний образцов из мелкозернистого бетона приведена на рис. 1.

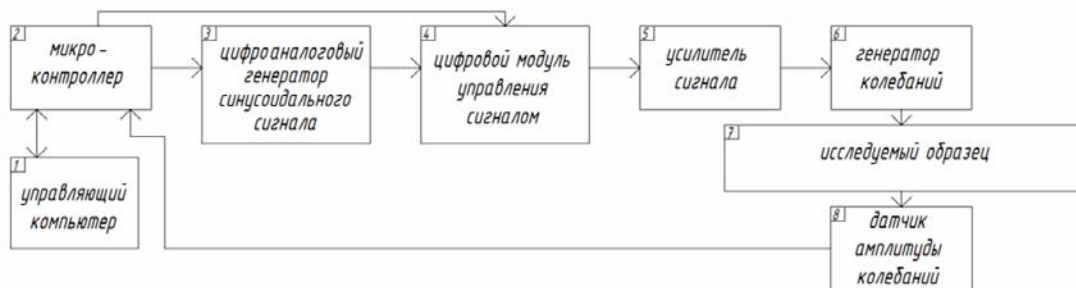


Рис. 1. Блок-схема вибрационных испытаний

Основой элементной базы является микроконтроллер ESP32 (2 на схеме), соединённый через последовательный порт с управляющим компьютером (1). К запрограммированному микроконтроллеру посредством интерфейса SPI подключен модуль генератора синусоидального сигнала заданной частоты на базе микросхемы AD9833 (3), на котором автоматически задаются необходимая частота и форма сигнала. Амплитуда выходного сигнала регулируется микроконтроллером через цифровой делитель напряжения X9C103S (4) в зависимости от целей исследования и виброотклика испытываемого образца (7). В случае использования усилителя с цифровым управлением степень усиления делитель напряжения не применяется. Аналоговый сигнал заданной амплитуды передаётся на усилитель (5) и затем подаётся на генератор колебаний.

С учетом сложности процессов, сопровождающих исследование вибродинамических свойств материала, были опробованы все основные способы возбуждения колебаний: электромеханический (с помощью виброгенератора); электромагнитный (с помощью электромагнита и приклеенной к образцу стальной пластины); акустический (с помощью источника звуковых волн).

На первом этапе был выбран электромеханический способ. Колебания образца регистрировались датчиком, тип которого выбирался исходя из анализируемого диапазона частот: до 1000 Гц использовался MEMS-акселерометр; свыше – индуктивные и пьезоэлектрические датчики. Преимуществом применения цифрового акселерометра является возможность прямого вычисления виброперемещения и виброскорости гармонически колеблющейся точки по данным её максимального ускорения без необходимости калибровки датчика. Виброперемещение (S , мкм) определялось по формуле

$$S = \frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot A}{\pi^2 \cdot f^2}, \quad (1)$$

где A – виброускорение в м/с^2 ; f – частота в Гц.

Виброскорость (V , мм/с) вычислялась по следующей формуле:

$$V = \frac{\pi \cdot f \cdot S}{500}, \quad (2)$$

где S – виброперемещение, мкм.

Схема испытаний методом вынужденных колебаний при консольном закреплении образца показана на рис. 2.

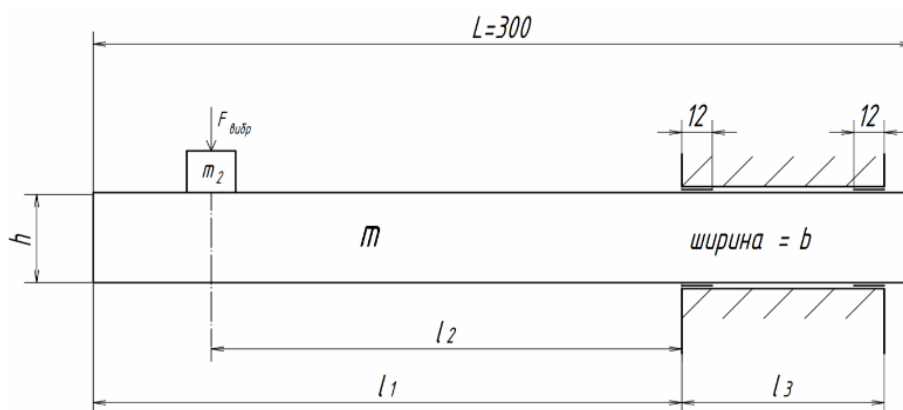


Рис. 2. Схема испытаний методом вынужденных колебаний

На рис. 3 приведена общая схема спроектированной испытательной установки. С целью снижения себестоимости и трудоемкости было предусмотрено изготовление станины способом литья из самоуплотняющегося бетона ($R_{сж}=80$ МПа).

Акселерометр и виброгенератор крепятся к образцу посредством двух крепежных пластин (4 на схеме рис. 3), стягиваемых винтами.

На следующем этапе производилось численное моделирование работы образцов под вибрационной нагрузкой (ПО Solidworks Simulation). Модель строилась для схемы испытаний на рис. 2. В качестве граничных условий задавалось отсутствие перемещения в местах контакта зажимных зажимов и образца, а узел крепления датчика и виброгенератора моделировался как прикрепленная масса (m_2). Модальный анализ 3D-модели образца выполнялся по следующим вводным данным: $E=48$ ГПа; $\rho=2360$ кг/м³; $m_2=0.058$ кг; $l_1=220$ мм; $l_2=205$ мм; $h=19$ мм; $b=28$ мм. На рис. 6 представлены моды, соответствующие первым пяти собственным резонансным частотам образца. В таблице приведены результаты модального анализа для диапазона частот 0–20 кГц, что соответствует возможностям используемого генератора колебаний.

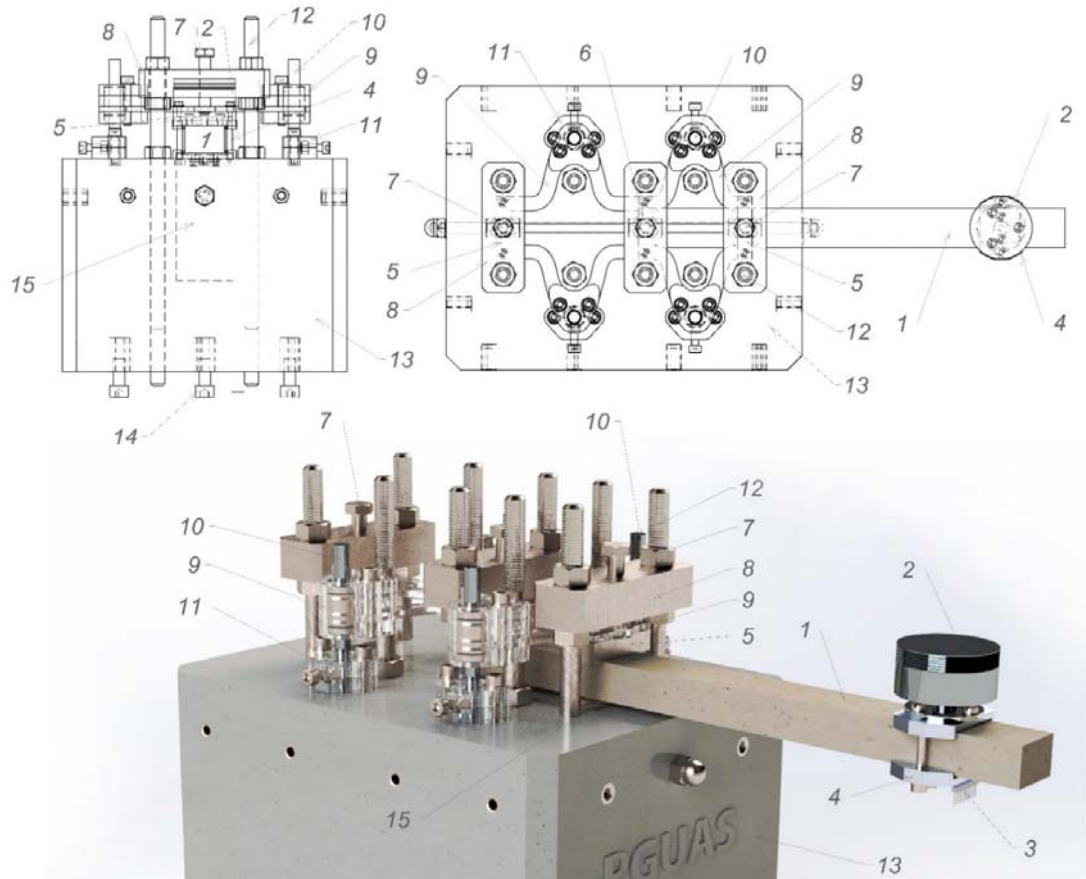


Рис. 3. Схема установки:

1 – образец; 2 – виброгенератор; 3 – акселерометр; 4 – крепление; 5 – передняя прижимная губка; 6 – задняя прижимная губка; 7 – зажимной винт; 8 – траверса; 9 – позиционирующая пластина; 10 – направляющая; 11 – опора направляющей; 12 – крепежная штанга; 13 – бетонная станина; 14 – регулируемая опора; 15 – нижняя опорная губка

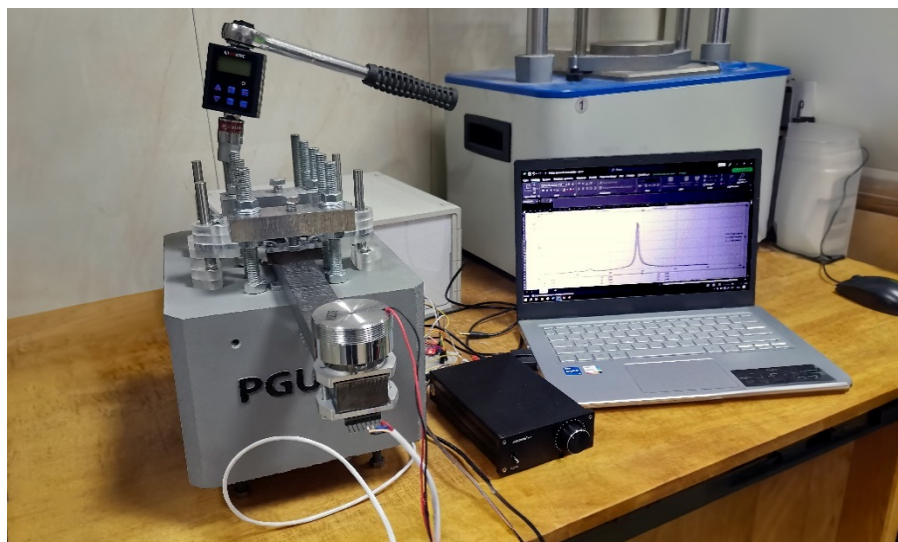


Рис. 4. Общий вид лабораторного комплекса для динамических испытаний строительных материалов

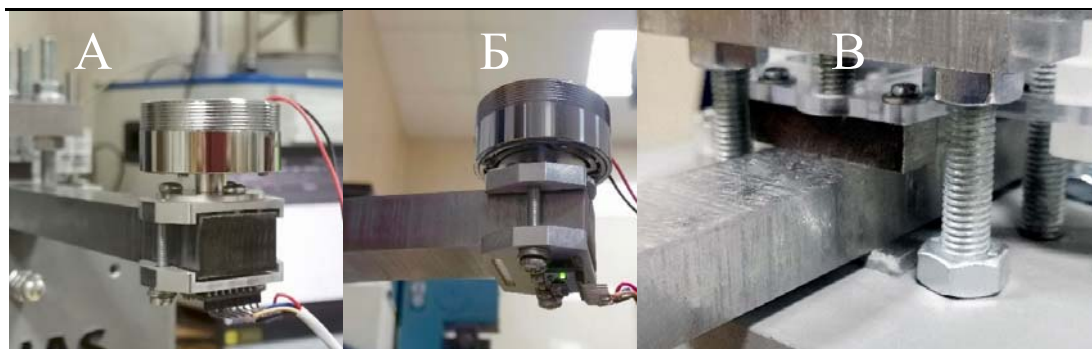


Рис. 5. Лабораторный комплекс для динамических испытаний материалов:
 А, Б – закрепление виброгенератора и датчика на испытываемом образце;
 В – узел закрепления образца в испытательной установке

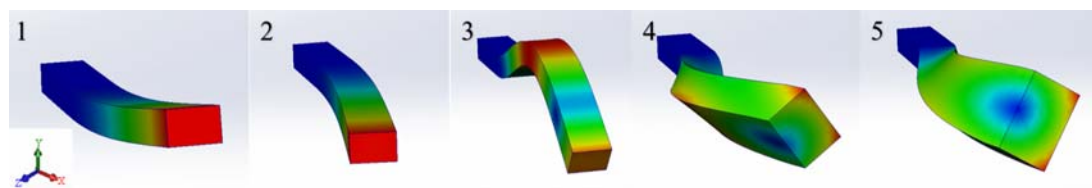


Рис. 6. Результаты модального анализа образца бетона

Т а б л и ц а 1

Результаты модального анализа образца бетона

№ режима	Частота, Гц	EMPF (X)	EMPF (Y)	EMPF (Z)
1	229	1.96E-05	0.49937	1.54E-07
2	337	5.62E-09	1.05E-07	0.50537
3	1599	0.00034428	0.13485	6.63E-09
4	2237	1.73E-08	3.00E-08	0.090854
5	2348	1.97E-08	1.31E-07	0.047449
6	4358	0.36995	0.0192	1.13E-08
7	4530	0.2687	0.025761	4.43E-08
8	6117	4.52E-07	9.80E-09	0.045386
9	7503	8.75E-11	9.30E-08	5.62E-05
10	8284	0.00087733	0.022265	6.77E-08
11	11000	2.52E-07	6.79E-08	0.02143
12	12605	0.0055146	0.012507	1.71E-07
13	13290	3.91E-07	2.98E-09	8.50E-07
14	13869	0.070849	0.00094463	2.86E-07
15	16295	2.34E-07	2.91E-07	0.0073503
16	17297	1.08E-05	0.11993	1.97E-07
17	17458	0.00066325	0.019894	3.92E-08
18	17700	1.31E-08	8.26E-08	0.15527
19	19236	3.73E-08	1.65E-09	0.00010515

Результаты модального анализа обосновывают выбор для дальнейших исследований первого режима колебаний, которому соответствует наибольший действительный коэффициент массового участия (EMPF) в вертикальном направлении, а резонансная частота расположена в выбранном ранее диапазоне.

Для создания колебаний использовался виброгенератор (см. рис.5А,Б) мощностью 25 Вт (при 10 В) с комплексным сопротивлением 4 Ом (при 1 кГц; 1В) и собственной резонансной частотой (60±5) Гц. Далее выполнялся гармонический анализ. Предварительно в качестве эталона был испытан образец из стали ($E=210$ ГПа; $\rho=7850$ кг/м³).

Модуль упругости определялся итерационным методом с помощью программных инструментов оптимизации до совпадения фактической и определенной при моделировании резонансных частот и составил 211.3 ГПа, что соответствует исходным данным. Для вычисления логарифмического декремента затухания данные ускорения с датчика пересчитывались в значения виброперемещения по формуле (1). Результаты представлены на рис. 7. Общий вид графиков согласуется с теоретическими данными [15] и результатами других исследователей [12,13]. С помощью эталонного образца устанавливалась взаимосвязь между коэффициентом усиления сигнала, передающегося на виброгенератор, и значением эквивалентной силы вибровоздействия ($F_{\text{вibr}}$).

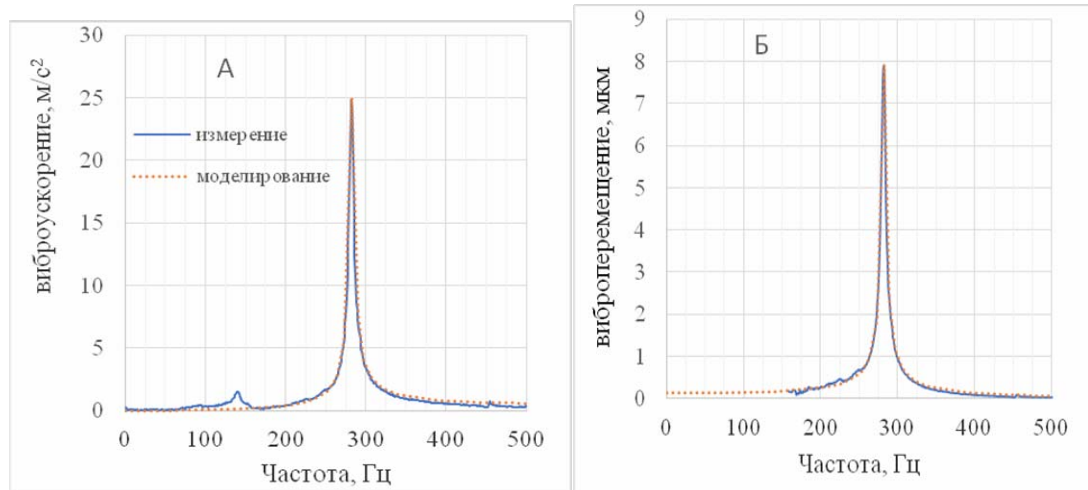


Рис. 7. Графики отклика стального образца при вибрационных испытаниях:
А – виброускорение; Б – виброперемещение

При резонансном методе для вычисления логарифмического декремента затухания (δ) использовалось выражение

$$\delta = \frac{\pi \cdot \left| \frac{A \cdot f^2}{A_r \cdot f_r^2} - \frac{A}{A_r} \right|}{\sqrt{\left| \frac{A^2 \cdot f^2}{A_r^2 \cdot f_r^2} - 1 \right|}}, \quad (3)$$

где f – выбранная частота колебаний, Гц; f_r – частота резонанса, Гц; A – амплитуда колебаний при частоте f ; A_r – амплитуда колебаний при резонансе.

Поскольку связь между логарифмическим декрементом затухания и относительным коэффициентом затухания выражается формулой

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \approx 2\pi\zeta, \quad (4)$$

то формула для вычисления относительного коэффициента затухания имеет вид

$$\zeta \approx \frac{\left| \frac{A \cdot f^2}{A_r \cdot f_r^2} - \frac{A}{A_r} \right|}{2 \cdot \sqrt{\left| \frac{A^2 \cdot f^2}{A_r^2 \cdot f_r^2} - 1 \right|}}, \quad (5)$$

На рис. 8 приведены результаты испытаний образца бетона. Относительный коэффициент затухания (ζ) определялся по формуле (5).

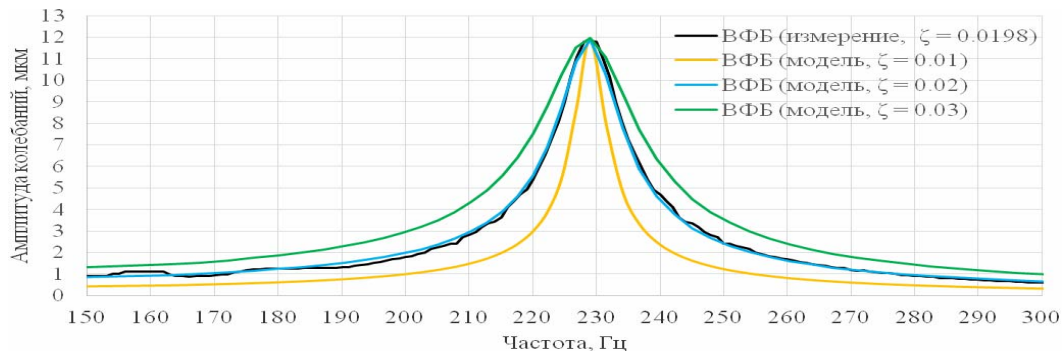


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика образца бетона и моделей с заданными значениями ζ

На рис. 9 представлены результаты вычисления величины ζ образца бетона по результатам эксперимента, а также по полученным данным цифровой модели (см. рис. 8). При расчёте на основе экспериментальных данных для получения более точных результатов рациональнее использовать частоты, соответствующие диапазону $\frac{A}{A_r} = 0,2 \dots 0,7$, что было установлено при исследованиях образцов из различных материалов и видно на графике (рис. 9 Б).

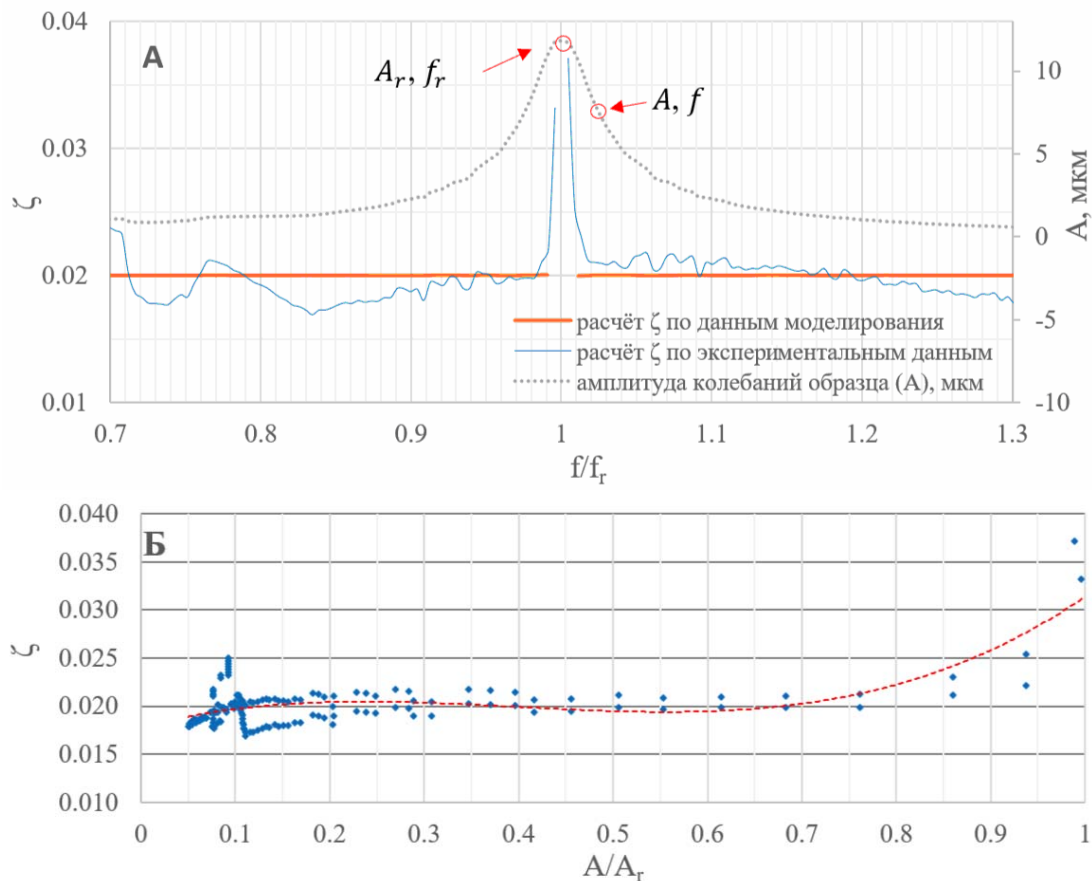


Рис. 9. Результаты определения относительного коэффициента затухания

По результатам анализа экспериментальных данных был усовершенствован программный код микроконтроллера для фиксации и анализа данных в автоматическом режиме.

1) Генерация сигнала со ступенчато изменяющейся частотой в диапазоне 100-500 Гц с шагом 10 Гц и продолжительностью ступени 0.05 с. На каждой ступени по резуль-

татам опросов датчика вычисляется средний максимум ускорения по вертикальной оси. На этом этапе производится полное экспресс-сканирование во всем диапазоне частот и предварительно определяется область резонанса.

2) Генерация сигнала со ступенчато изменяющейся частотой в диапазоне ± 50 Гц от f_r с шагом 0.1 Гц и продолжительностью ступени 0.1 с. По результатам 10 итераций строится резонансный пик, определяется резонансная частота, и вычисляется среднее значение ζ на основе частот, соответствующих диапазону $A / A_r = 0.2 - 0.7$. Для статистической оценки результатов определяются коэффициенты вариации.

3) Резонансная частота, относительный коэффициент затухания, коэффициенты вариации, а также данные для построения диаграммы отклика передаются в структурированном виде на компьютер и параллельно записываются на карту памяти.

Выводы. Показана техническая возможность создания испытательной системы для вибродинамических исследований бетонов из широкодоступных электронных и электромеханических компонентов.

Определение динамического модуля упругости и демпфирующих характеристик образцов бетона целесообразно проводить с использованием более информативного метода вынужденных колебаний, обеспечивающего инструментарий для фиксации изменения свойств материала после продолжительного динамического воздействия.

Консольная схема закрепления контрольных образцов является оптимальной и позволяет производить эффективную оценку отклика работы материала при генерации поперечных колебаний в частотном диапазоне 0-1000 Гц.

Корректные экспериментальные данные могут быть получены, если параметры программного кода микроконтроллера предусматривают генерацию вибрационного воздействия со ступенчато изменяющейся частотой в диапазоне ± 50 Гц от резонансной частоты с шагом 0.1 Гц и продолжительностью ступени 0.1 с.

Сравнение величин относительного коэффициента затухания образцов бетона по результатам реального эксперимента показало хорошую сходимость с данными, полученными методом численного моделирования (ПО Solidworks Simulation) во всем диапазоне рабочих частот.

Список литературы

1. Калашников, В.И. Применение бетона нового поколения в машиностроении / В.И. Калашников, Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: тез. докл. конф. – Пенза: ПГУАС, 2016. – С. 173–173.
2. Береговой, В.А. Высокофункциональные бетоны в станкостроении: технологические аспекты применения / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 18–25.
3. Хвастунов, В.Л. Об опыте изготовления станины разрывной малогабаритной установки из высокопрочного реакционно-порошкового бетона с низким удельным расходом цемента на единицу прочности / В.Л. Хвастунов, К.Н. Махамбетова, И.Ю. Лавров, А.В. Хвастунов // Вестник ПГУАС: строительство наука и образование. – 2021. – № 1 (12). – С. 50–56.
4. Баженов, Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1970. – 271 с.
5. Замчалин, М.Н. Использование компьютера для обеспечения работы измерительной установки определения динамического модуля упругости бетона / М.Н. Замчалин, М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина // Современная техника и технологии. – 2014. – № 12.
6. Колохов, В.В. Некоторые аспекты измерения времени распространения ультразвуковых колебаний в бетоне / В.В. Колохов, А.В. Колохов // Вісник Придніпровської Державної Академії Будівництва Та Архітектури. – Україна, Днепропетровск: Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», 2019. – № 3. – С. 58–65.

7. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
8. Никитин, А.В. Технология оценки качества станков / А.В. Никитин, В.Е. Раменская, Е.В. Бургардт, Ю.А. Филиппов // Сибирский аэрокосмический журнал. – Россия, Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2005. – № 3. – С. 228–233.
9. Kaewunruen, S. Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber / S. Kaewunruen // Materials. – 2018. – Vol. 11. – P. 1169.
10. Troncosi, M. Identification of polymer concrete damping properties / M. Troncosi, G. Canella, N. Vincenzi // Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. IMECHE. – 2022. – Vol. 236, № 21. – P. 10657–10666.
11. Abashin, E.G. Determination of concrete class of RC beams by vibration-damping coefficient / E.G. Abashin // Build. Reconstr. – 2019. – Vol. 84, № 4. – P. 3–9.
12. Dunaj, P. Increasing lathe machining stability by using a composite steel-polymer concrete frame / P. Dunaj // CIRP J. Manuf. Sci. Technol. – 2020. – Vol. 31. – P. 1–13.
13. Suh, J.D. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine / J.D. Suh, D.G. Lee // Int. J. Mech. Mater. Des. – 2008. – Vol. 4, № 2. – P. 113–121.
14. Orak, S. Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin / S. Orak / Cem. Concr. Res. – 2000. – Vol. 30, № 2. – P. 171–174.
15. Rao, S.S. Mechanical vibrations / S.S. Rao. – 5th ed. – Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2011. – 1084 p.

References

1. Kalashnikov, V.I. Application of new generation concrete in mechanical engineering / Kalashnikov V.I., Moskvina R.N., Belyakova E.A. // Mechanics, Resource, and Diagnostics of Materials and Structures: тезисы докл. – Пенза: PGUAS, 2016. – P. 173–174.
2. Beregovoy, V.A. High-performance concretes in machine building: technological aspects of application / Beregovoy V.A., Lavrov I.Yu. // Regional Architecture and Construction. 2022. No. 4 (53). P. 18-25.
3. Khvastunov, V.L. On the experience of manufacturing the frame of a small-sized tear testing machine from high-strength reactive-powder concrete with a low specific cement consumption per strength unit / V.L. Khvastunov, K.N. Makhambetova, I.Yu. Lavrov, A.V. Khvastunov // Bulletin of PSUAS: Construction Science and Education. – 2021. – No. 1 (12). – P. 50–56.
4. Bazhenov, Yu.M. Concrete under dynamic loading / Yu.M. Bazhenov. – М.: Стройиздат, 1970. – 271 p.
5. Zamchalin, M.N. Use of a computer to support the operation of a measuring setup for determining the dynamic modulus of elasticity of concrete / M.N. Zamchalin, M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina // Modern Engineering and Technology. – 2014. – No. 12.
6. Kolokhov, V.V. Some aspects of measuring the propagation time of ultrasonic vibrations in concrete / V.V. Kolokhov, A.V. Kolokhov // Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture. – Ukraine, Dnepropetrovsk: Dnieper State Academy of Construction and Architecture, 2019. – No. 3. – P. 58–65.
7. Vibrations in Engineering: Handbook. In 6 volumes / Ed. by V.N. Chelomey (chairman). – М.: Mashinostroenie, 1981. – Vol. 4. Vibrational processes and machines / Ed. by E.E. Lavendel. – 509 p.
8. Nikitin, A.V. Technology for assessing the quality of machine tools / A.V. Nikitin, V.E. Ramenskaya, E.V. Burgardt, Yu.A. Filippov // Siberian Aerospace Journal. Russia, Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2005. – No. 3. – P. 228–233.

9. Kaewunruen, S. Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber / S. Kaewunruen // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – P. 1169.
10. Troncosi, M. Identification of polymer concrete damping properties / M. Troncosi, G. Canella, N. Vincenzi // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci. IMECHE*. – 2022. – Vol. 236, No. 21. – P. 10657–10666.
11. Abashin, E.G. Determination of concrete class of RC beams by vibration-damping coefficient / E.G. Abashin // *Build. Reconstr.* – 2019. – Vol. 84, № 4. – P. 3–9.
12. Dunaj, P. Increasing lathe machining stability by using a composite steel–polymer concrete frame / P. Dunaj // *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 31. – P. 1–13.
13. Suh, J.D. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine / J.D. Suh, D.G. Lee // *Int. J. Mech. Mater. Des.* – 2008. – Vol. 4, № 2. – P. 113–121.
14. Orak, S. Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin / S. Orak // *Cem. Concr. Res.* – 2000. – Vol. 30, № 2. – P. 171–174.
15. Rao, S.S. *Mechanical vibrations* / S.S. Rao. – 5th ed. – Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2011. – 1084 p.

УДК 691.31

DOI 10.54734/20722958_2023_4_66

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

Фадин Алексей Ильич,
аспирант
E-mail: miap@pguas.ru

Петровнина Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Механизация и автоматизация
производства»
E-mail: irisha-vas@yandex.ru

Еличев Константин Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Механизация и автоматизация
производства»
E-mail: konstantinelichtv@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

Fadin Aleksey Ilyich,
Postgraduate
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

Elichev Konstantin Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Mechanization and
Automation of Production»
E-mail: konstantinelichtv@yandex.ru

БЕТОНЫ БЫСТРОГО НАБОРА ПРОЧНОСТИ ДЛЯ МОНОЛИТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

И.И. Романенко, А.И. Фадин, И.Н. Петровнина, К.А. Еличев

Рассмотрено получение бетонов для монолитного строительства с быстрым набором прочности за счет формирования комплексной бетонной матрицы на основе побочных продуктов различных производств и химических модификаторов. Выявлено влияние наполнителей, заполнителей и химических модификаторов на темпы набора прочности в ранние сроки твердения. Установлено, что после 24 часов твердения в условиях строительной площадки бетоны набирают 50 % от проектной прочности, а на 3, 7 и 28-е сутки – 70 %, 85 % и 100 % соответственно. Тонкомолотый наполнитель на ранней стадии твердения бетонной смеси выступает центром новообразований, а частицы микроразмерного уровня способствуют компенсации внутренних напряжений и снижению образования усадочных трещин. Широкое применение в производстве монолитного бетона из вторичных материалов и некондиционного местного сырья позволяет решить экологические проблемы промышленных предприятий и сократить сроки выдержки без нагрузки монолитных конструкций сооружений. Разработаны рекомендации по технологическому регламенту получения высокопрочных бетонов для монолитного строения.

Ключевые слова: монолитный бетон, наполнитель, заполнитель, химический модификатор, структура, прочность, ускоренный набор прочности, трещиностойкость

RAPID CONCRETE FOR MONOLITHIC CONSTRUCTION

I.I. Romanenko, A.I. Fadin, I.N. Petrovnina, K.A. Elichev

Yetting concrete for monolithic construction with a rapid set of strength due to the formation of a complex concrete matrix based on by-products of various industries and chemical modifiers is considered. The influence of fillers, aggregates and chemical modifiers on the rate of concrete strength set in the early stages of hardening has been revealed. It has been established that after 24 hours of hardening on a construction site, concrete gains 50 % of the design strength, and on days 3, 7 and 28, 70 %, 85 % and 100 %, respectively. Finely ground filler at an early stage of concrete mix hardening acts as the center of new formation, and micro-sized particles contribute to the

compensation of internal stresses and reduce the formation of shrinkage cracks. The widespread use of secondary materials and substandard local raw materials in the production of building monolithic concrete makes it possible to solve the environmental problems of industrial enterprises and reduce the time of exposure without loading of monolithic structures. Recommendations on the technological regulations for obtaining high-strength concrete for a monolithic structure have been developed.

Keywords: monolithic concrete, aggregate, filler, chemical modifier, structure, strength, increased concrete set, crack resistance

Введение. Современное строительство характеризуется высокими темпами возведения высокоэтажного жилья и большепролетных сооружений из монолитных конструкций, что связано с применением высококачественных композиционных материалов, а также бетонов с быстрым набором ранней прочности, изготовление которых требует меньших энергозатрат и капиталовложений. Получение таких композиционных материалов, и в частности монолитных бетонов, опирается на подходы по энергосбережению и повышению качества строительно-монтажных работ. Возникает вопрос перед строительной индустрией и исследователями: «Какими технологическими приёмами можно получить высокопрочные бетоны в условиях строительной площадки с моментальной распалубкой?».

Производство бетонных конструкций методом виброформования из высокоподвижных смесей с осадкой конуса (ОК) 16-25 см непосредственно на строительной площадке связано с появлением на открытой поверхности готового изделия усадочных трещин, вызванных миграцией влаги из внутреннего объема к поверхности. Отсутствие достаточного ухода за процессом твердения большой открытой поверхности бетонной конструкции создает неблагоприятные условия для гидратации портландцемента и способствует росту внутренних напряжений.

Интенсивная потеря влаги из-за испарения приводит к нехватке влаги для формирования структуры композиционного материала, что вызывает снижение прочности, плотности бетона, устойчивости к усадке и трещинообразованию. Для сохранения влаги исследователи применяли метод предварительного увлажнения заполнителя водой или модифицирующими водными растворами [1, 2]. Такой метод обеспечивает снижение раннего образования усадочных поверхностных трещин в бетонах на пористых заполнителях. Однако такой подход целесообразен для получения стеновых конструктивно-теплоизоляционных бетонов методом 3D-печати на объекте с прочностью, не превышающей 20 МПа [3]. В то же время излишнее содержание воды вызывает нестабильность формы, развитие усадочных трещин и снижение прочностных показателей [4, 5].

Введение в бетонную смесь микроволокон полимерного суперабсорбента позволяет удерживать от 20 до 40 % свободной воды затворения, что уменьшает образование усадочных трещин как на ранней стадии твердения, так и в возрасте 28 суток [6].

Длительный период набора прочности бетоном не позволяет осуществлять процесс нагружения бетонных конструкций проектной нагрузкой, что приводит к технологической задержке ведения работ, и особенно это сказывается на качестве работ в зимнее время. Разработка высокопрочных бетонов с быстрым набором прочности в первые сутки твердения на основе использования промышленного и местного некондиционного природного сырья является важной научно-практической задачей [7, 8].

В то же время бетоны с низким значением водоцементного отношения w/c [1, 2] характеризуются образованием трещин в начальный период твердения, что снижает эксплуатационные характеристики бетона [7]. Трещинообразование обусловлено тем, что остаточные напряжения превышают предел прочности бетона на растяжение [7, 8]. Контроль за развитием остаточных напряжений важен для точной оценки устойчивости бетона к растрескиванию в раннем возрасте [4] и производится в специальной форме с ограниченным кольцом.

Термин «бетоны нового поколения», введенный в научный обиход д.т.н., проф. В.И. Калашниковым, позволяет в широком смысле варьировать состав цементной матрицы и получать бетоны с заданными эксплуатационными свойствами. Особую

роль в этих бетонах играет реакционно-активный тонкомолотый наполнитель на основе минерального сырья [6].

Использование бетонов с прочностью 80,0-100,0 МПа на строительстве монолитных каркасов не является оправданным подходом из-за высокой цены и склонности таких бетонов к образованию усадочных трещин и хрупкому разрушению, а вот получение бетонов через сутки с прочностью 30,0 МПа является целесообразным, так как в возрасте 14 суток бетон обладает прочностью на сжатие 40 МПа, а в 28-суточном возрасте – 50 МПа. Основными материалами для производства таких бетонов являются некондиционные пески, тонкомолотые порошки из цеолитов и кварцевых песков, отходы металлургического производства, химические добавки на основе поликарбоксилатов и крупный заполнитель фракции 5-8 мм с маркой по дробимости в цилиндре М800 – М1000 МПа [6...8].

Разработка эффективных технологий производства монолитного бетона с высокой скоростью набора ранней прочности за счет комплексного использования техногенного сырья и получения из него вторичного сырья для производства бетонов позволяет решить проблемы по минимизации экологического ущерба окружающей среде за счет ликвидации баз накопления и хранения промышленных отходов. Поэтому разработка высокопрочных бетонов на основе использования промышленного и местного некондиционного природного сырья является важнейшей научно-практической задачей современного материаловедения.

Материалы и методики проведения исследований. В качестве вяжущего в исследованиях использовали бездобавочный портландцемент марки ПЦ500Д0 (СЕМІ/42,5Н) производства ООО «Мордовцемент». Удельная поверхность $S_{уд} = 3150 \text{ см}^2/\text{г}$. Мелкий заполнитель бетонной смеси – кварцевый песок местного карьера с модулем крупности $M_{кр} = 1,6-1,8$. Крупный заполнитель – гранитный отсев фракции 5-10 мм от дробления горной породы фракции 20-70 мм. Соотношение между остатками на ситах 10:8:5 после прохода через сито 15 мм составляет соответственно 1,0 : 0,8 : 2,2. Марка по дробимости в цилиндре М800 – М1000 МПа.

В качестве наполнителя применяли тонкомолотые цеолиты, кварцевые пески местного карьера, а также золу-унос. Зола-унос образуется как побочный продукт от сжигания угольной пыли на электростанциях в г. Красноярске, удельная поверхность которой составляет $S_{уд} = 18690 \text{ см}^2/\text{г}$. Удельная поверхность цеолитов и кварцевого песка $S_{уд} = 4120 \text{ см}^2/\text{г}$. Помол производился в лабораторной шаровой керамической мельнице с керамическими шарами. Удельная поверхность определялась прибором ПСХ-10.

Для обеспечения заданной подвижности бетонной смеси использовали гиперпластификатор «Sika ViscoCrete 5-600 SK» на основе поликарбоксилатных эфиров. Дозировка гиперпластификатора составляла 1,0 % от массы портландцемента. Осадка конуса бетонной смеси 10-15 см. Твердение бетонной смеси осуществлялось в металлической форме 100×100×100 мм в камере нормального твердения (КНТ) ($W=(90 \pm 5) \%$; $T = (20 \pm 5) ^\circ\text{C}$) в течение 24 часов, выдержка после распалубки в помещении 2 часа при $T=(22 \pm 5) ^\circ\text{C}$, и в дальнейшем испытание на прочность проводилось на гидравлическом прессе. Формовалось сразу 12 образцов-кубиков одного состава. Дальнейшее хранение образцов происходило в камере нормального твердения до испытания в возрасте 3, 7 и 28 суток.

Трещиностойкость бетонов оценивали по методике, разработанной в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (СПбГАСУ). Усадочные деформации цементного камня приводят к появлению на поверхности материала трещин в условиях стесненной усадки. Стесненные условия моделируются на стальной оправке в виде грибка. Вытачивается основание металлическое толщиной 8 мм, диаметром 350 мм, в центре которого приварен цилиндр диаметром 215 мм и толщиной 30 мм. Имеется разборное кольцо металлическое с внутренним диаметром 275 мм и высотой 30 мм, которое крепится на оправке для получения бетонного кольца. Форма предварительно перед формовкой бетонной смеси смазывается силиконовой смазкой.

Изготовление и подготовка образцов к проведению испытаний: из бетонной смеси формируется образец в виде кольца с внешним и внутренним диаметрами соответственно 275 мм и 215 мм. Толщина кольца 30 мм. После формовки образец в форме помещается в КНТ с гидравлическим затвором на 24 часа. Через 24 часа твердения с образца снимается внешняя оболочка (разборное кольцо металлическое с внутренним диаметром 275 мм), бетонное кольцо остаётся на металлической оправке, и на его боковую поверхность наносится слой токопроводящей краски в виде спирали, чтобы токоподсоединяемые концы линии перекрывали пространство свободного прохода трещин.

Собирается цепь из самописца КСМ–3 и испытываемых образцов.

Результаты исследования. Составы бетонных смесей и свойства бетонов в установленные программой исследования сроки испытаний представлены в табл.1.

Т а б л и ц а 1

Составы бетонных семей и кинетика набора прочности бетонов

Ингредиенты, расходы на 1 м ³ , свойства	Составы					
	1	2	3	4	5	6
СЕМІ-42,5Н, кг/объем м ³	567/0,183	276/0,89	273/0,88	267/0,086	276/0,089	275/0,089
Зола-унос, кг	-	-	137/0,062	-	278/0,1297	50/0,0226
Молотый кварцевый песок, кг	-	139/0,052	-	106/0,04	-	188/0,071
Молотый цеолит, кг	-	-	-	91/0,046	-	-
Кварцевый песок фракции 0,32, кг	-	346/130,4	342/0,129	333/0,126	-	284/0,107
Кварцевый песок фракции 0,16, кг	-	395/0,149	392/0,148	381/0,144	-	355/0,134
Кварцевый песок М _{кр} , кг	689/0,259	194/0,074	194/0,073	189/0,071	739/0,279	196/0,074
Гранитный отсев фракции 5-10 мм, кг	1094/0,416	990/0,378	979/0,374	954/0,364	982/0,375	983/0,375
Sika ViscoCrete 5- 600 SK, % / л	1,0/6,08	1,0/4,45	1,0/4,4	1,0/4,96	1,0/4,51	1,0/4,92
Вода, л	135,4	123	121	118	122	122
Выход бетонной смеси, л	999,5	999,85	999,4	999,96	999,51	999,52
Вес замеса, кг	2491,4	2467,5	2442,4	2444	2401,51	2457,92
В/(Ц+ТМВ)	0,25	0,3	0,3	0,27	0,3	0,27
Наличие усадочных трещин через: 24 часа	нет	нет	нет	нет	нет	нет
3 суток	нет	нет	нет	нет	нет	нет
7 суток	да	нет	нет	нет	нет	нет
28 суток	да	нет	нет	нет	нет	нет
Прочность на сжа- тие, МПа, в возрас- те: 24 часа	9,6	25,3	30,8	33,1	26,7	32,4
3 суток	15,1	33,3	42,2	45,0	34,5	39,9
7 суток	23,4	43,9	50,3	56,5	39,1	45,8
28 суток	42,6	51,8	60,5	66,8	47,3	54,0
Удельный расход портландцемента на единицу прочности, кг/МПа (УРП)	13,3	5,33	4,51	4,00	5,83	5,1

П р и м е ч а н и е . (Ц+ТМВ) – портландцемент и все тонкомолотые компоненты.

Обсуждение. Цель исследования – получение ранней прочности бетона после 24 часов твердения в опалубке от 25 до 30 МПа без прогрева. Из полученных данных

этим требованиям соответствуют составы № 2 ÷ 6. Состав №1 не отвечает поставленной цели, хотя характеризуется большим расходом портландцемента – 580 кг/м³. Причем в возрасте 7 суток на поверхности образцов состава №1 наблюдается появление волосяных усадочных трещин. Во всех других составах трещин не образуется на всем протяжении экспозиции.

Составы №3 и №4 являются наиболее оптимальными, так как характеризуются минимальным расходом портландцемента (273 и 267 кг/м³ соответственно) и наполнением композиции молотым песком и золой-уносом для достижения необходимого объема цементной матрицы. Составы № 3 и 4 характеризуются высокими темпами набора прочности на всем временном отрезке фиксации результата. В возрасте 24 часа прочность состава №3 составляет 30,8 МПа, № 4 – 33,1 МПа, а в возрасте 28 суток твердения в КНТ – 60,5 МПа и 66,8 МПа соответственно (см. табл. 1).

Причина в различных темпах набора прочности бетонов заключается в определении оптимального соотношения между ингредиентами бетонной смеси, используемыми для достижения ранней прочности. Такие бетоны условно можно называть коммерческими. Они необходимы для получения через сутки твердения в нормальных условиях прочность на сжатие 25,0 – 30,0 МПа с осадкой конуса бетонной смеси 10,0 – 15,0 см.

Обычно бетоны с высокой ранней прочностью характеризуются высоким содержанием вяжущего и низким значением В/Ц-отношения. Расход портландцемента составляет 450–550 кг/м³, а В/Ц = 0,2 – 0,35. Такие бетонные смеси относят к высокопрочным и применяют для производства ответственных конструкций в монолитном строительстве. Лабораторные исследования и практические наблюдения на объектах строительства показали, что составы № 6 и 7 (см. табл. 1) с ранним набором высокой прочности склонны к растрескиванию под воздействием таких факторов, как: сильное термическое сжатие в результате высокого содержания портландцемента; большая автогенная усадка из-за низкого водоцементного отношения; высокая скорость усадки при высыхании из-за высокого соотношения цементного теста и заполнителя, что подтверждено нашими исследованиями (состав №1, табл. 1). Решить проблему с трещинообразованием и развитием усадочных трещин в процессе твердения возможно путем оптимизации структуры матрицы цементного камня и условий твердения бетона, что и было сделано (табл. 1, 2).

Т а б л и ц а 2

Объемы составных частей бетонной смеси исследуемых составов

Наименование	Объем, м ³					
	1	2	3	4	5	6
Объем цементной матрицы (портландцемент + молотые компоненты + песок фр. 0,16 мм + гиперпластификатор + вода), $V_{цм}$	0,325	0,419	0,479	0,436	0,346	0,510
Объем заполнителя (песок фр. 0,32+щебень фр. 5-10 мм), $V_{кз}$	0,675	0,581	0,529	0,564	0,654	0,490
$V_{цм} : V_{кз}$	1:2,077	1:1,387	1:1,104	1:1,291	1:1,889	1:0,961
Объем цементного теста $V_{цт}$	0,387	0,272	0,282	0,309	0,35	0,314

В зависимости от желаемого уровня ранней прочности, темпов ее набора, а также стойкости к трещинообразованию вводятся тонкомолотые кварцевые пески, цеолиты и пески фракций 0,32 и 0,16 мм. Тонкомолотые минеральные вещества предназначены для сокращения расхода портландцемента и получения оптимальной консистенции цементного теста при условии введения гиперпластификатора. Таким образом, подбирая оптимальное соотношение между вяжущим, тонкомолотыми веществами, кварцевым песком мелкой фракции (фракции 0,16 мм) и гиперпластификатором, мы создаем оптимальную структуру цементного теста в объеме, необходимом для запол-

нения пустотности между частицами крупного заполнителя (см. табл. 1, 2). Нужно отметить, что не все тонкомолотые минеральные порошки пригодны для получения оптимальной цементной матрицы. Следует выделить реакционно-активные порошки, способные разжижаться под действием гиперпластификатора аналогично портландцементу.

Из полученных данных (см. табл. 2) видно, что оптимальные дозировки ингредиентов в составах можно разместить в последовательности увеличения прочности как в раннем возрасте твердения, так и в 28-суточном: $1 < 5 < 2 < 6 < 3 < 4$. В них оптимальное соотношение между объемом цементной матрицы $V_{ц.м}$ и объемом композиционного заполнителя $V_{к.з}$ составляет: $V_{ц.м} : V_{к.з} = 1 : (1,104 : 1,291)$.

Оптимальная структура цементной матрицы, использование тонкомолотых реакционно-активных минеральных веществ, минимальное содержание воды в бетонной смеси, получение высокой прочности в ранние сроки твердения обеспечиваются применением новых видов супер- и гиперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров. Но в качестве суперпластификатора выступает в бетонных смесях зола-унос; поэтому часть воды, необходимой для получения заданной подвижности, заменяет вторичный продукт – зола-унос.

Вода активно влияет на процессы гидратации цементного клинкера, достижение технологических параметров, необходимых для перекачки и укладки смеси в опалубку, формирование структуры цементной матрицы, распределение частиц бетонной смеси по размерам, образование пустот в цементном камне.

В строительной индустрии широко используемые бетонные смеси не обеспечены подбором непрерывного гранулометрического состава заполнителей и микрозаполнителей для цементной матрицы. В результате наблюдается дозировка воды в количестве, намного превышающем потребность для гидратации клинкера. А это можно также объяснить наличием поверхностного электростатического заряда на частицах портландцемента, что способствует заземлению молекул воды между частицами портландцемента.

Введение в цементную матрицу золы-уноса, цеолитовой породы или молотого кварцевого песка позволяет раздвинуть частицы вяжущего и снизить электростатический эффект между ними, что предотвращает флокуляцию. В результате снижаются водопотребность смеси для достижения заданной подвижности и значение водоцементного отношения (В/Ц).

Округленная, а порой и сферическая поверхность тонкомолотых наполнителей снижает поверхностное трение между частицами, что увеличивает подвижность бетонной смеси.

Использование не наполненной тонкомолотыми наполнителями цементной матрицы вызывает активное развитие усадочных трещин и особенно на ранних этапах твердения. Процессы усадки связаны с объемом цементного теста и содержанием в ней воды. Поэтому, применяя наполненные цементные системы, можно значительно снизить усадки в бетонах при твердении.

Сочетание оптимальной упаковки цементной матрицы за счет наполнения тонкомолотыми реакционно-активными порошками, низкого содержания воды, применения гиперпластификаторов позволяет получить бетоны нового поколения с высокой ранней прочностью на сжатие и высокой стойкостью к растрескиванию в результате протекания процессов усадки.

Причем новые бетоны на основе тонкомолотых реакционно-активных порошков обеспечивают достижение низкого значения удельного расхода портландцемента (УРП) на единицу прочности. Так, состав № 1 имеет УРП, равный 13,3 кг/МПа, а самые эффективные составы № 3 и № 4 – соответственно 4,51 и 4,0 кг/МПа.

Результаты оценки трещинообразования в стесненных условиях показали, что не все составы бетонной смеси (см. табл. 1) склонны к образованию усадочных поверхностных трещин в одно и то же время. С помощью теста на кольцевую усадку можно определить время начала процесса трещинообразования в композиционном материале

на основе портландцемента при определенной геометрии образца (кольцо или эллипс), что важно для взаимного сравнения и оптимизации различных составов [8].

Т а б л и ц а 3

Время начала образования трещин на поверхности кольцевых образцов

Составы (см. табл.1)	Время образования трещин, сут	Примечание
1 (контрольный)	6	Ближе к внешнему диаметру кольца
2 (молотый кварцевый песок)	12	Ближе к внешнему диаметру кольца
3 (зола-унос)	14	Ближе к внешнему диаметру кольца
4 (молотые цеолит, кварцевый песок)	–	Трещин нет в течение 90 дней
5 (зола-унос)	–	Ближе к внешнему диаметру кольца
6 (зола-унос, молотый кварцевый песок)	–	Трещин нет в течение 90 дней

Таким образом, когда остаточное напряжение достигло предела прочности бетона при растяжении, в осевом направлении образуются трещины, что фиксировалось самописцем. Наибольшие растягивающие усилия возникают в периферийной области во внешнем диаметре. Табл. 3 показывает, что время до растрескивания составило 6, 12 и 14 суток для бетонных смесей № 1, № 2, № 3 соответственно. Составы № 4, № 5 и № 6 на поверхности не имели трещин на всем временном интервале наблюдения (90 суток), установленном программой эксперимента. Такое свойство составов объясняется наличием молотого цеолита, который долгое время при намокании удерживает молекулы воды, препятствует высушиванию образца бетона при твердении и выступает в качестве демпфера внутренних напряжений. Содержание молотого кварцевого песка и золы-уноса в бетонной смеси обеспечивает создание структуры, позволяющей повысить трещиностойкость бетонов в начальный период твердения.

В то же время по открытой боковой поверхности кольцевого образца развиваются усадочные деформации, которые вызывают растяжение в поверхностном слое и сжатие в центре образца.

Выводы:

1. Ранняя прочность бетонов обеспечивается подбором соотношения между компонентами бетонной смеси.
2. Введение в бетонную смесь тонкомолотых реакционно-активных порошков и гиперпластификатора способствует сокращению расхода портландцемента и получению высокой ранней прочности без термического нагрева.
3. В качестве модификаторов структуры бетона целесообразно использовать золу-унос, молотый кварцевый песок и цеолитные породы. Соотношение между компонентами устанавливается экспериментально с учетом их удельной поверхности.
4. Потенциал растрескивания бетона с молотым цеолитом ниже по сравнению с бетоном без наполнителя из-за релаксации напряжений в раннем возрасте.
5. По сравнению с другими бетонными смесями смесь № 1 показала самое раннее растрескивание в возрасте 9 суток в стесненных условиях.
6. Оптимальными составами бетонов для решения поставленной цели являются № 3... 6 (см. табл.1, 3).
7. Целесообразно провести исследования бетонных смесей с учетом выделения теплоты при гидратации клинкерного фонда и возникающих напряжений в бетонном кольце с металлической оправкой, на котором формовали кольцевой образец.

Список литературы

1. Riding, K.A. Quantification of effects of fly ash type on concrete early-age cracking / K.A. Riding, J.L. Poole, A.K. Schindler, M.C.G. Juenger, K.J. Folliard // *ACI Materials Journal*. – 2008. – 105(2). – P. 149–155.
2. Naik, T.R. Long Term Performance of High-Volume Fly Ash Concrete Pavements / T.R. Naik, B.W. Ramme, R.N. Kraus, R. Siddique // *ACI Materials Journal*. – 2003. – 100(2). – P.150–155.
3. Алимов, В.А. Перспективы производства эффективных малоцебеночных бетонов / В.А. Алимов, В.В. Воронин, В.Ф. Коровяков // *Технологии бетонов*. – 2010. – №11–12. – С.40–41.
4. Ibragimov, R. The effect of metal and polypropylene fiber on technological and physical mechanical properties of activated cement compositions / R. Ibragimov, R. Bogdanov, E. Korolev // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – 16. – P. e00882. – DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00882
5. Malhotra, V.M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete / V.M. Malhotra // *Concrete International*. – 2002. – 24(7). – P. 30–34.
6. Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения / В.И. Калашников // *Бетон и железобетон*. – 2012. – №1(6). – С.82–89.
7. 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.
8. Zhou, X.M. Numerical and experimental assessment of the effects of specimen size on shrinkage cracking of concrete / X.M. Zhou, W. Dong, O.G. Oladiran, Z.M. Wu, G. Kastiukas // *Topping BHV, Iványi P, editors. Proceedings of the twelfth international conference on computational structures technology*. – Stirlingshire, UK: Civil-Comp Press; 2014. – P. 239. – URL: <http://dx.doi.org/10.4203/ccp.106.239>.

References

1. Riding, K.A. Quantification of effects of fly ash type on concrete early-age cracking / K.A. Riding, J.L. Poole, A.K. Schindler, M.C.G. Juenger, K.J. Folliard // *ACI Materials Journal*. – 2008. – 105(2). – P. 149–155.
2. Naik, T.R. Long Term Performance of High-Volume Fly Ash Concrete Pavements / T.R. Naik, B.W. Ramme, R.N. Kraus, R. Siddique // *ACI Materials Journal*. – 2003. – 100(2). – P.150–155.
3. Алимов, В.А. Перспективы производства эффективных малоцебеночных бетонов / В.А. Алимов, В.В. Воронин, В.Ф. Коровяков // *Технологии бетонов*. – 2010. – №11–12. – С.40–41.
4. Ibragimov, R. The effect of metal and polypropylene fiber on technological and physical mechanical properties of activated cement compositions / R. Ibragimov, R. Bogdanov, E. Korolev // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – 16. – P. e00882. – DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00882
5. Malhotra, V.M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete / V.M. Malhotra // *Concrete International*. – 2002. – 24(7). – P. 30–34.
6. Kalashnikov, V.I. How to turn old-generation concretes into high-performance new-generation concretes / V.I. Kalashnikov // *Concrete and Reinforced concrete*. – 2012. – №1(6). – P.82–89.
7. 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.
8. Zhou, X.M. Numerical and experimental assessment of the effects of specimen size on shrinkage cracking of concrete / X.M. Zhou, W. Dong, O.G. Oladiran, Z.M. Wu, G. Kastiukas // *Topping BHV, Iványi P, editors. Proceedings of the twelfth international conference on computational structures technology*. – Stirlingshire, UK: Civil-Comp Press; 2014. – P. 239. – URL: <http://dx.doi.org/10.4203/ccp.106.239>.

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

Очкина Наталья Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Физика и химия»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

Очкин Игорь Анатольевич,
магистрант
E-mail: ochkin@ogroup.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

Ochkina Natalia Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Physics and Chemistry»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

Ochkin Igor' Anatol'yevich,
Master student
E-mail: ochkin@ogroup.ru

КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОПЛОТНЫХ КОМПОЗИТОВ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н.А. Очкина, И.А. Очкин

Приведены результаты исследования кинетики твердения высокоплотных композитов на основе глиноземистого цемента (ГЦ) с высокоплотным наполнителем (полиминеральный отход стекольной промышленности (ПМО)). Установлено, что исследуемые композиты наиболее интенсивно набирают прочность в течение первых семи суток. Это позволяет рекомендовать их для проведения срочных ремонтно-восстановительных работ на радиационно-опасных объектах. Установлено, что существенным фактором, повышающим прочность композитов в более поздние сроки твердения, является введение модифицирующих добавок. Так, при одинаковом расходе цемента прочность при сжатии композита с добавкой 1 % карбамидной смолы на 9,7 % выше по сравнению с немодифицированным образцом.

Ключевые слова: композит, высокоплотный наполнитель, ВГЦ, модифицирующие добавки, водоцементное отношение (В/Ц), предел прочности при сжатии

KINETICS OF STRENGTH GAIN OF HIGH-DENSE SPECIAL PURPOSE COMPOSITES

N.A. Ochkina, I.A. Ochkin

The kinetics of hardening of radiation-protective composites based on high-alumina cement (HCG) with a high-density filler (polymineral waste of the glass industry (PMO)) has been studied. It is found that the studied composites gain strength most intensively within seven days. This allows us to recommend them for urgent repair and restoration work on radiation-hazardous facilities. It is established that the introduction of modifying additives is a significant factor that increases the strength of composites at later time of hardening. Thus, with the same cement consumption, the compressive strength of the composite with addition of 1 % carbamide resin is 9.7 % higher compared with the unmodified sample.

Keywords: composite, high-density filler, HCG, modifying additives, water-cement ratio (W/C), compressive strength

Основным показателем качества радиационно-защитных материалов является средняя плотность [1, 2]. Для изучения кинетики набора прочности был использован композит следующего состава: ГЦ – 408 кг, вода – 184 кг, крупный наполнитель – 2433 кг, мелкий наполнитель – 1060 кг (на 1 м³), обладающий максимальной плотностью 4045 кг/м³ [3].

Как видно из рис. 1, наиболее активно процесс формирования структуры немодифицированного композита на основе ГЦ происходит в течение первых 3 суток. К этому

сроку прочность достигает 74 % своего максимального значения. Дальнейшее выдерживание образцов также приводит к росту прочности, но с меньшей скоростью. Если скорость твердения в первые 3 суток составляет приблизительно 13,3 МПа/сут, то дальнейшее твердение протекает со скоростью не более 1,8 МПа/сут (см. рис. 1). Такое изменение прочности может быть объяснено протеканием двух взаимно конкурирующих процессов: структурообразованием, связанным с гидратацией цемента, и деструкцией, которая возникает вследствие развития внутренних напряжений.

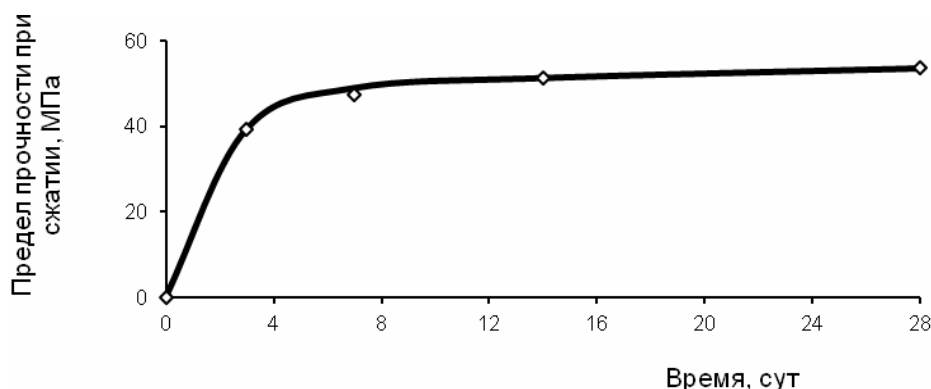


Рис. 1. Кинетика изменения прочности композита на основе ВГЦ

На основании экспериментальных данных определена математическая модель изменения прочности композитов на основе ГЦ от времени твердения:

$$R_{\text{сж}} = \frac{a + bt^d}{c + t^d}, \quad (1)$$

где $f_1 = a + bt^d$ – функция, характеризующая протекание процесса структурообразования; $f_2 = c + t^d$ – функция, характеризующая протекание деструкции; t – время твердения; a , b , c , d – эмпирические коэффициенты, зависящие от состава и соотношения компонентов смеси.

Для кривой на рис. 1 уравнение (1) имеет вид

$$R_{\text{сж}} = \frac{56,197t^{0,975}}{1,246 + t^{0,975}}. \quad (2)$$

Зависимости функций f_1 и f_2 от времени твердения для исследуемого состава представлены в табл. 1, из которой видно, что процесс структурообразования протекает значительно интенсивнее, чем процесс деструкции. Однако, как показали многочисленные исследования, высокопрочные материалы более чувствительны к наличию дефектов в структуре. Поэтому по истечении определенного промежутка времени наблюдается уменьшение скорости набора прочности.

Т а б л и ц а 1

Процесс	Время твердения, сут						
	1	3	7	14	28	180	360
Структурообразование (функция f_1)	56,2	164,0	374,7	736,5	1447,7	8883,9	17462,6
Деструкция (функция f_2)	2,246	4,165	7,914	14,35	27,01	159,33	311,98

В табл. 2 приведены экспериментально полученные и теоретически рассчитанные по формуле (2) и уравнению логарифмического закона значения прочности композита.

Т а б л и ц а 2

Способ определения значения прочности	Прочность композита, МПа			
	Время твердения, сут			
	7	14	146	219
Экспериментально определенное значение	47,3	51,4	55,8	56
Теоретическое значение, рассчитанное по формуле (2)	47,4	51,3	55,7	55,8
То же, рассчитанное по формуле $R_n = \frac{R_{28} \lg n}{\lg 28}$	31,3	42,4	80,1	86,6

Как видно из табл. 2, формула (2) значительно более точно описывает экспериментальные данные, чем уравнение логарифмического закона прочности. Это позволяет сделать вывод о целесообразности её использования для прогнозирования изменения прочности композитов на основе ГЦ в зависимости от времени твердения. Кроме того, зависимость (2) может быть использована при проектировании составов высокоплотных композитов на основе ГЦ.

Исследуемый состав использовали в качестве контрольного при изучении влияния модифицирующих добавок на кинетику изменения прочности композитов в процессе твердения. Для модификации применяли: карбамидную смолу, ССК, лимонную кислоту, ЛСТ и суперпластификатор С-3. Оптимальные дозировки добавок устанавливали по результатам испытаний по ГОСТ 310.4-81. Добавки вводили в количестве, обеспечивающем получение смесей равной подвижности (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Вид добавки	Расход добавки, %	Расход воды, л	В Ц	Подвижность, мм	Предел прочности при сжатии, МПа в возрасте		
					3 сут	7 сут	28 сут
Без добавки	0,0	209	0,5	118	39,4	47,3	53,6
С-3	0,3	192	0,46	118	0,96	39,9	54,4
	0,5	178	0,43	119	1,13	47,7	62,1
	0,8	167	0,4	119	0,74	35,9	48,4
Лимонная кислота	0,05	196	0,46	118	0,29	34,0	59,1
	0,1	188	0,45	119	0,56	38,9	67,2
	0,15	176	0,42	119	0,39	36,3	62,9
Карбамидная смола	0,5	205	0,49	118	38,4	46,1	55,9
	1	196	0,47	117	41,6	47,9	58,8
	1,5	188	0,45	114	33,4	41,2	51,0
ССК	0,15	196	0,47	118	0,64	36,9	52,9
	0,2	188	0,45	118	1,11	41,1	64,9
	0,25	180	0,43	118	0,84	38,6	59,4
ЛСТ	0,1	201	0,48	118	32,6	40,8	49,9
	0,15	188	0,45	118	35,6	46,0	56,1
	0,2	176	0,42	118	33,1	41,4	52,3
	0,25	163	0,39	116	29,9	39,0	47,7

Для определения прочности композита изготавливали образцы-кубы размером 3×3×3 см. При этом формы, заполненные смесью, выдерживали до распулочки в те-

чение 24 ч в камере нормального хранения при температуре около $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 95...100 %. После освобождения из форм образцы в течение первых 3 суток хранили в камере нормального хранения при указанных выше условиях, а оставшееся до испытания время – в помещении при $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(65 \pm 10)\%$. Анализ экспериментальных данных, представленных в табл. 3, показывает, что оптимальная дозировка карбамидной смолы составляет 1 %, ССК – 0,2 %, лимонной кислоты – 0,1 %, ЛСТ – 0,15 % и суперпластификатора С-3 – 0,5 % от массы цемента.

Кинетика набора прочности модифицированных композитов представлена в табл. 4 (при одинаковом В/Ц = 0,5) и табл. 5 (с одинаковой подвижностью 118 мм).

Т а б л и ц а 4

№ состава	Вид и дозировка добавки	Подвижность, мм	Плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	–	118	4044,9	39,4	47,3	51,4	53,6
2	Лимонная кислота – 0,1 %	185	4101,1	0,43	28,9	43,3	71,9
3	С-3 – 0,5 %	159	4111,8	0,84	24,4	37,8	42,1
4	ЛСТ – 0,15 %	150	4076,9	0,36	13,1	26,4	46,7
5	ССК – 0,2 %	178	4080,3	0,52	31,4	58,9	62,2
6	Карбамидная смола – 1 %	140	4063,0	20,6	33,1	61,1	66,2

При одинаковом В/Ц (см. табл. 4) все применяемые добавки повышают подвижность смесей, улучшают их удобоукладываемость и способствуют увеличению средней плотности и прочности композитов в поздние сроки. При этом в трехсуточном возрасте прочность при сжатии композитов с добавками меньше, чем у контрольного. Это объясняется замедляющим действием добавок на процессы гидратации ГЦ. Например, прочность образцов, модифицированных карбамидной смолой, в 3-суточном возрасте на 47,9 % меньше, чем у контрольного, но уже к 7-м суткам процесс твердения интенсифицируется и разница в прочности уменьшается до 30 %. В возрасте 14 суток прочность образцов с добавкой смолы оказывается на 18,8 % выше, чем у контрольного, а к 28-м суткам прирост прочности составляет в среднем 23,6 %.

Композиты с другими добавками в возрасте 3 суток характеризуются крайне низкой прочностью. Однако через 28 суток от начала твердения прочность композитов с добавками ССК и лимонной кислоты уже превосходит прочность контрольного образца на 16,2 % и 34,3 % соответственно. Причиной более высокой прочности композитов с добавками лимонной кислоты, ССК и карбамидной смолы по сравнению с контрольными образцами при одинаковом В/Ц является более высокая степень гидратации ГЦ в присутствии указанных добавок [4, 5].

Влияние добавок на прочностные свойства композитов с одинаковой подвижностью менее значительно (см. табл. 5).

Т а б л и ц а 5

№ состава	В/Ц	Вид и дозировка добавки	Предел прочности при сжатии, МПа			
			3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	0,45	–	28,7	35,6	36,7	37,4
2	0,5	–	39,4	47,3	51,4	53,6
3	0,45	Лимонная кислота – 0,1 %	0,56	38,9	48,9	67,2
4	0,43	С-3 – 0,5 %	1,06	47,7	55,6	62,1
5	0,45	ЛСТ – 0,15 %	35,6	45,9	49,9	56,1
6	0,45	ССК – 0,2 %	1,11	35,1	52,0	54,9
7	0,47	Карбамидная смола – 1 %	41,6	48,0	53,8	58,8

В раннем возрасте разница в прочности у модифицированных и немодифицированных образцов несколько ниже и зависит от вида добавок. Это объясняется тем, что уменьшение количества воды затворения в присутствии добавок приводит к росту прочности композитов (по сравнению с контрольным образцом) в более ранние сроки, причем это повышение больше, чем можно было ожидать, исходя только из снижения В/Ц. Карбамидная смола при В/Ц = 0,47 вызывает ускорение твердения и обеспечивает повышение ранней прочности по сравнению с контрольными образцами в среднем на 5,5 %.

При В/Ц < 0,5 замедляющее действие всех добавок на гидратацию цемента сменяется ускоряющим действием, однако продолжительность периода, через который это происходит, для различных добавок неодинакова.

Превращение ССК из замедлителя в ускоритель гидратации цемента наступает примерно через 14 суток. Для С-3 этот момент наступает раньше (через 3 суток), а для ЛСТ и лимонной кислоты – через 28 суток.

Для исследования влияния добавок на предел прочности образцов при изгибе из смесей с одинаковой подвижностью (118 мм) изготавливали образцы-призмы размерами 4×4×16 см, которые в возрасте 7 суток испытывали на изгиб и на сжатие. Результаты испытаний (табл. 6) показывают, что композиты на ВГЦ с добавкой карбамидной смолы характеризуются прочностью при изгибе, на 17,96 % большей, чем контрольный состав, что косвенно подтверждает улучшение сцепления вяжущего с наполнителем. Увеличение прочности сцепления вяжущего с наполнителем объясняется улучшением смачиваемости последнего и тем, что, видимо, содержащиеся в смоле карбонильные группы в процессе отверждения взаимодействуют с функциональными группами наполнителя. Авторы работы [6] называют в качестве одной из причин увеличения прочности при сжатии и изгибе композитов, модифицированных карбамидной смолой, высокую прочность самого полимера при разрыве.

Т а б л и ц а 6

№ состава	Вид добавки	Дозировка добавки (в % от массы цемента)	В/Ц	Предел прочности, МПа	
				при сжатии	при изгибе
1	–	–	0,5	41,67	5,79
2	Лимонная кислота	0,1	0,45	12,17	3,38
3	ЛСТ	0,2	0,45	37,29	4,62
4	С-3	0,5	0,43	41,08	5,94
5	ССК	0,2	0,45	36,47	5,92
6	Карбамидная смола	1	0,47	42,24	6,83

Из показателей прочности (см. табл. 6) видно, что предлагаемые композиты работают на сжатие лучше, чем на изгиб.

Исследуемые композиты показывают интенсивный набор прочности в ранние сроки твердения. Это позволяет рекомендовать их для проведения срочных ремонтно-восстановительных работ на объектах атомной энергетики и других радиационно-опасных объектах.

Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ, 2012. – 432 с.
2. Гарькина, И.А. Разработка материалов специального назначения: методологические принципы моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Альманах современной науки и образования. – 2014. – № 2 (81). – С. 32–34.
3. Очкина, Н.А. Порядок расчета состава особо тяжелого раствора на основе высокоглиноземистого цемента (ВГЦ) и полиминерального отхода производства

(ПМО) / Н.А. Очкина, Т.Д. Пчелинцева // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – №4(35). – С.161–168.

4. Прошин, А.П. Синтез строительных материалов со специальными свойствами на основе системного подхода / А.П. Прошин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 7 (535). – С.43–47.

5. Королёв, Е.В. Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала / Е.В. Королёв, А.Н. Гришина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4 (37). – С. 5–15.

6. Бормотов, А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов / А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, Е.В. Королёв. – Пенза: Изд-во ПГТА, 2011. – 352 с.

References

1. Bazhenov, Yu.M. Systems analysis in construction materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU, 2012. – 432 p.

2. Garkina, I.A. Development of special-purpose materials: methodological principles of modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // Almanac of modern science and education. – 2014. – № 2 (81). – С. 32–34.

3. Ochkina N.A. The procedure for calculating the composition of a particularly heavy solution based on high-alumina cement (HCG) and polymineral waste of production (PМО) / N.A. Ochkina, T.D. Pchelintseva // Education and science in the modern world. Innovations, 2021. – №4 (35). – P.161–168.

4. Proshin, A.P. Synthesis of building materials with special properties based on a systematic approach / A.P. Proshin // News of higher educational institutions. Construction. – 2003. – № 7 (535). – P.43–47.

5. Korolev, E.V. Fractal dimension as a universal characteristic of the parameters of the structure and strength of the material / E.V. Korolev, A.N. Grishina // Regional architecture and engineering. – 2020. – № 4 (37). – P. 5–15.

6. Bormotov, A.N. Mathematical modeling and multicriteria synthesis of composite materials / A.N. Bormotov, I.A. Proshin, E.V. Korolev. – Penza: Publishing house of PGTA, 2011. – 352 p.

УДК 691

DOI 10.54734/20722958_2023_4_80

*Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова*

Россия, 308012, Белгород,
ул. Костюкова, д. 46,
тел.: (4722) 54-90-41; факс: (4722) 30-99-91

Шорстова Елена Степановна,
кандидат технических наук, ассистент
кафедры «Теоретическая механика
и сопротивление материалов»
E-mail: kuzik_alena@mail.ru

Клюев Сергей Васильевич,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Теоретическая механика
и сопротивление материалов»
E-mail: klyuyev@yandex.ru

Клюев Александр Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теоретическая механика
и сопротивление материалов»
E-mail: klyuyevav@yandex.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

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru
*Комплексный научно-исследовательский
институт им. Х.И. Ибрагимова Российской
Академии Наук*
Россия, г. Грозный,
Старопромисловское ш., 21А

Аюбов Нарман Аюбович,
кандидат экономических наук, профессор
E-mail: yrekly@mail.ru

*Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,
tel.: (4722) 54-90-41; fax: (4722) 30-99-91

Shorstova Elena Stepanovna,
Candidate of Sciences, Assistant of the
Department «Theoretical Mechanics and
Material Resistance»
E-mail: kuzik_alena@mail.ru

Klyuev Sergey Vasilyevich,
Candidate of Sciences, Professor of the
Department «Theoretical Mechanics and
Material Resistance»
E-mail: klyuyev@yandex.ru

Klyuev Aleksander Vasilyevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Theoretical Mechanics and
Material Resistance»
E-mail: klyuyevav@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

Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru
*Comprehensive Research Institute named
after H.I. Ibragimov of the Russian Academy
of Sciences*

Russia, Grozny, 21A, Staropromyslovskoe sh.

Ayubov Narman Ayubovich,
Candidate of Economic Sciences, Professor
E-mail: yrekly@mail.ru

Работа подготовлена при финансовой поддержке в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» новой лаборатории «Ресурсо-энергосберегающие технологии, оборудование и комплексы» (FZWN-2021-0014).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ТОНКОМОЛОТОГО ОТСЕВА КВАРЦИТОПЕСЧАНИКА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Е.С. Шорстова, С.В. Клюев, А.В. Клюев, И.А. Гарькина, Н.А. Аюбов

Технологии и методы 3D-печати в строительстве достаточно подробно рассмотрены в литературе, однако исследования, направленные на разработку и изучение составов бетонных смесей для 3D-печати, а также выбор оптимальных составов, немногочис-

ленны. Приведены результаты исследования влияния добавки тонкомолотого отсева кварцитопесчаника на физико-механические свойства дисперсно-армированных мелкозернистых 3D-бетонов. Отмечено, что наиболее эффективными являются минеральные и органические пластифицирующие добавки.

Ключевые слова: фибробетон, минеральные добавки, модификаторы, пуццолановая активность, добавка-уплотнитель, удельная поверхность, 3D-печать

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE ADDITION OF FINELY GROUND QUARTZITE SANDSTONE SCREENING ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF MIXTURES FOR 3D PRINTING.

E.S. Shorstova, S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, I.A. Garkina, N.A. Ayubov

Technologies and methods of 3D-printing in construction are sufficiently detailed in the literature, but the studies aimed at the development and research of compositions of concrete mixtures for 3D-printing, as well as the selection of optimal compositions, are not numerous. The results of the influence of the additive of finely ground quartzite sandstone screenings on physical and mechanical properties of dispersion-reinforced fine-grained 3D-concretes are given. In this regard, there is a need to use various kinds of modifying and structuring additives in the concrete mixture. The most efficient are mineral and organic plasticizing additives.

Keywords: fibroconcrete, mineral additives, modifiers, pozzolan activity, sealer additive, specific surface area, 3D-printing

Технологические параметры производства и физико-механические свойства мелкозернистых бетонов были определены с помощью метода математического планирования эксперимента [1...3]. Получены экспериментально-статистические модели влияния факторов введения добавки размолотого отсева КВП на свойства мелкозернистых бетонов (табл. 1) [4..7].

Т а б л и ц а 1

Состав мелкозернистого бетона

№	В/Ц	Вода, л/м ³	Цемент, кг/м ³	Мелкий заполнитель, кг/м ³	Добавка, %
1	0,4	196	560	1400	0,8

Для разработки рациональных составов смесей с требуемыми технологическими и физико-механическими свойствами была составлена матрица планирования двухфакторного трехуровневого эксперимента по влиянию количества микрокремнезема и пластифицирующей добавки на прочность мелкозернистого бетона при сжатии и расплыв конуса смеси (ГОСТ 310.4-81; ГОСТ 30744-2001). В эксперименте В/Ц составляло 0,4. Количество суперпластификатора определяли в зависимости от расхода цемента и песка, количество тонкомолотого КВП рассчитывалось от массы цемента [8]. Условия планирования эксперимента приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Условия планирования эксперимента по влиянию количества суперпластификатора и тонкомолотого КВП на свойства мелкозернистого бетона

№	Кодированный вид	Натур. вид	Диапазон варьирования			Шаг варьирования
			-1	0	+1	
1	X1	Кол-во микрозаполнителя, %	0	20	40	20
2	X2	Кол-во суперпластификатора, %	0,1	0,45	0,8	0,35

Для каждой точки плана выполняли замесы, определяли растекаемость смеси, формовали образцы и испытывали в установленные сроки (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Матрица планирования двухфакторного трехуровневого эксперимента по влиянию количества суперпластификатора и тонкомолотого КВП на свойства мелкозернистого бетона

Точка плана	Матрица планирования		Квадраты переменных		Взаимодействие факторов	Расплав конуса, мм	Прочность при сжатии в возрасте 28 сут, МПа
	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$		
1	+1	+1	+1	+1	+1	130	41,2
2	+1	-1	+1	+1	-1	100	30,1
3	-1	+1	+1	+1	-1	170	43,8
4	-1	-1	+1	+1	+1	148	39
5	+1	0	+1	0	0	126	41,7
6	-1	0	+1	0	0	151	45,4
7	0	+1	0	+1	0	130	51,4
8	0	-1	0	+1	0	115	33,5
9	0	0	0	0	0	140	49,3

В результате статистической обработки экспериментальных данных были получены математические модели изменения прочностных показателей в зависимости от количества вводимых добавок. Уравнение регрессии прочности бетона при сжатии:

$$y = 48,26 - 5,03x_1 + 8,8x_2 - 3,7x_1^2 - 2,8x_2^2 - 2,175x_1 \cdot x_2. \quad (1)$$

Среднеквадратичное отклонение составляет 0,97, что говорит об адекватности модели.

Уравнение регрессии по величине расплыва конуса смесей в зависимости от количества вводимых добавок:

$$y = 135,1 - 15,3 x_1 + 16,9x_2 + 3,4x_1^2 - 6,1 x_2^2 - 2,7x_1 \cdot x_2. \quad (2)$$

Среднеквадратичное отклонение составляет 0,98, что также говорит об адекватности модели.

Анализ математических моделей прочности и подвижности бетона позволил сделать следующие выводы:

– наиболее значимым фактором в математических моделях 1 и 2 является расход суперпластификатора x_2 , так как коэффициенты при x_2 имеют максимальное значение по сравнению с x_1 по абсолютной величине. Знак «минус» при x_1 и «плюс» при x_2 в обеих моделях означает, что при увеличении количества наполнителя прочность и расплыв конуса будут снижаться, а при увеличении количества пластификатора – увеличиваться. Разные знаки, стоящие перед линейным и квадратичным факторами x_1 и x_2 , свидетельствуют о снижении прироста прочности и расплыва конуса в указанном диапазоне изменения расходов пластификатора и наполнителя. Знак минус при произведении коэффициентов x_1 и x_2 говорит о том, что прочность бетона и подвижность смеси будут снижаться при увеличении обоих компонентов (рис. 1, 2).

При расходе минерального наполнителя 12–20 % и пластификатора 0,7–0,8 % отчетливо видно, что расплыв мини-конуса находится в интервале 110–120 мм, при этом прочность в возрасте 28 сут возрастает до максимальных значений (см. рис. 1, 2). Последнее свидетельствует о рациональном подборе дозировки минерального наполнителя в твердеющей системе, заполняющего внутренний объем пор и дефектов и обеспечивающего повышение прочностных показателей.

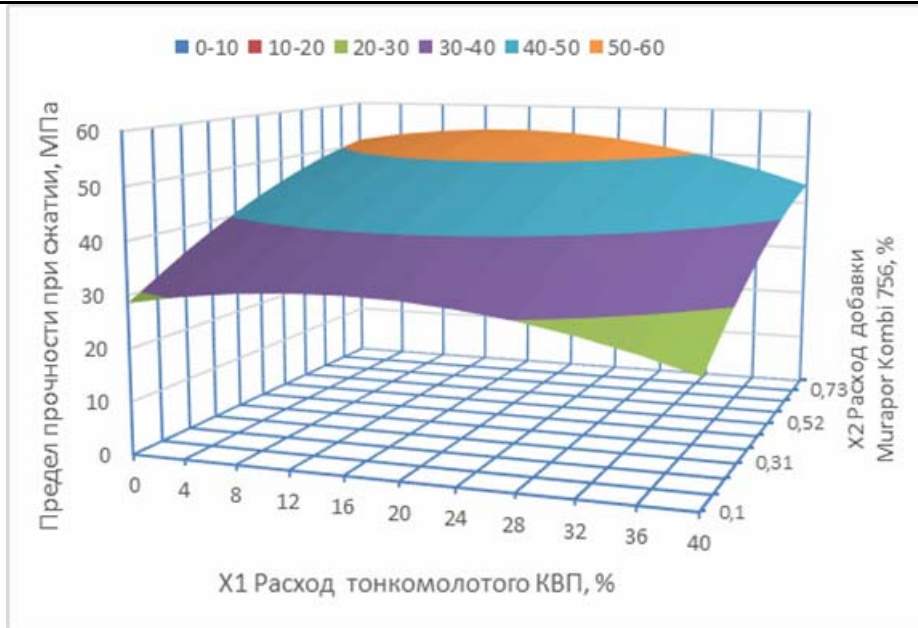


Рис. 1. Номограмма зависимости предела прочности при сжатии бетона от количества суперпластификатора и микронаполнителя

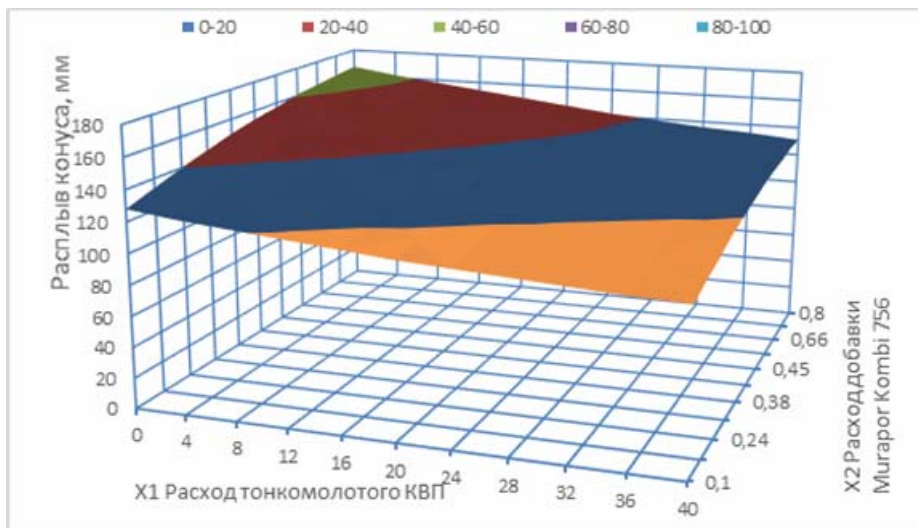


Рис. 2. Номограмма зависимости расплыва конуса бетонной смеси от количества суперпластификатора и микронаполнителя

Также была составлена матрица планирования эксперимента по влиянию количества цемента и тонкомолотого отсева дробления кварцопесчаника на свойства мелкозернистого бетона. Условия планирования эксперимента и матрица планирования приведены в табл. 4, 5.

Т а б л и ц а 4

Условия планирования эксперимента по влиянию количества цемента и тонкомолотого отсева КВП на свойства мелкозернистого бетона

№	Кодированный вид	Натур. вид	Диапазон варьирования			Шаг варьирования
			-1	0	+1	
1	X_1	Кол-во тонкомолотого отсева КВП, %	0	20	40	20
2	X_2	Кол-во портланд-цемента, кг/м ³	350	500	650	150

Уравнение регрессии прочности бетона при сжатии:

$$R_{28} = 46,13 - 3,3x_1 + 10,9x_2 - 6,5x_1^2 - 3,16x_2^2 - 0,32x_1 \cdot x_2. \quad (3)$$

Среднеквадратичное отклонение составляет 0,89, что говорит об адекватности модели.

Анализ математической модели прочности бетона (рис. 3) показал, что наиболее значимым фактором в математической модели является дозировка цемента x_2 , так как коэффициент при x_2 максимальный. Знак «минус» при x_1 и «плюс» при x_2 означает, что при увеличении количества наполнителя прочность будет снижаться, а при увеличении количества цемента – увеличиваться. Разные знаки, стоящие перед линейным и квадратичным фактором при x_2 , говорят о снижении прироста прочности в указанном диапазоне изменения расхода цемента.

Т а б л и ц а 5

Матрица планирования двухфакторного трехуровневого эксперимента по влиянию количества цемента и тонкомолотого отсева КВП на свойства мелкозернистого бетона

Точка плана	Матрица планирования		Квадраты переменных		Взаимодействие факторов	Прочность при сжатии 28 сут, МПа
	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$	
1	+1	+1	+1	+1	+1	42,2
2	+1	-1	+1	+1	-1	23,4
3	-1	+1	+1	+1	-1	58,5
4	-1	-1	+1	+1	+1	31,4
5	+1	0	+1	0	0	37,4
6	-1	0	+1	0	0	42,3
7	0	+1	0	+1	0	56,4
8	0	-1	0	+1	0	30,5
9	0	0	0	0	0	46,3

Сравнительно малая величина коэффициентов, стоящих перед квадратичными факторами x_1 и x_2 , говорит о линейном виде кривой и пропорциональном росте прочности бетона при увеличении расхода цемента и уменьшении количества наполнителя.

Установлено, что увеличение количества цемента и тонкодисперсной минеральной добавки до максимальных значений приводит к снижению прочности бетона при сжатии, т.к. несмотря на использование пластификатора происходит значительное возрастание доли мелких частиц и в результате – повышение водопотребности и воздухововлечения смеси с увеличением пористости и, следовательно, снижением прочности (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Свойства бетона в зависимости от количества портландцемента и тонкодисперсной минеральной добавки

№ п.п	Количество добавки, % (кг/м ³)	Цемент, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Пластификатор, %	Вода, л/м ³	В/Ц	Прочность при сжатии, МПа
1	40 (260)	650	1500	0,7	260	0,4	42,2
2	40 (140)	350	1500	0,7	140	0,4	23,4
3	0	650	1500	0,7	260	0,4	55,5
4	0	350	1500	0,7	140	0,4	31,4
5	40 (200)	500	1500	0,7	200	0,4	37,4
6	0	500	1500	0,7	200	0,4	42,3
7	20 (130)	650	1500	0,7	260	0,4	56,4
8	20 (100)	350	1500	0,7	200	0,4	30,5
9	20 (70)	500	1500	0,7	140	0,4	46,3

Введение 20 % наполнителя при расходе цемента 530–560 кг/м³ обеспечивает прочность при сжатии сопоставимую с аналогичным показателем у бездобавочного состава с максимальным расходом вяжущего, что можно объяснить микронаполняющим и пуццолановым эффектом минеральной добавки при достаточном количестве жидкой фазы для протекания реакций гидратации [9]. Таким образом, оптимальное значение количества цемента составляет 560 кг/м³, расхода наполнителя – 20 % от массы вяжущего (рис. 3).

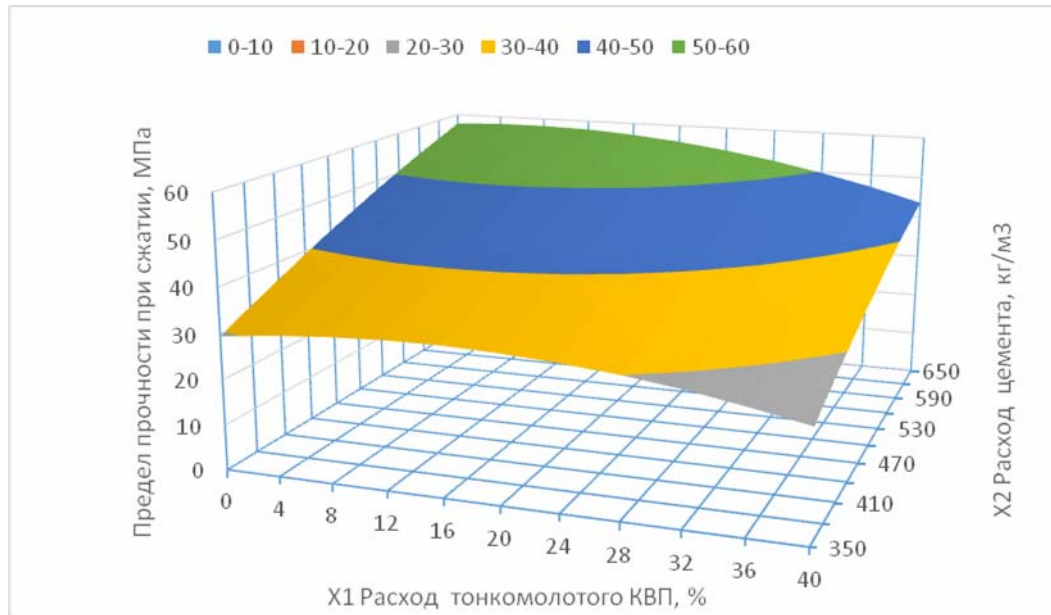


Рис. 3. Номограмма зависимости прочности при сжатии бетона от количества цемента и микронаполнителя

Метод растровой электронной микроскопии дополняет данные о формировании структуры цементной матрицы мелкозернистого бетона (рис. 4).

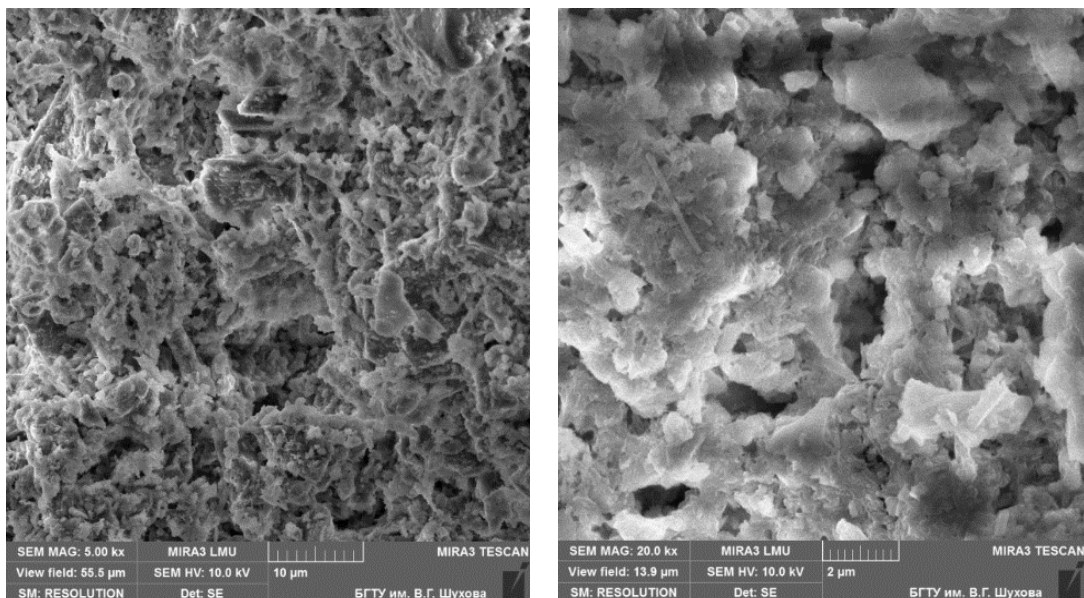


Рис. 4. Микроструктура цементных образцов

Межзерновое пространство бетона заполнено однородной малопористой цементирующей составляющей. Использование тонкомолотого кремнеземистого компонента обеспечивает уплотнение неклинкерной части цементной матрицы и кольматацию пор гидратными новообразованиями, которые характеризуются повышенной дисперсно-

стью, – гидросульфатоалюминатом, гидроалюминатами и гидросиликатами кальция, что обуславливает перераспределение пористости, рост однородности и прочности камня [8].

Наличие мелкодисперсных фаз свидетельствует о связывании портландита ультрадисперсной минеральной добавкой микрокремнезема. На микрофотографиях видно, что наличие в композиционном материале минеральных компонентов создает основу, на которой формируется прочный и плотный слой новообразований с хорошей контактной зоной, что обеспечивает повышение плотности и прочности композита в целом. Следовательно, для достижения необходимой пластичности смеси, ее формуемости как важных факторов получения дисперсно-армированных мелкозернистых 3D-бетонов при обеспечении требуемых показателей прочности на сжатие и изгиб является целесообразной добавка тонокодисперсного отсева КВП в количестве 12–20 % от массы вяжущего с заменой цемента.

ВЫВОДЫ

Получены уравнения регрессии, позволяющие определить величину влияния различных факторов (количества тонкомолотого отсева КВП, расхода пластифицирующей добавки и цемента) и эффектов их взаимодействия на прочность бетона при сжатии и удобоукладываемость смеси (расплав конуса). Установлены оптимальные показатели для достижения максимальной прочности, необходимой пластичности смеси, формуемости как важных факторов при получении дисперсно-армированных мелкозернистых 3D-бетонов: расход тонокодисперсного отсева КВП составляет 12–20 % от массы вяжущего; количество добавки пластификатора – 0,7–0,8 % от массы вяжущего, расход цемента – 530–560 кг/м³.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Планирование эксперимента. Обработка опытных данных: монография / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, А.П. Прошин. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 284 с.
2. Махортов, Д.С. Вяжущие композиции на основе портландцемента и вулканического пепла / Д.С. Махортов, Л.Х. Загороднюк, Д.А. Сумской // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Том 5. – № 4. – С. 30–38.
3. Гуторов, М.В. Вяжущие для строительных 3D-технологий / М.В. Гуторов, Н.Ю. Чепенко, А.С. Токарев, А.В. Потапенко, Е.В. Городецкий, И.В. Магомедов, З.Г. Абсиметов // Сборник материалов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – С. 1519–1524.
4. Тольпин, Д.Ф. Эффективный способ переработки бетонного лома 3D-печати / Д.Ф. Тольпин, Н.М. Тольпина // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 2. – С. 12–18.
5. Мухаметрахимов, Р.Х. Исследование пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства бетонов, формируемых методом 3D-печати / Р.Х. Мухаметрахимов // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 5. – С. 42–58.
6. Klyuev, S. Phase formation of mortar using technogenic fibrous materials / S. Klyuev, R. Fediuk, M. Ageeva, E. Fomina, A. Klyuev, E. Shorstova, S. Zolotareva, N.Shchekina, A. Shapovalova, L. Sabitov // Case Studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 16. – e01099.
7. Klyuev, S.V. Technology of 3-D printing of fiber reinforced mixtures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova, N.I. Vatin // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 141. – P. 224–230.
8. Klyuev, S.V. Fiber concrete for 3D additive technologies / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 367–372.
9. Klyuev, S.V. The micro silicon additive effects on the fine-grassed concrete properties for 3-D additive technologies / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 131–135.

Reference

1. Garkina, I.A. Experiment planning. Processing of experimental data: monograph / I.A. Garkina, A.M. Danilov, A.P. Proshin. – Penza: PGUAS, 2005. – 284 p.
2. Makhortov, D.S. Binder compositions based on Portland cement and volcanic ash / D.S. Makhortov, L.H. Zagorodnyuk, D.A. Sumskey // Construction Materials and Products. – 2022. – 5 (4). – P. 30–38.
3. Gutorov, M.V. Binders for 3D construction technologies / M.V. Gutorov, N.Yu. Chepenko, A.S. Tokarev, A.V. Potapenko, E.V. Gorodetsky, I.V. Magomedov, Z.G. Absimetov // Collection of materials of the International Scientific and Technical Conference of Young scientists of V.G. Shukhov BSTU. – 2017. – P. 1519–1524.
4. Tolybin, D.A. Effective method of processing 3D printing concrete scrap / D.A. Tolybin, N.M. Tolybina // Construction Materials and Products. – 2021. – 4 (2). – P. 12–18.
5. Mukhametrakhimov, R.Kh. Investigation of plasticizing additives based on polycarboxylate esters on the properties of concretes formed by 3D printing / R.Kh. Mukhametrakhimov // Construction Materials and Products. – 2022. – 5 (5). – P. 42–58.
6. Klyuev, S. Phase formation of mortar using technogenic fibrous materials / S. Klyuev, R. Fediuk, M. Ageeva, E. Fomina, A. Klyuev, E. Shorstova, S. Zolotareva, N.Shchekina, A. Shapovalova, L. Sabitov // Case Studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 16. – e01099.
7. Klyuev, S.V. Technology of 3-D printing of fiber reinforced mixtures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova, N.I. Vatin // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 141. – P. 224–230.
8. Klyuev, S.V. Fiber concrete for 3-D additive technologies / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 367–372.
9. Klyuev, S.V. The micro silicon additive effects on the fine-grassed concrete properties for 3D additive technologies / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 131–135.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2023_4_88

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
и технология строительного производства»
E-mail: loganin@mai.ru

Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Россия, Москва, Ярославское шоссе, д.26

Соколова Юлия Андреевна,
доктор технических наук, профессор,
академик РААСН, консультант кафедры
«Строительное материаловедение»

*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 and Construction Technologies»
E-mail: loganin@mai.ru

*National Research Moscow State University
of Civil Engineering*

Russia, Moscow, 26, Yaroslavskoe shosse

Sokolova Yulia Andreevna,
Doctor of Sciences, Professor, Academician of
the RAASN, Consultant of the Department
«Building Materials Science»

СИЛИКАТНЫЕ КРАСКИ ДЛЯ ОТДЕЛКИ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ

В.И. Логанина, Ю.А. Соколова

Приведены сведения о силикатных красках, применяемых для отделки фасадов зданий. Отмечены как положительные свойства силикатных покрытий, так и их недостатки. Рассмотрены полимерсиликатные и золь-силикатные краски

Ключевые слова: силикатные краски, жидкое стекло, полисиликатный раствор, модификация

SILICATE PAINTS FOR FINISHING BUILDINGS FACADS

V.I. Loganina, Yu.A. Sokolova

Information about silicate paints used for finishing facades of buildings is given. The positive and negative properties of silicate coatings are noted. Polymer-silicate and sol-silicate paints are considered.

Keywords: silicate paints, liquid glass, polysilicate solution, modification

Рост объёмов строительства предполагает значительное увеличение потребности в лакокрасочных материалах. В настоящее время для фасадов зданий применяют перхлорвиниловые (ПВХ), кремнийорганические, известковые, вододисперсные и другие красочные составы [1–5]. Находят широкое применение при отделке фасадов зданий и силикатные краски. Силикатные краски представляют собой суспензию пигментов и наполнителей в водном растворе жидкого калийного стекла. Силикатные краски на основе натриевого жидкого стекла имеют невысокое качество и обладают небольшой сопротивляемостью к погодным и атмосферным условиям. При производстве краски можно добавлять в ее основу такие составляющие, как литий и цезий, но эти компоненты достаточно дорогие и дефицитные, хотя краска с таким составом будет иметь самое высокое качество.

Силикатные краски на основе калиевого жидкого стекла обладают высокой степенью паро- и воздухопроницаемости, образуют при затвердевании прочные физико-химические связи с поверхностью, устойчивы к атмосферным явлениям. Срок службы силикатных красок может достигать 20 лет. Состав краски устойчив к различным микроорганизмам, поэтому не требует введения дополнительных фунгицидных добавок [6–8]. Качественные силикатные краски производятся по ГОСТ 18958 73.

Ожидается, что рынок силикатных покрытий будет расти значительными темпами (в среднем около 4 % в год), в основном по причине строгих экологических норм по контролю выбросов летучих органических соединений (ЛОС). Мировой рынок силикатных покрытий по своей природе сильно фрагментирован, и на пять ведущих игроков приходится небольшая доля (с точки зрения получаемой выручки) исследуемого рынка. Основными игроками на мировом рынке являются, среди прочих, фирмы AkzoNobel NV, KEIM Mineral Coatings of America, Inc., Hempel, Teknos Group и The Sherwin-Williams Company.

На российском рынке представлены силикатные краски российского производства GOODHIM KM0 (фирма GOODHIM), краска CERESIT CT 54 (фирма CERESIT, Германия – Россия), силикатная фасадная краска Profi-Sil Fassade (фирма DUFU, Германия – Россия), краска TIKKURILA (фирма TIKKURILA, Финляндия), BOLIX SZ (фирма BOLIX, Польша).

Основными видами силикатных лакокрасочных материалов, имеющих многолетний опыт применения, являются два вида силикатных красок – фасадная силикатная краска и цинкнаполненные краски для противокоррозионной защиты металла.

Разработка цинкнаполненных силикатных материалов для антикоррозионной защиты металла является ведущим направлением в области силикатных красок за рубежом [9, 10]. Однако простая композиция «силикат щелочного металла – цинковый порошок» используется ограниченно из-за ряда недостатков, к которым относятся невысокая водостойкость, низкая жизнеспособность, необходимость тщательной подготовки поверхности. Поэтому большое внимание уделяется цинксиликатным покрытиям, модифицированным различными добавками, позволяющими улучшить физико-механические, адгезионные и другие свойства покрытий.

Для повышения эксплуатационных свойств покрытий на основе силикатных красок в рецептуру вводят различные модифицирующие добавки. На основе разработанных составов авторы [11] предложили силикатные краски с бактерицидными свойствами (с содержанием в сухой пигментной части 1 % пентахлорфенола натрия), а также светящиеся краски, содержащие люминофоры.

Авторами работы [12] предложено вводить 5 % парафина в состав силикатной краски для уменьшения водопоглощения покрытий.

Также известны разработки, которые позволяют с использованием натриевого и калиевого жидкого стекла получать красочные составы с повышенными тиксотропными свойствами, с замедленным структурообразованием при стабилизации систем карбамидом в количестве 0,5–1 % от массы жидкого стекла [13–17].

Для снижения стоимости силикатных красок в работе [18, 19] в качестве пигмента вместо мела и талька для изготовления силикатных красок предлагается использовать транспортно-моечный осадок (ТМО) – отход свеклосахарного производства, предварительно модифицированный с помощью термической обработки. Авторами разработан способ получения пигмента на основе ТМО путем термоллиза при температуре процесса, равной 1000°C. Получен тонкодисперсный порошок различных цветов в зависимости от температуры обжига, обладающий свойствами пигмента для получения силикатных красок.

В патенте RU 2043375 описан состав силикатной краски, включающей жидкое калиевое стекло, минеральный наполнитель, пигмент, отвердитель и модификатор, в качестве модификатора применяется смесь золя кремнезёма и водной эмульсии пеностабилизаторов олигометил-фенилсилоксанов [20]. Однако такая краска имеет низкую жизнеспособность и нестабильность при хранении, что обусловлено повышенным содержанием пигмента, в качестве которого используют цинковые белила (ZnO), литопон (смесь ZnS и BaSO₄), свинцовые белила (2PbCO₃·Pb(OH)₂), железный сурик (Fe₂O₃). Содержание пигмента (силикатизатора) в количестве 20–25 % приводит к активному протеканию процесса силикатизации, в результате чего краска достаточно быстро затвердевает.

В патенте RU 2066336 предложено вводить в рецептуру силикатной краски в качестве наполнителя обогащенный каолин, а также алюминиевую пудру.

Недостатком покрытия является его малая жизнеспособность (20 суток), нестабильность при хранении.

Нашли широкое применение в отделке фасадов и полимерсиликатные краски. На сегодняшний день полимерсиликатные составы разделяются на три подтипа:

– силикатно-силиконовые (содержащие в составе силиконовую смолу, что способствует улучшению циркуляции воздуха, паропроницаемости с одновременным повышением водостойкости, защищающей от осадков);

– силикатно-акриловые (с добавлением в состав акрила и его производных, повышающих связующие свойства краски, что уменьшает необходимость в специальной подготовке поверхностей перед нанесением состава);

– смешанные (содержащие как акриловые, так и силиконовые связующие).

В работах авторов [21–23] было предложено вводить в состав силикатной краски акриловую дисперсию (АД). Добавление АД в количестве 5 % в сочетании с активным кремнеземистым компонентом (песок, маршалит, перлит, аэросил), количество которого зависит от природы наполнителя, позволяет производить одноупаковочную силикатную краску. При этом краски обладают повышенными технологическими и эксплуатационными характеристиками: морозостойкостью (5 циклов), покрытия на основе краски обладают гибкостью (менее одного балла), степенью меления не более двух баллов. Наилучшие показатели проявляются при использовании аэросила, что объясняется формированием волостонита игольчатой морфологии, силикатообразованием оксидов цинка и кальция. В составе красок опробованы различные кремнеземистые наполнители, отличающиеся по составу и дисперсности. Установлено, что покрытия, полученные с добавкой аэросила в количестве 0,25 %, имеют минимальные значения водопоглощения (0,15 %) и максимальную адгезионную прочность (1,1 МПа). Жизнеспособность краски составляет не менее одного года.

Нашли применение биоцидные покрытия на основе жидкого калиевого или смеси натриевого и калиевого стекол, специальные свойства которым придаёт акриловый латекс (до 25 %, Новопол 110). Покрытия на основе таких составов имеют устойчивость к воздействию высоких температур, обладают морозостойкостью и стойкостью к агрессивным средам, при этом составы, приготовленные на смеси калиевого и натриевого жидкого стекла, позволяют получить покрытия с низкой стоимостью, так как стоимость калиевого жидкого стекла в 2,5–3 раза выше натриевого.

В [24, 25] при разработке полимерсиликатной краски, предназначенной для внутренних отделочных работ, предлагается использовать стирол-акриловые дисперсии Лакротэн Э-21 и Новопол 110 и натриевое жидкое стекло. Содержание стирол-акриловой дисперсии составляет 30 % от массы жидкого стекла. Лакротэн Э-21 и Новопол 110 представляют собой водные дисперсии стирол-акрилового сополимера с содержанием сухого остатка 50 % и показателем рН 7-9. Красочные составы с применением стирол-акриловой дисперсии Новопол 110 отличаются меньшей вязкостью и более длительным высыханием покрытий по сравнению с составами на основе дисперсии Лакротэн Э-21. Результаты исследований эксплуатационных свойств краски и покрытий на основе разработанной полимерсиликатной краски свидетельствуют, что покрытия обладают достаточной адгезией к цементной подложке, составляющей 1,4–1,8 МПа, розлив составляет 4–5 мин, условная вязкость по вискозиметру ВЗ-4 – 8–16 с. Покрытия неводостойки, что обуславливает применение краски только для внутренних малярных работ. Покрытия обладают высокой декоративной выразительностью. Применение в качестве наполнителя местного материала (цветного песка) позволит расширить сырьевую базу, снизить затраты на изготовление краски.

В [26–29] при разработке полимерсиликатных красок предложено применять гидролизный лигнин. Авторами разработан состав лигнополимерсиликатного покрытия, включающий (%) водный раствор жидкого стекла – 74,0–76,0, бутадиенстирольный латекс – 5,0–7,0, микротальк – 5,0–10,0, порошок карбамида – 4,0–6,0, порошок гидролизного лигнина – 5,0–7,0. Введение лигнина в полимерсиликатную композицию в количестве 3,0–7,0 масс % позволяет регулировать консистенцию состава от вязко-текучей (максимум 250 с по вискозиметру ВЗ-4) до мастичной

(максимум 1 мм по прибору Вика), сохраняя при этом жизнеспособность состава до 60–90 мин – приемлемую для технологических операций. Установлено, что введение лигнина ускоряет в 1,8 раза процесс твердения полимерсиликатного покрытия. Адгезия покрытия к бетону составляет 1,3–1,5 МПа.

В патенте RU 2 671 751 предлагается применять в качестве полимерной водной дисперсии стирол-акриловую дисперсию марки Рузин-4Г, в качестве диспергатора – полиакрилат натрия и рыжиковое масло в качестве пеногасителя.

Представляет интерес использование в качестве связующего при изготовлении силикатных красок полисиликатных растворов. К полисиликатам относят [30,31] силикаты щелочных металлов (силикатный модуль от 4 до 25), представляющие собой переходную область составов от жидких стекол до кремнезелей, стабилизированных щёлочью. Полисиликаты характеризуются широким диапазоном степени полимеризации анионов и являются дисперсиями коллоидного кремнезёма в водном растворе силикатов щелочных металлов.

По химическому составу по мере возрастания щёлочности, характеризующейся мольным отношением $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ (силикатным модулем системы n) щелочные силикатные системы образуют ряд, соответствующий четырём приведённым формам кремнезёма [32]:



Наиболее распространенный путь получения полисиликатных растворов заключается во взаимодействии высокоактивных форм кремнезема, например частиц SiO_2 коллоидных размеров, смешивании стабилизированных растворов коллоидного кремнезема (золей) с гидроксидами щелочных металлов или водными растворами щелочных силикатов (жидкими стеклами).

В работах [33, 34] указывается, что растворы полисиликата натрия с модулем 6–8 можно получить добавлением раствора жидкого стекла к концентрированному золю кремнезема с размерами частиц 5–25 нм, и концентрация кремнезема в растворе может достигать 20 % SiO_2 . При этом на начальных стадиях процесса наблюдается гелеобразование. Длительного хранения такие растворы не выдерживают, в них выделяется кристаллический осадок.

Вышеуказанные особенности накладывают определенные ограничения и требования при разработке составов на полисиликатном растворе, от силикатного модуля которого зависит скорость твердения покрытий, при этом с технологической точки зрения преимущество отдаётся высокомолекулярному сырью.

На основе полисиликатного раствора разработан новый вид силикатных красок – золь-силикатные краски. Анализ рынка лакокрасочных материалов (ЛКМ) свидетельствует, что удельный вес золь-силикатных красок в структуре лакокрасочных материалов невелик.

На сегодняшний день одной из самых популярных золь-силикатных красок является «Histolith Sol-Silikat» производства компании «Saparol» (Германия). Особенность этой краски в том, что она выпускается в виде пасты, готовой к применению. Этот материал использовался при отделке стадиона ФК «Краснодар» (Краснодар), театра оперы и балета имени М. Джалиля (Казань), Казанского Кремля (Казань), современного музейно-выставочного комплекса «Новый Иерусалим» (г. Истра, Подмосковье). Покрытия на основе этой краски имеют следующие характеристики: плотность – 1440 кг/м³; коэффициент диффузии $S_d < 0,14$; водопроницаемость $W - 0,1 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}^{0,5})$, класс W3; средний расход 0,25–0,3 л/м² [35].

На рынке лакокрасочных материалов известна краска «КАЙМАН» производства немецкой фирмы «Alligator». Краска использовалась при отделке музея современного искусства Эрарта, музея истории Санкт-Петербурга. Покрытия имеют следующие технические характеристики: плотность – 1500 кг/м^3 ; паропроницаемость $V_1 < 0,03 \text{ м}$; коэффициент водонасыщения $W_3 0,1 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}^{0,5})$; средний расход около $0,13\text{--}0,2 \text{ л/м}^2$ [36].

С 2015 года на рынке ЛКМ известна немецкая компания «KEIM», выпускающая одноупаковочную золь-силикатную краску «KEIM Soldalit». KEIM Soldalit является высокоспециализированной силикатной фасадной краской на базе проверенного сочетания вяжущих веществ кизельзоля и жидкого стекла. Такая комбинация вяжущих позволяет наносить силикатные краски не только на минеральные, но и непосредственно на многочисленные органические основания без использования дополнительных адгезионных мостов сцепления. Содержит только устойчивые к воздействию погодных факторов наполнители и исключительно неорганические пигменты. Объединяет преимущества классических дисперсионных силикатных красок с возможностью их нанесения на основания, покрытые органически связанными окрасочными системами. KEIM Soldalit соответствует требованиям DIN18363, раздел 2.4.1 «Дисперсионные силикатные краски». Краска имеет следующие технические характеристики: плотность – $1500\text{--}1700 \text{ кг/м}^3$; pH менее 11; цветовая стойкость – А1; водонепроницаемость – $0,1 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}^{0,5})$; паропроницаемость $S_d 0,001 \text{ м}$, водопроницаемость $V > 2000 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$; толщина воздушного слоя – класс 1 по DIN EN ISO 7783-2. Краска использовалась при ремонте Белого Дома (США, 2013-2014), при реставрации гранд-отеля «Кемпински» (г. Бад-Доберан, Германия), дома В.В. Энгельгарда, Малого зала филармонии имени М.И. Глинки (Санкт-Петербург, Россия) [37].

Технологический процесс создания краски на основе жидкого стекла сложен, и не всегда удаётся достичь необходимых характеристик. Поэтому отечественных производителей золь-силикатной краски не так много. Одним из них является петербургская фирма «Фридендеръ», выпускающая краску «Прочнинъ». Краска использовалась при внутренней отделке театра «Школа современной пьесы», реставрации интерьера колокольни Новоспасского монастыря. Технические характеристики: плотность – $1500\text{--}1700 \text{ кг/м}^3$; содержание твёрдой фазы – $45\text{--}55 \%$; pH – 11; класс укрывистости – 1 по DIN 13300; паропроницаемость $S_d = 0,002 \text{ м}$, $V = 12000 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$; класс пожарной опасности – КМ0 [38].

Авторами [39–41] для создания золь-силикатной краски на базе отечественных материалов использовались щелочные золи кремниевой кислоты Nanosil 20 и Nanosil 30, жидкое стекло с силикатным модулем $M=2,78\text{--}3,29$. Установлено, что при смешивании жидкого стекла с модулем $M=2,78$ с щелочными зольями кремневой кислоты Nanosil 20 и Nanosil 30 с pH 10 в количестве $5\text{--}15 \%$ от массы жидкого стекла можно получить полисиликатные растворы с модулем $M=4,25\text{--}5,29$. pH полисиликатного раствора непрерывно изменяется. После смешивания жидкого стекла и золя кремниевой кислоты pH выше, чем на более поздних стадиях. При увеличении количества вводимого золя кремниевой кислоты наблюдается снижение pH полисиликатных растворов при неизменной концентрации щелочи. При концентрации золя Nanosil 20 в количестве 15% от массы жидкого стекла pH раствора составляет $10,95$, стабилизация pH наблюдается спустя 27 часа после смешивания.

Введение золя кремниевой кислоты приводит к изменению вязкости растворов, причем на начальном этапе чем выше содержание золя кремниевой кислоты, тем в более значительной степени наблюдается снижение вязкости. Однако спустя некоторое время хранения отмечается возрастание вязкости полисиликатного раствора и гелеобразование.

При содержании золя в количестве 7% от массы жидкого стекла возрастание вязкости происходит спустя 3 суток хранения. В возрасте более 4 суток хранения возрастание вязкости наблюдается при содержании золя в количестве 1% (рис. 1).

Авторами с помощью молибдатного метода установлено, что введение золя кремниевой кислоты способствует увеличению доли высокополимерных фракций

кремнекислородных анионов (ККА) γ -SiO₂, причём с увеличением содержания золя доля полимерной формы кремнезёма возрастает (табл. 1).

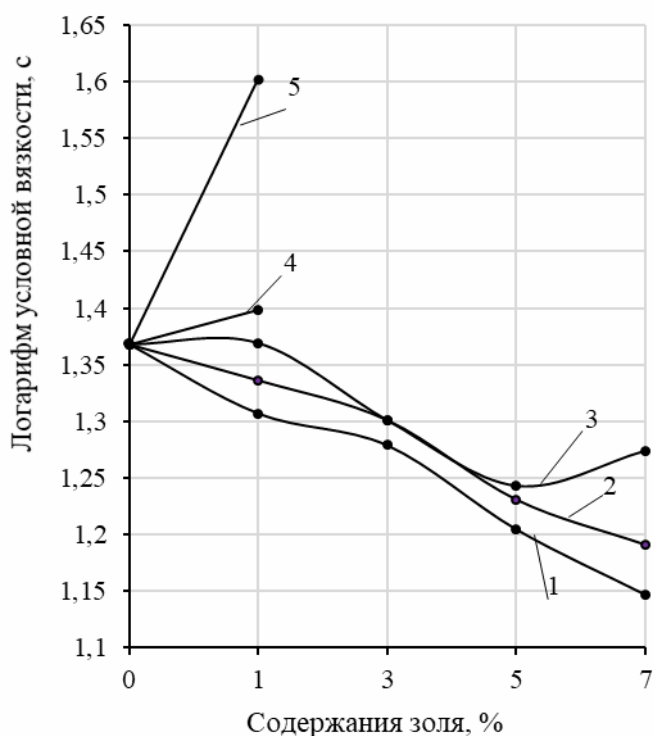


Рис. 1. Изменение вязкости натриевого полисиликатного раствора в зависимости от содержания золя кремниевой кислоты (Nanosil 20):
1 – после приготовления; 2 – через сутки; 3 – через 3 суток; 4 – через 5 суток; 5 – через 7 суток

Т а б л и ц а 1

Изменение коллоидно-химического состояния кремнезёма в зависимости от содержания золя кремниевой кислоты

Содержание золя, %	Общее содержание кремнезема SiO ₂ , %	Содержание α -SiO ₂ + β -SiO ₂ , %	Содержание γ -SiO ₂ , %
0	21,9	19,38	2,51
5	26,21	18,61	7,6
10	30,39	17,71	12,68
15	34,93	15,00	19,93

Зависимость содержания кремнезёма в мономерной форме (α -SiO₂) на ранних стадиях взаимодействия золя с жидким стеклом носит экстремальный характер. Максимальное содержание α -SiO₂ наблюдается спустя 60 минут в зависимости от вида жидкого стекла и количества введённого золя. Спустя 60 минут содержание кремнезёма α -SiO₂ в полисиликатном растворе составляет 6,97 % при содержании 5 % золя (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Изменение α -SiO₂ и β -SiO₂ в процессе старения полисиликатных растворов

Время, мин	Содержание золя кремниевой кислоты от массы жидкого стекла, %					
	5		10		15	
	α -SiO ₂	β -SiO ₂	α -SiO ₂	β -SiO ₂	α -SiO ₂	β -SiO ₂
1	2	3	4	5	6	7
2,5	1,51	17,09	2,73	14,97	6,21	8,78
5,0	2,24	16,36	4,33	13,37	6,91	8,08
7,5	3,21	15,39	5,23	12,47	7,13	7,86

1	2	3	4	5	6	7
10	3,79	14,81	5,62	12,08	7,28	7,71
12,5	4,42	14,18	6,19	11,51	7,51	7,48
15	4,76	13,84	6,49	11,21	7,61	7,38
17,5	5,05	13,55	6,79	10,91	7,64	7,35
20	5,34	13,26	7,05	10,65	7,77	7,22
25	6,74	11,87	7,52	10,18	7,98	7,01
27,5	6,77	11,84	7,67	10,03	7,99	7,01
30	6,79	11,82	8,08	9,63	8,09	6,96
45	6,86	11,72	8,14	9,57	8,23	6,98
60	6,97	11,64	7,47	8,83	8,14	6,85
120	6,94	11,66	7,53	8,98	7,98	6,84
180	6,68	11,93	7,30	9,06	7,74	7,16
240	6,76	11,85	7,05	9,45	7,75	7,24
360	6,73	11,87	6,85	9,49	7,17	7,60

Прочность при растяжении пленок на основе золь-силикатной краски составляет $R_p=2,3$ МПа, а на основе силикатной краски – 1,86 МПа. Покрытия на основе золь-силикатной краски характеризуются большей растяжимостью, составляющей 0,028 мм/мм, в то время как растяжимость покрытий на основе силикатной краски – 0,023 мм/мм. Модуль упругости пленки на основе силикатной краски составляет $E=0,130 \cdot 10^4$ МПа, а на основе золь-силикатной краски – $0,144 \cdot 10^4$ МПа (рис. 2).

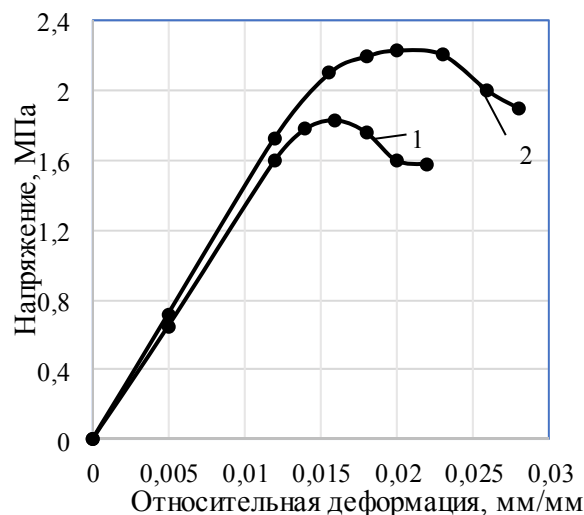


Рис. 2. Диаграмма «напряжение-деформация» для плёнок на основе:
1 – силикатной краски; 2 – золь-силикатной краски

Методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) установлено, что для покрытий на основе золь-силикатной краски характерно более равномерное распределение шероховатости. Так, шероховатость поверхности покрытия на основе силикатной краски составляет $R_a=9,1$ мкм, а на основе золь-силикатной краски – 6,2 мкм.

Оценка эксплуатационной стойкости покрытий на основе золь-силикатной краски проводилась также по результатам испытания на попеременное замораживание-оттаивание. За «отказ» принималось состояние покрытия, оценённое III.3 баллами в соответствии с ГОСТ 6992 «Покрытия лакокрасочные. Метод испытаний на стойкость в атмосферных условиях». Установлено, что марка по морозостойкости покрытий составляет 35.

В табл. 3 приведены значения свойств золь-силикатной краски и покрытий на ее основе. В качестве прототипа 1 выбрана золь-силикатная краска KEIM Sodalit фирмы

KeimFarben, в качестве прототипа 2 – краска Histolith Sol-Silikat, производимая компанией Caparol.

Т а б л и ц а 3

Технологические и эксплуатационные свойства золь-силикатных красок и покрытий на их основе

Параметр	Разрабатываемый состав	Прототип 1	Прототип 2
Условная вязкость по ВЗ-4, с	25-30	25	40-45
Плотность, кг/м ³	1400	1500	1600
Время высыхания до степени 5 при 20°C, мин, не более	41	30	25
Паропроницаемость, г/(м ² ·сут) (ГОСТ 33355-2015)	155	135	150
Розлив, оценка	1	1	1
Прочность на растяжение, МПа	2,30	1,84	2,22
Группа горючести	Г1	Г2	Г1
Укрывистость, г/м ²	186,5	210	185
Морозостойкость, цикл	35	30	35

Разработанные золь-силикатные краски имеют ряд преимуществ по сравнению с прототипами: высокую прочность на растяжение $R_p = 2,3$ МПа, высокую паропроницаемость $\mu = 155$ г/(м²·сут).

В последние годы растет применение полимерсиликатных композиционных материалов, представляющих собой водорастворимые силикаты с активными добавками веществ фуранового ряда. Они работают в условиях кислых и нейтральных сред и под воздействием повышенных температур. Материалы являются дешевыми и простыми в изготовлении, нетоксичными, негорючими. Введением специальных органических силикатных добавок, таких, как тетрафурфурилоксисилан (ТФС), можно достичь значительного увеличения плотности и прочности силикатной матрицы в агрессивных средах за счет упрочнения контактов между силикатными глобулами связующего геля и щелочным компонентом благодаря «прививке» фуранового радикала [42–45].

Значительное увеличение прочности, тепловой и огневой стойкости силикатной матрицы достигается введением в состав сложных эфиров ортокремниевой кислоты (тетрафурфурилоксисиланы – ТФС) и фурфурилового спирта. Эффект достигается за счет усиления контактов между глобулами силикагеля и модификации щелочной составляющей, за счет «прививки» фуранового радикала. Введение в связующее добавки ТФС приводит к образованию наночастицы SiO₂ и ФА, заполняющих матрицу и образующих сшитый полимер. Эти частицы действуют как центры зарождения и кристаллизации. Добавление ТФС повышает механическую и химическую стойкость вяжущего; этот подход стал широко применяться для получения кислотостойких покрытий.

Список литературы

1. Климанова, Е.А. Силикатные краски. Получение, свойства и применение / Е.А. Климанова, Ю.А. Барщевский, И.Я. Жилкин. – М.: Стройиздат, 1968. – 86 с.
2. Разговоров, П.Б. Создание неорганических композиций на основе модифицированных водорастворимых силикатов / П.Б. Разговоров // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, вып. 10. – С. 3–14.
3. Агафонов, Г.И. Силикатные лакокрасочные материалы / Г.И. Агафонов, И.А. Безгузикова, Э.Ф. Ицко. – М.: НИИТЭхим, 1989. – 44 с.
4. Агафонов, Г.И. Лакокрасочные покрытия на основе жидких стёкол / Г.И. Агафонов, В.И. Корнеев. – М.: Химия, 1988. – 765 с.

5. Беднов, С. Рынок вододисперсной ЛКМ: 23-я международная специализированная выставка «ИнтерЛакоКраска 2019». – URL: <http://coatings-today.com/news/view/344>
6. Григорьева, М.Е. Разработка водно-дисперсионных лакокрасочных материалов противокоррозионного назначения на основе латексов фосфорсодержащих стирол-акрилатных сополимеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / М.Е. Григорьева. – СПб., 2009. – 112 с.
7. Карасев, К.И. Химическая стойкость силикатных красок / К.И. Карасев // Строительные материалы. – 1962. – № 3. – С. 32–37.
8. An-Peng, T.A. Theory for polymerization of silica acid / T.A. An-Peng // Scientia Sinica. – 1963. – Vol. 9. – P. 1311–1320.
9. Figovsky, O.L. Conductive Coatings Based on Quaternary Ammonium Silicates / O.L. Figovsky, V. Karchevsky, F. Romm // Organic-Inorganic Hybrids II. Science, Technology, Applications, University of Surrey. – 2002. – P. 11.
10. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries // Journal Scientific Israel – Technological Advantages. – 2014. – Vol.16, №2. – P. 147–170.
11. Pat. C09D 1/04, C09D 5/16, C09D 7/12 C09D 1/04, C09D 5/1656 C09D 5/1687 High-antifouling inorganic silicate paint containing organosilicone, and preparation method and application thereof / Wang Z [ZN], Liu W [ZN], Luo G [ZN] assignee Nanxiong Material Production Base of Chinese Academy of Sciences Guangzhou Chemical CO., Ltd [ZN].
12. Pat. C09D 5/16, C08K 3/34, C08K 7/26, C09D 1/00, C09D5/1687 C09D 5/00, C09D 5/16 Method for treating surfaces on marine objects with anti-fouling paint / Haeffner M [DE], Ekstrand H [DE] assignee EKOMARINE PAINT INC [DE].
13. Тарасова, Г.И. Научные основы и методология комплексной переработки и утилизации многотоннажных кальцийкарбонат-, кальцийсульфат- и металлосодержащих отходов: дис. ... д-ра техн. наук: 03.02.08 / Г.И. Тарасова. – Иваново, 2014. – 353 с.
14. Bergna, H.E. Colloidal Silica. Fundamentals and Applications / H.E. Bergna, W.O. Roberts. – Taylor and Francis, 2006. – 884 p.
15. Carman, P.C. Constitution of colloidal silica / P.C. Carman // Transactions Faraday Society. – 1940. – Vol.36. – P. 964–973.
16. Разговоров, П.Б. Физико-механические свойства композиций из модифицированного натриевого жидкого стекла и каолина / П.Б. Разговоров // Известия вузов. Химия и хим. технология. – 2016. – Т. 59, вып. 11. – С. 106–111.
17. Патент RU 2108356 C1(51) МПК C09D 1/02(2006.01) C09D /04(2006.01). Состав силикатной пигментированной краски / Варфоломеева Л.К., Фомина О.А., Кайгородова И.К., Хрулев В.М., Машкин Н.А.; заявитель и патентообладатель Индивидуальное частное предприятие охранно-противопожарных работ «Сигнал» – Донин, заявлено 1995.03.25, опублик. 1998.04.10
18. Тарасова, Г.И. Исследование возможности использования термолитного дефеката в качестве наполнителя в силикатные краски / Г.И. Тарасова, М.В. Павлова // Безопасность жизнедеятельности. – 2012. – №8. – С. 26–28.
19. Патент РФ No2540434 МПК C09D 1/02. Силикатная краска / Тарасова Г.И., Тарасов В.В., Сапронова Ж.А; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, заявлено 11.07.2013, опубликовано: 10.02.2015, Бюл. No 4.
20. Лебедева, Е.Ю. Композиционные силикатные краски с улучшенными технологическими свойствами / Е.Ю. Лебедева, О.В. Казьмина // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении. – 2015. – С. 131–135.
21. Шинкарева, Е.В. Однокомпонентная фасадная краска на основе жидкого калиевого стекла производства ОАО «Домановский ПТК» / Е.В. Шинкарева // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2013. – № 6. – С. 28–33.

22. Patent CN1297614 C09D 1/04, C09D 5/10 Water-based inorganic zinc-rich anticorrosive paint and preparing method of high-modulus potassium silicate solution / Wang X [ZN], Zhang Y[ZN], Ren X[ZN] assignee Chongqing Aipu Chemical CO., Ltd [ZN].
23. Логанина, В.И. Полимерсиликатные краски для внутренних отделочных работ / В.И. Логанина, С.М. Саденко, Т.С. Савина // Бетон и железобетон в Украине. – 2008. – №6. – С.20–24.
24. Шмарова, Т.С. Технологические свойства полимерсиликатных красок для внутренних отделочных работ / Т.С. Шмарова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – №1(11). – С.309–309.
25. Шибаева, Г.Н. Лигнополимерсиликатная композиция для защиты строительных конструкций от коррозии / Г.Н. Шибаева, Г.В. Шурышева // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии. – Тула: ТулГУ, 2003. – С. 86–87.
26. Шурышева, Г.В. Лигнополимерсиликатные футеровочные покрытия-обмазки для защиты бетона от органической коррозии / Г.В. Шурышева // Вестник Хакасского техн. ин-та – филиала КГТУ. – Абакан, 2005. – Вып. 19. – С. 138–139.
27. Шурышева, Г.В. Полимерсиликатное защитное покрытие / Г.В. Шурышева // Известия ВУЗов. Строительство. – 2006. – № 9. – С. 25–28.
28. Пат. 2280057 Российская Федерация, МПК C09J 1/02, C09J 109/08. Состав для склеивания легких бетонов и способ его получения / Хрулев В.М., Ибатуллин Р.Р., Хасанов Р.Ш., Соломонова Е.Б., Шурышева Г.В.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный нефтяной технический университет. – No 2004133434/04; заявл. 16.11.04; опубл. 20.07.06, Бюл. No 20. – 3 с.
29. Пат. 2272009 Российская Федерация, МПК C04B 28/26, C04B 111/20. Сырьевая смесь для изготовления теплоизоляционных изделий / Соломонова Е.Б., Хрулев В.М., Шибаева Г.Н., Шурышева Г.В.; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. – No 2003105130/03; заявл. 04.08.03; опубл. 20.03.06, Бюл. No 8. – 3 с.
30. Айлер, Р. Химия кремнезема: в 2 т. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982. – 712 с.
31. Айлер, Р. Химия кремнезема: пер. с англ. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982. – Ч. 1. – 416 с.
32. Фиговский, О.Л. Жидкое стекло и водные растворы силикатов как перспективная основа технологических процессов получения новых композиционных материалов / О.Л. Фиговский, П.Г. Кудрявцев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 29, № 2. – С. 117.
33. Корнеев, В.И. Производство и применение растворимого стекла / В.И. Корнеев, В.В. Данилов. – СПб.: Стройиздат, 1991. – 176 с.
34. Greenwood, P. Modified silica sols: titania dispersants and co-binders for silicate paints / P. Greenwood // Pigment&Resintechnology, – 2010. – Vol. 39, Issue 6 – P. 315–321. – DOI: 10.1108/03699421011085803
35. Histolith Sol-Silikat. Золь-силикатная краска. – URL: <http://www.caparol.ru/produkty/materialy-dlja-restavracii-pamjatnikov-arkhitektury/histolith/histolith-silikatnaja-programma/histolith-sol-silikat>
36. КАЙМАН. Золь-силикатная краска. – URL: <http://www.alligator.spb.ru/catalog/materialy-tm-kayman/zol-silikatnaya-kraska-tm-kayman>.
37. KEIM Soldalit. Золь-силикатная фасадная краска для универсального применения. – URL: <http://www.keim.com/ru-ru/produkcija/fasadnye-kraski/soldalit>.
38. Прочнинъ. Золь-силикатная краска. – URL: <http://www.fridlender.ru/products/solsilicate/zol-silikatnaya-kraska-prochnin/>.
39. Loganina, V.I. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 9. – e00173.
40. Логанина, В.И. Свойства модифицированного связующего для силикатных красок / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, В.С. Демьянова, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 17–23.

41. Логанина, В.И. Разработка рецептуры золь-силикатной краски / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, В.С. Демьянова, Е.Б. Мажитов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 3 (32). – С. 51–53.
42. Кудрявцев, П.Г. Наноструктурированные материалы, получение и применение в строительстве / П.Г. Кудрявцев, О.Л. Фиговский // Нанотехнологии в строительстве. – 2014. – Т. 6, No 6. – С. 27–45.
43. Пат. 2408552. Российская Федерация, МПК C04B26/02 (2006.01), C09D1/02 (2006.01), Наноструктурированное связующее в композитных строительных материалах / Бейлин Д.А., Борисов Ю.М., Фиговский О.Л., Суровцев И.С., заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ВГАСУ, заявл. 28.04.2009; Опубл.:10.01.2011. Бюл. No 1. – 7 с.
44. Figovsky, O. Advanced nanomaterials based on soluble silicates / O. Figovsky, P. Kudryavtsev // Scientific Israel – Technological Advantages, – 2014. – Vol. 16, No. 3. – P. 38–76.
45. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14, No 1. – P. 7–12.
46. Figovsky, O. L. Advanced Composite Materials Based on Silicate-Polymers Matrix / O. L. Figovsky // Proceedings of Pan-Asian Aerospace Technology Conference. – Beijing, China, 1994.

References

1. Klimanova, E.A. Silicate paints. Obtaining, properties and application / E.A. Klimanova, Yu.A. Barshchevsky, I.Ya. Zhilkin. – M.: Stroyizdat, 1968. – 86 p.
2. Razgovorov, P.B. Creation of inorganic compositions based on modified water-soluble silicates / P.B. Razgovorov // Izv. universities. Chemistry and chemical technology. – 2012. – Vol. 55, Iss. 10. – P. 3–14.
3. Agafonov, G.I. Silicate paintwork materials / G.I. Agafonov, I.A. Bezguzikova, E.F. Itsko. – M.: NIITEkhim, 1989. – 44 p.
4. Agafonov, G.I. Paint coatings based on liquid glasses / G.I. Agafonov, V.I. Korneev. – M.: Chemistry, 1988. – 765 p.
5. Bednov, S. Water-dispersed coatings market / S. Bednov // 23rd international specialized exhibition «InterLakoKraska 2019». – URL: <http://coatings-today.com/news/view/344>
6. Grigorieva, M.E. Development of water-dispersion anti-corrosion paintwork materials based on phosphorus-containing styrene-acrylate copolymer latexes: cand. of Sciences: 05.23.05 / Grigoreva Maria Evgenievna. – St. Petersburg, 2009. – 112 p.
7. Karasev, K.I. Chemical resistance of silicate paints / K.I. Karasev // Construction materials. – 1962. – No. 3. – P. 32–37.
8. An-Peng, T. A theory for polymerization of silica acid / T. An-Peng // Scientia Sinica. – 1963. – Vol. 9. – P. 1311–1320.
9. Figovsky, O.L. Conductive Coatings Based on Quaternary Ammonium Silicates / O.L. Figovsky, V. Karchevsky, F. Romm // Organic-Inorganic Hybrids II. Science, Technology, Applications, University of Surrey. – 2002. – P. 11.
10. Kudryavtsev, P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries / P.G. Kudryavtsev // Journal Scientific Israel – Technological Advantages, – 2014. – Vol.16, №2. – P. 147–170.
11. Pat. C09D 1/04, C09D 5/16, C09D 7/12 C09D 1/04, C09D 5/1656 C09D 5/1687 High-antifouling inorganic silicate paint containing organosilicone, and preparation method and application thereof / Wang Z [ZN], Liu W [ZN], Luo G [ZN] assignee Nanxiong Material Production Base of Chinese Academy of Sciences Guangzhou Chemical CO., Ltd [ZN].

12. Pat. C09D 5/16, C08K 3/34, C08K 7/26, C09D 1/00, C09D5/1687 C09D 5/00, C09D 5/16 Method for treating surfaces on marine objects with anti-fouling paint / Haeffner M [DE], Ekstrand H [DE] assignee EKOMARINE PAINT INC [DE].
13. Tarasova, G.I. Scientific bases and methodology of complex processing and utilization of large-tonnage calcium carbonate-, calcium sulfate- and metal-containing wastes: dis. ... Dr. of Sciences: 03.02.08 / G.I. Tarasova. – Ivanovo, 2014. – 353 p.
14. Bergna, H.E. Colloidal Silica. Fundamentals and Applications / H.E. Bergna, W.O. Roberts. – Taylor and Francis, 2006. – 884 p.
15. Carman, P.C. Constitution of colloidal silica / P.C. Carman // Transactions Faraday Society. – 1940. – Vol.36. – P. 964–973.
16. Razgovorov, P.B. Physico-mechanical properties of compositions from modified sodium liquid glass and kaolin / P.B. Razgovorov // Izvestiya vuzov. Chemistry and chem. technology. – 2016. – Vol. 59, Iss. 11. – P. 106–111.
17. Patent RU 2108356 C1(51) IPC C09D 1/02(2006.01) C09D /04(2006.01) The composition of the silicate pigmented paint / Varfolomeeva L.K., Fomina O.A., Kaigorodova I.K., Khrulev V.M., Mashkin N.A.; applicant and patent holder Individual private enterprise of security and fire-fighting works «Signal» – Donin, declared 1995.03.25, publ. 1998.04.10
18. Tarasova, G.I. Study of the possibility of using thermolysis defecation as a filler in silicate paints / G.I. Tarasova, M.V. Pavlova // Life safety. – 2012. – No8. – P. 26–28.
19. Patent RU 2540434 IPC C09D 1/02. Silicate paint / Tarasova G.I., Tarasov V.V., Saprionova Zh.A.; applicant and patent holder federal state budgetary educational institution of higher professional education Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov, announced 07/11/2013, published: 02/10/2015 Bull. no 4
20. Lebedeva, E.Yu. Composite silicate paints with improved technological properties / E.Yu. Lebedeva, O.V. Kazmina // Materials and technologies of new generations in modern materials science – 2015. – P. 131–135.
21. Shinkareva, E.V. One-component facade paint based on liquid potassium glass produced by OAO Domanovsky PTK / E.V. Shinkareva // Lacquer-and-lacquer materials and their application. – 2013. – No. 6. – P. 28–33.
22. Patent CN1297614C C09D 1/04, C09D 5/10 Water-based inorganic zinc-rich anticorrosive paint and preparing method of high-modulus potassium silicate solution / Wang X [ZN], Zhang Y[ZN], Ren X[ZN] assignee Chongqing Aipu Chemical CO., Ltd [ZN].
23. Loganina, V.I. Polymersilicate paints for interior finishing works / V.I. Loganina, S.M. Sadenko, T.S. Savina // Concrete and reinforced concrete in Ukraine. – 2008. – No. 6. – P.20–24.
24. Shmarova, T.S. Technological properties of polymer silicate paints for interior finishing works / T.S. Shmarova // News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2009. – No. 1 (11). – P.309–309.
25. Shibaeva, G.N. Lignopolymer-silicate composition for protection building structures from corrosion / G.N. Shibaeva, G.V. Shuryshv // Actual problems of construction and construction industry: Sat. – Tula: TulGU, 2003. – P. 86–87.
26. Shuryshva, G.V. Lignopolymersilicate lining coatings – Coatings to protect concrete from organogenic corrosion / G.V. Shuryshva // Bulletin of Khakasskogo tekhn. in-ta – branch of KSTU. – Abakan, 2005. – Issue. 19. – P. 138–139.
27. Shuryshva, G.V. Polymersilicate protective coating / G.V. Shuryshva // Izvestiya VUZov. Construction. – 2006. – No 9. – P. 25–28.
28. Patent RU 2280057 Russian Federation, IPC C09J 1/02, C09J 109/08. Composition for gluing lightweight concrete and method of obtaining it / Khrulev V.M., Ibatullin R.R., Khasanov R.Sh., Solomonova E.B., Shuryshva G.V.; applicant and patent holder Ufa State Oil Company Technical University. – No. 2004133434/04; dec. 11/16/04; publ. 07/20/06, Bull. No 20. – 3 p.
29. Patent RU 2272009, IPC C04B 28/26, C04B 111/20. Raw mixture for the manufacture of thermal insulation products / Solomonova E.B., Khrulev V.M., Shibaeva G.N., Shuryshva G.V.; applicant and patent holder Novosibirsk State University of

Architecture and Civil Engineering. – No. 2003105130/03; dec. 04.08.03; publ. 03/20/06, Bull. No 8. – 3 p.

30. Ayler, R. The chemistry of silica: in 2 vol. / R. Ayler. – M.: Mir, 1982. – 712 p.

31. Ayler, R. Silica Chemistry: trans. from English / R. Ayler. – M.: Mir, 1982. – P. 1.–416 p.

32. Figovsky, O.L. Liquid glass and aqueous solutions of silicates as a promising basis for technological processes for obtaining new composite materials / O.L. Figovsky, P.G. Kudryavtsev // Engineering Bulletin of the Don. – 2014. – Vol. 29, No. 2. – P. 117.

33. Korneev, V.I. Production and use of soluble glass / V.I. Korneev, V.V. Danilov. – St. Petersburg: Stroyizdat, 1991. – 176 p.

34. Greenwood, P. Modified silica sols: titania dispersants and co-binders for silicate paints / P. Greenwood // Pigment&Resintechology, – 2010. – Vol. 39, Iss. 6 – P. 315–321. – DOI: 10.1108/03699421011085803

35. Histolith Sol-Silikat. Sol-silicate paint. – URL: <http://www.caparol.ru/produkt/materialy-dlja-restavracii-pamjatnikov-arkhitektury/histolith/histolith-silikatnaja-programma/histolith-sol-silikat>

36. CAYMAN: Zol-silicate paint. – URL: <http://www.alligator.spb.ru/catalog/materialy-tm-kayman/zol-silikatnaya-kraska-tm-kayman>.

37. KEIM Soldalit. Zol-silicate facade paint for universal use. – URL: <http://www.keim.com/ru-ru/produkcija/fasadnye-kraski/soldalit>.

38. Prochnin. Zol-silicate paint. – URL: <http://www.fridlender.ru/products/solsilicate/zol-silikatnaya-kraska-prochnin/>

39. Loganina, V.I. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 9. – e00173.

40. Loganina, V.I. Properties of a modified binder for silicate paints / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, V.S. Demyanova, E.B. Mazhitov // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4 (33). – P. 17–23.

41. Loganina, V.I. Development of a sol-silicate paint formulation / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, V.S. Demyanova, E.B. Mazhitov // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 3 (32). – P. 51–53.

42. Kudryavtsev, P.G. Nanostructured materials, obtaining and application in construction / P.G. Kudryavtsev, O.L. Figovsky // Nanotechnologies in construction. – 2014. – Vol. 6, No 6. – P. 27–45

43. Patent RU 2408552, IPC C04B26/02 (2006.01), C09D1/02 (2006.01), Nanostructured binder in composite building materials / Beilin D.A. applicant and patent holder GOU VPO VGASU, Appl. 04/28/2009; Published: 10.01.2011 Bull. No 1.-7 p.

44. Figovsky, O. Advanced nanomaterials based on soluble silicates / O. Figovsky, P. Kudryavtsev // Scientific Israel – Technological Advantages, – 2014. – Vol. 16, No. 3. – P. 38–76.

45. Figovsky, O. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials / O. Figovsky, Yu. Borisov, D. Beilin // Scientific Israel – Technological Advantages. – 2012. – Vol. 14, No 1. – P. 7–12.

46. Figovsky, O.L. Advanced Composite Materials Based on Silicate-Polymers Matrix / O.L. Figovsky // Proceedings of Pan-Asian Aerospace Technology Conference. – Beijing, China, 1994.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2023_4_101

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
и технология строительного производства»
E-mail: loganin@mai.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 and Construction Technologies»
E-mail: loganin@mai.ru

НАНОРАЗМЕРНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ ДЛЯ ИЗВЕСТКОВЫХ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

В.И. Логанина

Описаны различные технологии получения синтетических гидросиликатов кальция, предназначенных в качестве модифицирующей добавки в известковых сухих строительных смесях. Выявлено, что добавка на основе гидросиликатов кальция характеризуется высокой активностью, введение в известковые составы добавок на основе ГСК приводит к ускорению процесса твердения и повышению прочности известковых образцов.

С применением наноразмерной добавки на основе синтетических гидросиликатов кальция разработаны составы сухих строительных смесей, предназначенных для реставрации и отделки стен зданий.

Ключевые слова: наноразмерные добавки, известь, гидросиликаты кальция, структура, свойства

NANOSCALE MODIFIERS FOR LIME DRY CONSTRUCTION MIXTURES

V.I. Loganina

Various technologies for the production of synthetic calcium hydrosilicates intended for use as a modifying additive in lime dry building mixtures are described. It is found that the additive based on calcium hydrosilicates is characterized by high activity. The introduction of additives based on HSC into lime compositions accelerates the hardening process and increases the strength of lime samples.

With the use of a nanoscale additive based on synthetic calcium hydrosilicates, compositions of dry building mixtures are developed for restoration and finishing of building walls.

Keywords: nanoscale additives, lime, calcium hydrosilicates, structure, properties

Для реставрации и отделки зданий и сооружений широкое применение находят известковые составы, в том числе сухие строительные смеси (ССС) [1, 2]. Значительную долю составляют СССР, поставляемые зарубежными фирмами «Tikkurila», «Saraol» и др., что удорожает стоимость работ и делает их зависимыми от импортных поставок. Анализ отечественной и зарубежной научно-технической патентной литературы свидетельствует, что проблема повышения водостойкости известковых композиций остается на сегодняшний день актуальной.

Одним из путей решения этой проблемы является применение в рецептуре известковых составов наноразмерных модифицирующих добавок. Наночастицы имеют большую площадь поверхности, обеспечивая высокую химическую активность смеси. В настоящее время известны варианты с применением нанокварца [3–6] и оксида нанотитана [7]. Проведены исследования по внедрению в СССР наножелеза, наноалюминия и частиц наноглины [8].

Известно применение наноразмерных модифицирующих добавок в цементных системах [9]. В цементных фазах наночастицы могут действовать как ядра, способствуя дальнейшей гидратации цемента благодаря своей высокой реакционной способности и тем самым уменьшая пористость. Даже малое количество (0,25 %) добавки нанокварца увеличивает прочность при сжатии на 10 % за 28 сут, а прочность на изгиб – на 25 %. Нанокварц работает не только как наполнитель для улучшения микроструктуры, но и как активатор для реакции пуццоланизации.

Анализ патентной и научно-технической информации показал, что большой интерес представляет применение в известковых ССС гидросиликатов кальция, активно взаимодействующих с известью и способствующих повышению эксплуатационной стойкости композита.

В настоящее время существует большое количество способов получения силикатов кальция из различных кальций- и кремнийсодержащих соединений: расплавные методы получения волластонита, гидротермальный (автоклавный) синтез гидросиликатов кальция, синтез путём прямых твердофазных реакций при повышенных температурах [10]. Синтетический силикат кальция (волластонит), аморфный и кристаллический гидросиликат кальция (ксонотлит) можно промышленно производить из фосфогипса (крупнотоннажного отхода химических предприятий) с использованием технологии низкотемпературного гидротермального синтеза, который осуществляется при температуре менее 100°C и атмосферном давлении. Сушка и кристаллизация полученного продукта осуществляются при температуре 115°C.

Наиболее перспективным способом получения силикатов кальция является синтез, основанный на взаимодействии исходных компонентов в водной среде при обычных условиях (температуре 20°C и атмосферном давлении).

Следует отметить, что процессы формирования, фазовый и элементный составы, физико-химические свойства силикатов кальция, синтезируемых в различных системах при обычных условиях, остаются малоизученными. Поэтому проблема разработки и оптимизации процессов синтеза гидросиликатов кальция из доступного сырья является актуальной.

Технология синтеза гидросиликатов кальция, основанная на взаимодействии исходных компонентов в водной среде

В работах [11, 12] предложена технология синтеза гидросиликатов, заключающаяся во введении в жидкое стекло добавки-осадителя в виде 7,5–15%-го раствора CaCl_2 в количестве 30–50 % от массы жидкого стекла. Полученный осадок высушивают при температуре 100°C. При быстром введении добавки-осадителя скорость образования зародышей кристаллов большая и образуется мелкодисперсный осадок, состоящий из большого числа мелких частиц. Среднеарифметическое значение размера частиц добавки составляет 28,41 мкм, при этом 35 % составляют частицы размером 15,579 мкм. Менее 5 % составляют частицы диаметром 2,954 мкм. Значение удельной поверхности $S_{уд}=4310\text{--}5876\text{ см}^2/\text{см}^3$. Активность добавки составляет 289 мг/г и зависит от температуры высушивания. Наибольшей активностью обладает добавка, высушенная после фильтрации при температуре 300°C. Прочность при сжатии $R_{сж}$ образцов в возрасте 28 суток твердения в воздушно-сухих условиях при водоизвестковом отношении В/И=0,7 при использовании добавки, высушенной при температуре 300°C, составляет $R_{сж}=6,79$ МПа, а композита на основе состава с применением добавки, высушенной при температуре 105°C, – 4,56 МПа, т.е. прирост прочности при сжатии составляет 50%.

Добавка обладает высокой сорбционной ёмкостью. При относительной влажности воздуха 72 % сорбционное увлажнение спустя 10 суток составляет 20 %, а при относительной влажности 100 % – 95 %. При хранении добавки в условиях, исключающих доступ влаги, ее активность практически не изменяется.

При изучении качественного состава новообразований синтезированной добавки методами РФА, ЭМС и ИКС установлено, что степень закристаллизованности образцов невысокая. Образуются гидросиликаты кальция различной основности.

Структура синтезируемой добавки представлена образованиями разной формы – пластинчатой и игольчатой, соответствующей гидросиликатам кальция (рис. 1). Благодаря игольчатой форме структуры добавка выступает также и в роли микроармирующего элемента.

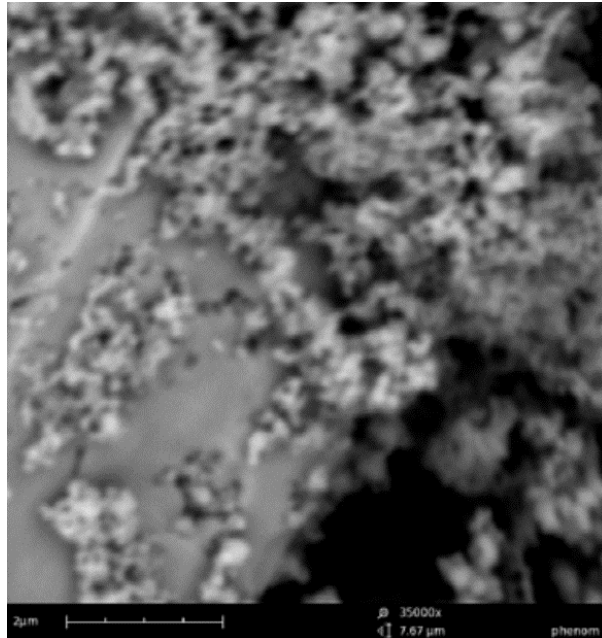


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок добавки на основе ГСК ($\times 35000$)

Для дополнительной оценки был проведен анализ ИК спектра образца полученной добавки. На рис. 2 видно чётко выделяющиеся полосы поглощения в областях $850\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, $550\text{--}750\text{ см}^{-1}$, $400\text{--}550\text{ см}^{-1}$, подтверждающие наличие в синтезируемом материале гидросиликатов кальция. Группа полос в области $550\text{--}750\text{ см}^{-1}$ отнесена к симметричным колебаниям мостиковых связей Si–O–Si в $[\text{SiO}_4]$ -тетраэдрах. Полосы поглощения в области 1600 и 3400 см^{-1} обусловлены деформационными и валентными колебаниями кристаллизационной воды.

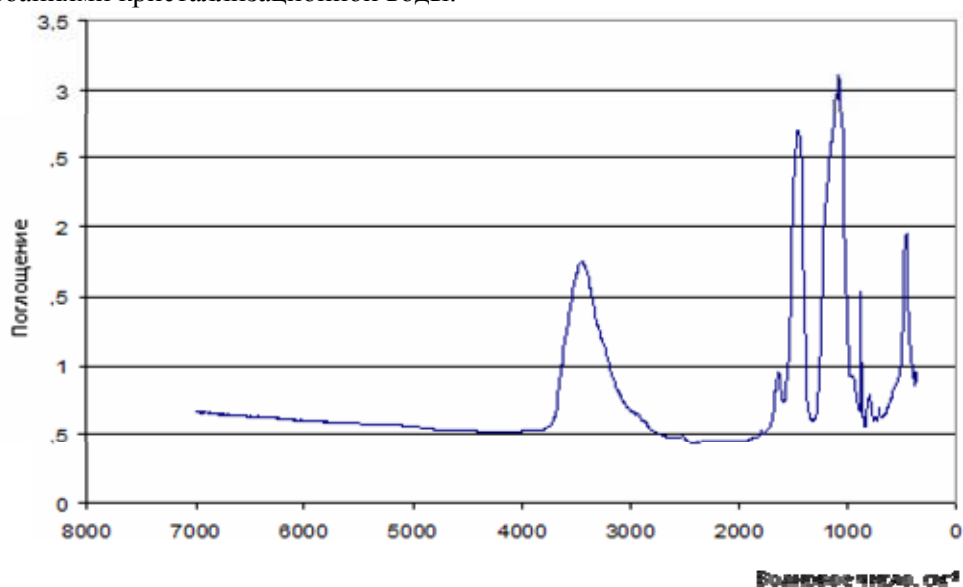


Рис. 2. ИК-спектр образца синтезированной добавки ГСК

Для исследования процессов структурообразования известковых составов с добавкой гидросиликатов кальция был применен качественный рентгеноструктурный анализ на дифрактометре марки Thermo Scientific модели ARL X'TRA (рис. 3).

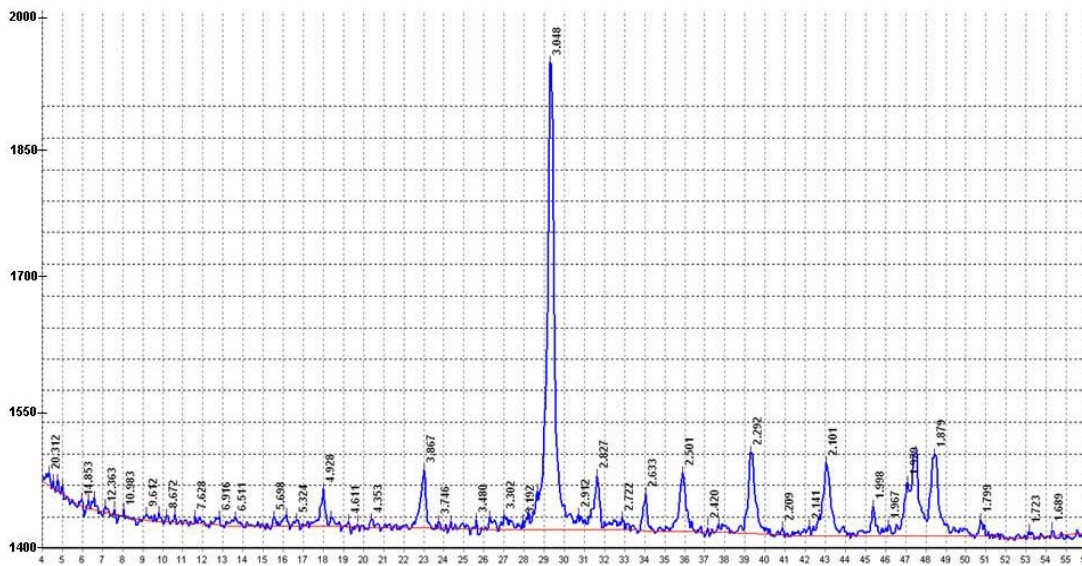


Рис. 3. Рентгенограмма образцов известкового камня с добавкой на основе гидросиликатов кальция

Анализ ионизационных рентгенограмм показал, что в образцах известкового композита с синтезированной добавкой на основе ГСК присутствуют дифракционные линии (Å) гидросиликатов кальция CSH(I) и CSH(II): 20,312; 12,363; 10,983; 7,628; 6,511; 5,69; 5,320; 4,611; 3,867; 3,746; 3,048; 3,192; 3,302; 3,048; 2,827; 2,72; 2,633; 2,501; 2,42; 2,292; 2,101; 1,92; 1,879; 1,723; портландтитов: 4,928; 2,633; 1,967; 1,799; 1,689; кальцитов: 3,867; 3,048; 3,501; 2,912; 2,42; 2,141; 1,998 [13].

Установлено, что количество свободной извести в контрольных образцах после 28 суток воздушно-сухого твердения составило 60 %, а в образцах с добавкой ГСК – 27 %, что свидетельствует о химическом взаимодействии гидросиликатов кальция с известью.

Применение синтезируемых гидросиликатов кальция приводит к повышению прочности известкового камня в 2–3 раза в зависимости от количества добавки и водоизвесткового отношения. Наибольшие значения показателей прочности характерны для образцов с применением гидросиликатов кальция И:ГСК=1:0,3 и И:ГСК=1:0,15 при водоизвестковом отношении В/И=0,7 и при И:ГСК=1:0,5 при В/И=0,9. Значения прочности составляют соответственно $R_{сж}=4,56$ МПа и $R_{сж}=4,31$ МПа. Для сравнения применялись добавки микрокремнезема, диатомита, волластонита. Применение микрокремнезема в количестве 15 % и 30 % от массы извести приводит к повышению прочности на 30–35 %, волластонита – на 15–20 %, диатомита – на 32 %. Совместное же введение диатомита с ГСК приводит к повышению прочности известкового камня на 100–122 % (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Прочность известкового камня в зависимости от содержания и вида добавки

Состав	В/И	Предел прочности, МПа, в возрасте 28 суток	
		при сжатии	при изгибе
1	2	3	4
Контрольный	0,7	1,62	0,42
	0,9	1,56	0,40
И:ГСК=1:0,05	0,7	3,96	1,38
	0,9	3,24	1,26

1	2	3	4
И:ГСК=1:0,15	0,7	4,56	1,73
	0,9	3,82	1,63
И:ГСК=1:0,3	0,7	4,56	1,73
	0,9	3,62	1,59
И:ГСК=1:0,5	0,9	4,31	1,80
	1,0	3,82	1,80
И:Д=1:0,3	0,9	2,06	0,72
И:ГСК:Д=1:0,1:0,2	0,9	3,46	1,06
И:ГСК=1:0,2:0,1	0,9	3,12	0,96
И:В=1:0,3	0,7	2,06	1,06
	0,9	1,86	0,96
И:В=1:0,15	0,7	1,93	0,72
	0,9	1,74	0,71
И:МК=1:0,3	0,7	2,12	1,34
	0,9	2,09	1,18
И:МК=1:0,15	0,7	2,24	1,14
	0,9	2,06	1,05

П р и м е ч а н и е : МК – микрокремнезем, В – волластонит, Д – диатомит.

Увеличение дисперсности добавки приводит к росту ее химической активности. В табл. 2 представлены значения прочности при сжатии известкового композита в зависимости от величины удельной поверхности добавки на основе ГСК.

Т а б л и ц а 2

Прочность при сжатии известкового композита

Состав	В/И	$S_{уд}=5896\text{см}^2/\text{г}$	$S_{уд}=7876\text{см}^2/\text{г}$	$S_{уд}=14223\text{см}^2/\text{г}$
И:ГСК=1 : 0,3	0,7	3,64	4,56	6,28

С увеличением тонкости помола добавки на основе ГСК наблюдается возрастание числовых значений прочности при сжатии известкового камня. Наибольшей прочностью обладают образцы на основе составов с применением добавки с удельной поверхностью $S_{уд}=14223\text{см}^2/\text{г}$. Прочность при сжатии в возрасте 28 суток твердения составляет $R_{сж}=6,28\text{МПа}$.

Введение в рецептуру известкового состава добавки на основе ГСК приводит к уменьшению пористости и увеличению объема закрытых пор, вследствие чего уменьшается водопоглощение известкового камня (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Характеристика пористой структуры известкового камня

Состав	Пористость, %	Объем открытых пор, %	Объем закрытых пор, %	Водопоглощение по массе, %
Контрольный	60	50	10	44
И:ГСК=1:0,3, В/И=0,9	56	43	13	38

С применением синтезированных гидросиликатов кальция разработан известковый состав для отделки стен зданий. Свойства состава и покрытий на его основе приведены в табл. 4.

Свойства разработанного отделочного покрытия

Наименование показателя	Значение показателя разработанного состава	Значение показателя прототипа
Прочность при сжатии, МПа	3-4	1-2,5
Адгезионная прочность $R_{сц}$, МПа	0,6-0,9	0,5-0,7
Морозостойкость, не менее циклов	50	35
Время высыхания до степени «5» при $(20\pm 2)^\circ\text{C}$, мин	15...20	-
Водоудерживающая способность, %	98-99	97
Водопоглощение по массе, %	10-12	11-12
Водостойкость	0,68-0,74	-
Усадочные деформации, мм/м	0,26-0,38	-
Коэффициент паропроницаемости μ , мг/м ² ·ч·Па	0,05	0,01
Расход отделочного состава при нанесении в 1 слой толщиной:		
1 мм, кг/м ²	1-1,2	1,4-1,6
10 мм, кг/м ²	10-12	14-16
Жизнеспособность, час	1-1,5	2-3
Срок хранения, мес.	6-12	6-12

Пр и м е ч а н и е . В качестве прототипа использована известковая штукатурная смесь «Крепс Антик».

Технология получения добавки на основе гидросиликатов кальция в присутствии веществ, содержащих аморфный кремнезем

По данным [14] низкоосновные гидросиликаты кальция образуются при соотношении C/S , равном $C/S=0,8-1,33$. В связи с этим для получения соотношения $C/S=0,8-1,33$ при синтезе добавки авторы [15, 16] использовали вещества, содержащие аморфный кремнезем, в частности, диатомит и микрокремнезем. Технология синтеза добавки на основе ГСК с применением кремнеземсодержащих добавок заключалась в следующем. К раствору жидкого стекла добавлялась суспензия вещества, содержащего аморфный кремнезем, после перемешивания вводился 10–15%-й раствор CaCl_2 в количестве 50% от массы жидкого стекла, при этом соотношение «твердая : жидкая фаза» (Т:Ж) составляло Т:Ж=2. Полученную смесь отфильтровывали и высушивали до постоянной массы при температуре 100°C . Высушенную добавку измельчали.

Добавка на основе гидросиликатов кальция, синтезированная в присутствии диатомита, характеризуется истинной плотностью, равной $\rho_{ист}=2200 \text{ кг/м}^3$, насыпной плотностью $\rho_{нас}=370 \text{ кг/м}^3$ и активностью $A=370 \text{ мг/г}$. При изучении оксидного состава добавки ГСК, синтезированной в присутствии диатомита, установлено, что в ней преобладают оксиды кремнезема, составляющие 81,81 % (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Оксидный состав добавки на основе ГСК, синтезированной в присутствии диатомита

Наименование оксида	Содержание, %
SiO_2	81,81
Na_2O	4,95
Al_2O_3	4,49
CaO	3,09
Fe_2O_3	1,51

При анализе РФА добавки, синтезированной в присутствии диатомита, идентифицируются следующие соединения: гидросиликаты кальция тоберморитовой группы ($d = 4,330$; $3,23649$; $d = 3,20907$; $d = 2,83127$; $d = 1,49679$); твердый раствор CSH(B) в виде слабозакристаллизованного геля: ($d = 4,13$; $d = 2,18295$; $d = 1,87623$; $d = 1,50692$; $d = 1,75605$); раствор C–S–H (II): ($d = 2,26363$; $d = 2,42699$; $d = 1,85754$; $d = 1,444188$); кварц ($d = 3,14261$; $d = 1,28214$; $d = 1,18895$); каолинит ($d = 4,17526$; $d = 3,391105$); гидрогалиты ($d = 3,25968$; $d = 2,955451$; $d = 2,89931$; $d = 2,57507$); кальцит ($d = 1,068$) (рис. 4).

Структура синтезируемой добавки изучалась с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа Shanning Electron Microscope JSM – 6390 LV. Съемка проводилась в режиме низкого вакуума при давлении $P=50$ Па. Установлено, что диатомит является подложкой, на которой формируются гидросиликаты кальция (рис. 5).

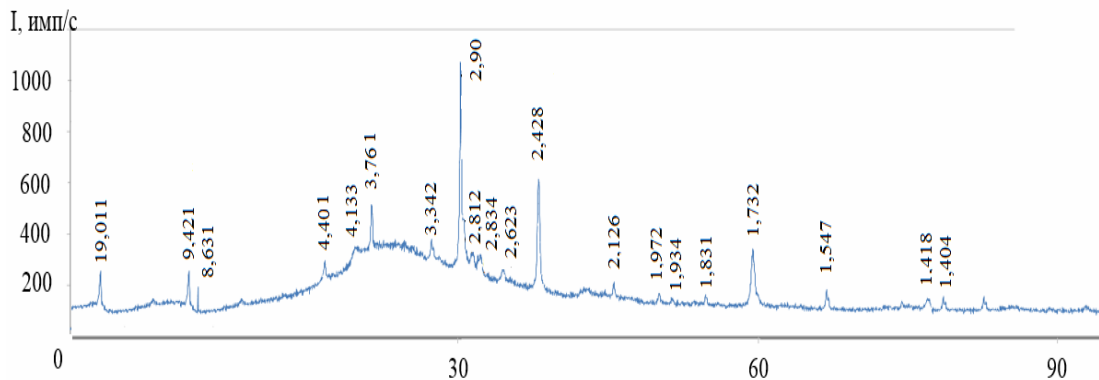


Рис. 4. Рентгенограмма добавки ГСК, синтезированной в присутствии диатомита

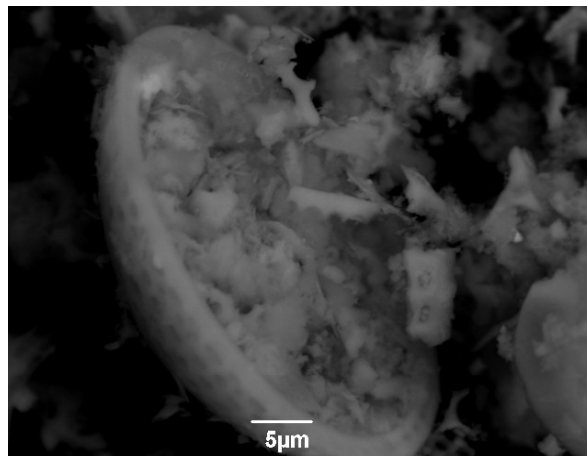


Рис. 5. Изображение структуры добавки, синтезированной в присутствии диатомита ($\times 3000$)

Гранулометрический анализ, выполненный с помощью автоматического лазерного дифрактометра Fritsch Particle Sizer Analysette 22, показал, что содержание частиц размером 45,000–100,000 мкм у добавки, синтезированной без диатомита, выше и составляет 31,97%, в то время как у добавки, синтезированной в присутствии диатомита, – 23,48%, а содержание частиц размером 0,05–1,000 мкм – 0,58% и 0,95% соответственно.

У известковых образцов с добавкой на основе ГСК, синтезированной в присутствии диатомита, прочность при сжатии составляет на 3 суток воздушно-сухого твердения $R_{сж} = 2$ МПа, а с добавкой на основе ГСК, синтезированной без диатомита, $R_{сж} = 1,3$ МПа.

Выявлено, что известковые композиты с добавкой на основе ГСК, синтезированной в присутствии диатомита, характеризуются пониженными деформациями

усадки. Введение в рецептуру известковых составов добавки на основе ГСК способствует повышению водостойкости известкового отделочного слоя в 2,51 раза.

Разработан состав сухой строительной смеси, предназначенный для реставрации и отделки стен зданий. Отделочный слой на основе разработанной смеси характеризуется следующими показателями: прочность сцепления $R_{адп}=0,89$ МПа, коэффициент паропроницаемости $\mu=0,049$ мг/м²×ч×Па, водопоглощение по массе $W = 10,15\%$, марка по морозостойкости F35.

Технология синтеза добавки на основе смеси гидросиликатов и алюмосиликатов кальция

В работах [17–19] предложено использовать в качестве модифицирующей добавки смесь гидросиликатов и алюмосиликатов кальция. В качестве рабочей гипотезы принято предположение, что при введении в известковую смесь одновременно гидросиликатов и алюмосиликатов кальция можно получить композиты, характеризующиеся улучшенными техническими и эксплуатационными свойствами.

Технология получения добавки является двухстадийной. На первой стадии негашеную известь гасили водой. Затем в эту смесь вливали раствор жидкого стекла, содержащий 122,4 г/л SiO₂ и 47,4 г/л Na₂O. Образовавшуюся пульпу перемешивали в течение 15 минут. Затем отфильтровывали осадок, для чего полученную суспензию обезвоживали, помещая на фильтровальную бумагу. На второй стадии отфильтрованный осадок обрабатывали 10%-м раствором сульфата алюминия. Полученную смесь вновь отфильтровывали. Осадки, образовавшиеся на первой и второй стадиях, высушивали при 100–105⁰С в течение 12 часов. Для оценки целесообразности принятой двухстадийной технологии синтеза добавки дальнейшие исследования проводили параллельно для добавок, образовавшихся на первой и второй стадиях.

Свойства образцов модифицирующих добавок, полученных на 1-й и 2-й стадиях, представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Свойства образцов добавок, полученных на 1-м и 2-м этапах

Стадия синтеза добавки	Внешний вид	Истинная плотность $\rho_{ист}$, кг/м ³	Насыпная плотность $\rho_{нас}$, кг/м ³	Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /кг
1-я стадия	Порошок белого цвета	2100	380	<u>680</u> 57100
2-я стадия	Порошок белого цвета	2140	240	<u>1380</u> 163300

П р и м е ч а н и е : над чертой – данные, полученные на приборе ПСХ-12 методом фильтрации газа через пористые тела; под чертой – данные, полученные на приборе Sorbi-M по многоточечному методу БЭТ.

В оксидном составе модифицирующей добавки, полученной на 1-й стадии, преобладают оксиды: SiO₂, CaO, Na₂O. Данный оксидный состав характерен для гидросиликатов кальция. В оксидном составе модифицирующей добавки, полученной на 2-й стадии синтеза, при сохранении значительной доли оксидов SiO₂, CaO, Na₂O дополнительно появились оксиды Al₂O₃, и SO₃. Это позволяет предположить, что минералогический состав добавки дополнился гипсом и цеолитами.

Для оценки минералогического состава добавок, полученных на 1-й и 2-й стадиях синтеза, был проведен их РФА-анализ. Рентгенограмма образцов добавки, полученной на 2-й стадии, представлена на рис. 6. РФА показал, что минералогический состав добавки, полученной на 1-й стадии, представлен минералами тоберморитовой группы, А ($d=3.037$, $d=3.201$, $d=1.818$), порландитом, А ($d=2.631$, $d=4.940$, $d=1.681$), кальцитом, А ($d=2.109$, $d=3.034$, $d=1.878$).

РФА добавки, полученной на 2-й стадии, показал, что в ее минералогическом составе сохранились гидросиликаты кальция, представленные минералами тобермо-

ритовой группы, А ($d=3.049$, $d=3.203$, $d=1.826$, $d=1.676$) и твердым раствором CSH(B) в виде слабозакристаллизованного геля, А ($d=2.181$, $d=1.882$, $d=1.741$). Дополнительно в минералогическом составе добавки были обнаружены гипс, А ($d=7.638$, $d=4.298$) и полуводный гипс, А ($d=6.063$, $d=2.801$, $d=3.490$, $d=1.852$, $d=1.698$). Также учитывая то, что в оксидном составе добавки, полученной на 2-й стадии синтеза, обнаружено значительное содержание Al_2O_3 – 10,98 %, но в результате РФА не было обнаружено минералов, содержащих Al_2O_3 , можно предположить, что в добавке присутствует рентгеноаморфная фаза, содержащая алюмосиликаты кальция.

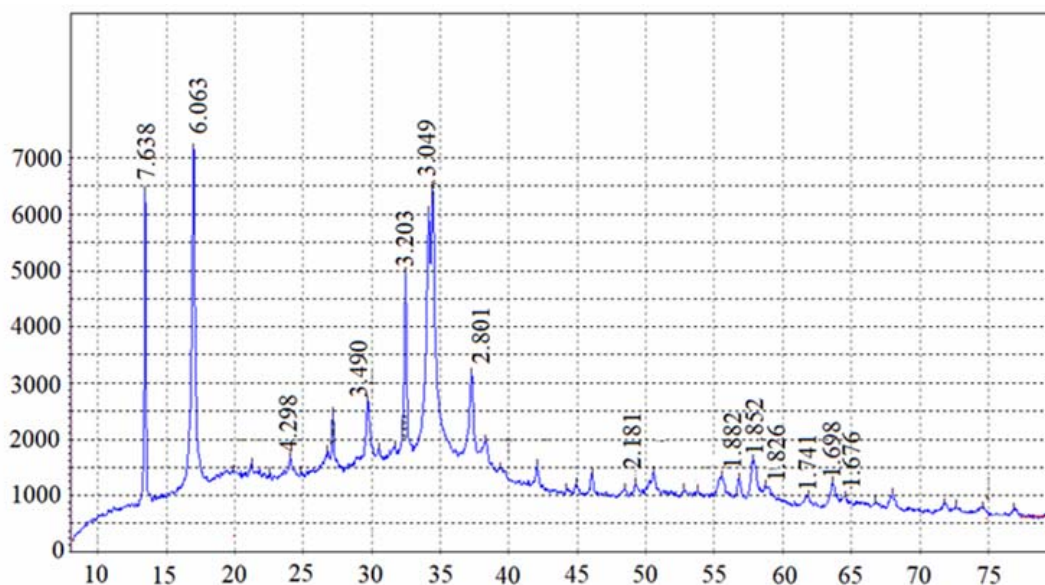


Рис. 6. Рентгенограмма образцов добавки, полученной на 2-й стадии синтеза

На рис. 7 представлены электронно-микроскопические снимки синтезируемых добавок, полученных на 1-й и 2-й стадиях синтеза.

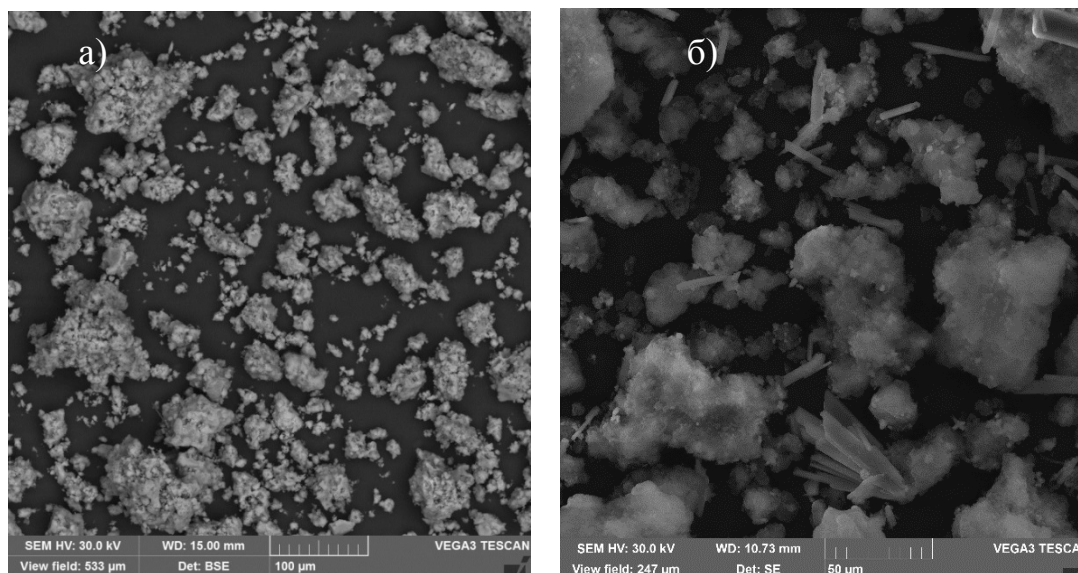


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок добавки:
а – полученной на 1-й стадии синтеза; б – полученной на 2-й стадии синтеза

Анализ данных, представленных на рис. 7, свидетельствует, что структура добавки представляет собой частицы пластинчатой и игловатой форм различного размера.

Установлено, что добавка, полученная после 1-й стадии синтеза, характеризуется довольно высокой пуццоланической активностью, составляющей 238,6 мг/г (рис. 8,

кривая 1), вызванной высоким содержанием в ее составе гидросиликатов. Пуццоланическая активность добавки, полученной после 2-й стадии синтеза, выше и составляет 1280,0 мг/г. Увеличение пуццоланической активности добавки, полученной после 2-й стадии синтеза, можно объяснить появлением в ее составе алюмосиликатов и увеличением удельной поверхности добавки.

Добавка, полученная на 2-й стадии синтеза, значительно ускоряет скорость набора пластической прочности известковой смеси: спустя 5 часов после затворения пластическая прочность составляет $\tau=30,7$ кПа. Пластическая прочность контрольного состава спустя 5 часов составила $\tau=3,1$ кПа. Добавка, полученная на 1-й стадии синтеза, ускоряет скорость набора пластической прочности известковой смеси незначительно и спустя 5 часов после затворения составляет $\tau=4,3$ кПа.

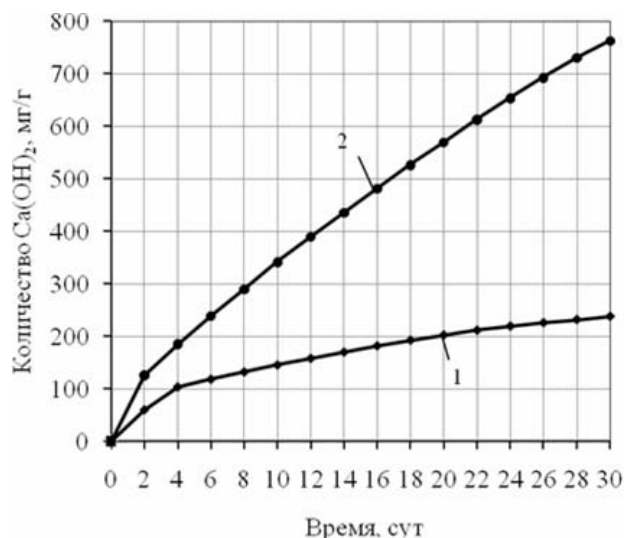


Рис. 8. Активность разработанных добавок по поглощению $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из известкового раствора:
1 – добавка, полученная на 1-й стадии синтеза;
2 – добавка, полученная на 2-й стадии синтеза

Для оценки эффективности применения добавок, полученных на 1-й и 2-й стадиях, исследовали кинетику набора прочности при сжатии. Содержание добавок, полученных на 1-й и 2-й стадиях синтеза, было принято равным 10% от массы извести. Водоизвестковое отношение было принято равным $\text{В/И}=1,0$. Результаты исследований представлены на рис. 9.

Введение в состав добавки, полученной на 1-й стадии синтеза, повышает прочность при сжатии образцов в возрасте 28 суток воздушно-сухого твердения на 54,7% (рис. 9, кривая 2) по сравнению с контрольными образцами, а добавки, полученной на 2-й стадии синтеза, – на 187,2% (рис. 9, кривая 3) по сравнению с контрольными образцами. При этом выявлено, что в образцах, полученных с использованием разработанных добавок, снизилось содержание свободной извести по сравнению с контрольными образцами. В известковых композитах после 28 суток твердения в воздушно-сухих условиях содержание свободной извести составило 49,1% (контрольный состав), в композитах с использованием добавки, полученной на 1-й стадии синтеза, содержание свободной извести составило 40,2%, в композитах с использованием добавки, полученной на 2-й стадии синтеза, содержание свободной извести составило 28,6%.

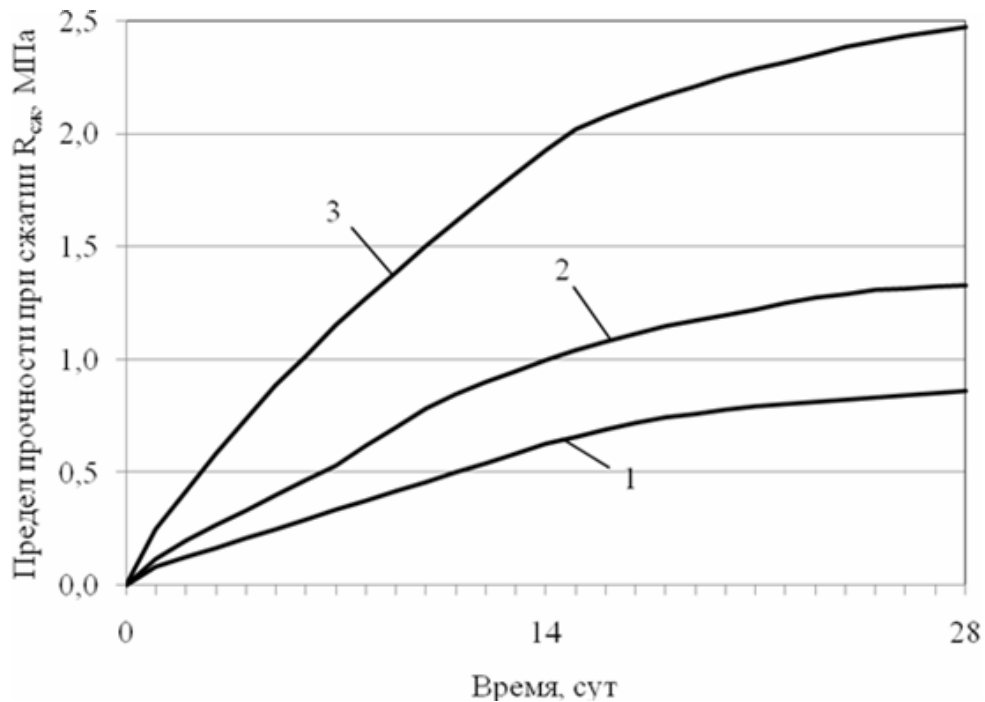


Рис. 9. Кинетика твердения известковых композитов:

1 – контрольный состав на известковом вяжущем; 2 – состав на известковом вяжущем с использованием добавки, полученной на 1-й стадии синтеза; 3 – состав на известковом вяжущем с использованием добавки, полученной на 2-й стадии синтеза

С применением добавки на основе смеси гидросиликатов и алюмосиликатов кальция разработан известковый состав теплоизоляционных ССС для отделки газобетона. В табл. 7 приведены основные эксплуатационные и технологические свойства теплоизоляционных составов для отделки газобетона на основе разработанной рецептуры.

В качестве прототипа 1 выбрана легкая цементная штукатурка «Кнауф GRUNBAND», производимая компанией ООО «КНАУФ ГИПС», в качестве прототипа 2 – теплоизоляционная штукатурка для газобетона «УМКА UF-2», производимая компанией ООО «Экотермогруп», в качестве прототипа 3 – штукатурка «Известково-цементная» для отделки газобетона фирмы «Боларс».

Т а б л и ц а 7

Технологические и эксплуатационные свойства разработанных теплоизоляционных ССС

Параметр	Величина показателя для состава			
	Состав	Прото-тип 1	Прото-тип 2	Прото-тип 3
Средняя плотность покрытия, кг/м ³	580	1100	550	1550
Насыпная плотность, кг/м ³	380	1100	550	1500
Прочность при сжатии, МПа	3,6	3,4	3,0	4,0
Расход ССС при нанесении слоя толщиной в 10 мм, кг/м ²	5,9	12,0	5,5	14,0
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,119	0,350	0,130	0,400
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,157	0,100	0,110	0,100
Водоудерживающая способность, %	99,0	97,0	97,0	97,8
Прочность сцепления с основанием, МПа	0,65	0,40	0,30	0,40
Морозостойкость, марка	F35	F35	F50	F50
Удобоукладываемость	хорошая	хорошая	хорошая	хорошая

Анализ данных, приведенных в табл. 7, показал, что разработанные составы теплоизоляционных ССС для отделки газобетона обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогами: высокой паропроницаемостью, высокой прочностью сцепления с поверхностью газобетона, высокой водоудерживающей способностью.

Выводы

Обоснована возможность повышения стойкости покрытий путем применения в рецептуре отделочного состава добавки на основе гидросиликатов кальция. Разработаны технологии синтеза наноразмерных добавок на основе гидросиликатов кальция, предназначенных для применения в известковых смесях. Выявлено, что добавка на основе гидросиликатов характеризуется высокой активностью, составляющей в зависимости от режима синтеза 298–1280,0 мг/г. Установлены закономерности структурообразования известкового композита в присутствии добавки на основе гидросиликатов кальция, заключающиеся в ускорении отверждения покрытий, повышении прочности при сжатии известковых образцов, уменьшении пористости и увеличении объема закрытых пор композита. Разработаны составы известковых сухих строительных смесей, предназначенных для реставрации и отделки зданий.

Список литературы

1. Большаков, Э.Л. Сухие смеси для отделочных работ / Э.Л. Большаков // Строительные материалы. – 1997. – №7. – С. 8–9.
2. Гонтарь, Ю.В. Модифицированные сухие смеси для отделочных работ / Ю.В. Гонтарь, А.И. Чалова // Строительные материалы. – 2001. – № 4. – С. 8–10.
3. Bjornstrom, J. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement / J. Bjornstrom, A. Martinelli, A. Matic, L. Borjesson, I. Panas // Chem Phys Lett. – 2004. – 392(1–3). – P.242–8.
4. Ji, T. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂ // Cem Concr Res. – 2005. – 35(10). – P.1943–1947.
5. Jo, B.-W. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles / B.-W. Jo, C.-H. Kim, G.-H. Tae, J.-B. Park // Construct Build Mater. – 2007. – 21(6). – P.1351–1355.
6. Li, H. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials / H. Li, H.-G. Xiao, J.-P. Ou // Cem Concr Res. – 2004. – 34(3). – P.435–438.
7. Li, H. Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement / H. Li, M.-H. Zhang, J.-P. Ou // Int J Fatig. – 2007. – 29(7). – P.1292–1301.
8. Li, H. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite / H. Li, S. Wang, Y. He, M. Lu // Mater Lett. – 2006. – 60(3). – P.356–359.
9. Королев, Е.В. Основные принципы практической нанотехнологии в строительном материаловедении / Е.В. Королев // Научный интернет-журнал «Нанотехнологии в строительстве». – 2009. – No 1. – С. 66–79. – URL: www.nanobuild.ru.
10. Илюхин, В.В. Гидросиликаты кальция. Синтез монокристаллов и кристаллохимия / В.В. Илюхин, В.А. Кузнецов, А.Н. Лобачёв, В.С. Бакшуттов. – М.: Наука, 1979. – 184 с.
11. Логанина, В.И. Структура и свойства тонкодисперсных наполнителей на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 167–169.
12. Loganina, V. Modified Lime Binders for Restoration Work / V. Loganina, K. Sergeeva, R. Fediuk, S. Klyuev, N. Vatin and Yu. Vasilev // Buildings. – 2021. – 11. – P.98. – URL: <https://doi.org/10.3390/buildings11030098>
13. Горшков, В.С. Вяжущие, керамика и стеклокерамические материалы. Структура и свойства / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, А.В. Абакумов. – М.: Стройиздат, 1994. – 584 с.
14. Рахимбаев, Ш.М. О влиянии основности и пористости на прочностные характеристики силикатных материалов / Ш.М. Рахимбаев, М.В. Кафтаева, В.Л. Курбатов,

Н.Д. Комарова, А.В. Теличко // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 3-1. – С. 35–38.

15. Loganina, V.I. Effect of the supplement based on calcium hydrosilicates on the resistance of lime coatings / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina, G.V. Martyashin // *Magazine of Civil Engineering*. – 2017. – № 4 (72). – P. 20–27.

16. Loganina, V.I. Influence of the mode of synthesis of the filler on structure and properties of limy dry construction mixes / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, I.S. Pyshkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2014. – Vol. 7, № 33–36. – P. 1893–1897.

17. Логанина, В.И. Тонкодисперсный наполнитель на основе силикатов кальция для известковых смесей / В.И. Логанина, М.В. Фролов // *Вестник гражданских инженеров*. – 2015. – № 5 (52). – С. 144–147.

18. Loganina, V.I. Research and optimization of the technology for the synthesis of a modifying additive based on a mixture of hydrosilicates and calcium aluminosilicates / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Nanotechnologies in Construction*. – 2022. – 14(3). – P. 190–197. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-190-197774>

19. Логанина, В.И. Теплоизоляционные известковые сухие строительные смеси для отделки стен из газобетона / В.И. Логанина, М.В. Фролов, М.А. Рябов // *Вестник МГСУ*. – 2016. – № 5. – С. 82–92.

References

1. Bolshakov, E.L. Dry mixes for finishing works / E.L. Bolshakov // *Construction materials*. – 1997. – No. 7. – P. 8–9.

2. Gontar, Yu.V. Modified dry mixes for finishing works / Yu.V. Gontar, A.I. Chalova // *Building materials*. – 2001. – No. 4. – P. 8–10.

3. Bjornstrom, J. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate-hydrate formation in cement / J. Bjornstrom, A. Martinelli, A. Matic, L. Borjesson, I. Panas // *Chem Phys Lett*. – 2004. – 392(1–3). – P.242–8.

4. Ji, T. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂ // *Cem Concr Res*. – 2005. – 35(10). – P.1943–1947.

5. Jo, B.-W. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles / B.-W. Jo, C.-H. Kim, G.-H. Tae, J.-B. Park // *Construct Build Mater*. – 2007. – 21(6). – P.1351–1355.

6. Li, H. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials / H. Li, H.-G. Xiao, J.-P. Ou // *Cem Concr Res*. – 2004. – 34(3) – P.435–438.

7. Li, H. Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement / H. Li, M.-H. Zhang, J.-P. Ou // *Int J Fatig*. – 2007. – 29(7). – P.1292–1301.

8. Li, H. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite / H. Li, S. Wang, Y. He, M. Lu // *Mater Lett*. – 2006. – 60(3). – P.356–359.

9. Korolev, E.V. Basic principles of practical nanotechnology in building materials science / E.V. Korolev // *Scientific Internet Journal "Nanotechnologies in Construction"*. – 2009. – No 1. – P. 66–79. – URL: www.nanobuild.ru.

10. Илюхин, В.В. Кальций гидросиликаты. Синтез отдельных кристаллов и кристаллическая химия / В.В. Илюхин, В.А. Кознетсов, А.Н. Лобачев, В.С. Бакшутков. – М.: Наука, 1979. – 184 с.

11. Loganina, V.I. Structure and properties of finely dispersed fillers based on calcium silicates for dry building mixtures / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // *Bulletin of Civil Engineers*. – 2012. – No. 2 (31). – P. 167–169.

12. Loganina, V. Modified Lime Binders for Restoration Work / V. Loganina, K. Sergeeva, R. Fediuk, S. Klyuev, N. Vatin and Yu. Vasilev // *Buildings*. – 2021. – 11. – P.98. – URL: <https://doi.org/10.3390/buildings11030098>

13. Gorshkov, V.S. Binders, ceramics and glass-ceramic materials. Structure and properties / V.S. Gorshkov, V.G. Saveliev, A.V. Abakumov. – М.: Stroyizdat, 1994. – 584 с.

-
14. Rakhimbaev, Sh.M. On the influence of basicity and porosity on the strength characteristics of silicate materials / Sh.M. Rakhimbaev, M.V. Kaftaeva, V.L. Kurbatov, N.D. Komarova, A.V. Telichko // *Fundamental research*. – 2014. – No. 3–1. – P. 35–38.
15. Loganina, V.I. Effect of the supplement based on calcium hydrosilicates on the resistance of lime coatings / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina, G.V. Martyashin // *Magazine of Civil Engineering*. – 2017. – № 4 (72). – P. 20–27.
16. Loganina, V.I. Influence of the mode of synthesis of the filler on structure and properties of limy dry construction mixes / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, I.S. Pyshkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2014. – Vol. 7, № 33–36. – P. 1893–1897.
17. Loganina, V.I. Fine-dispersed filler based on calcium silicates for lime mixtures / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Bulletin of Civil Engineers*. – 2015. – No. 5 (52). – P. 144–147.
18. Loganina, V.I. Research and optimization of the technology for the synthesis of a modifying additive based on a mixture of hydrosilicates and calcium aluminosilicates / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Nanotechnologies in Construction*. – 2022. – 14(3). – P. 190–197. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-190-197774>
19. Loganina, V.I. Heat-insulating lime dry building mixtures for finishing walls from aerated concrete / V.I. Loganina, M.V. Frolov, M.A. Ryabov // *Bulletin of MGSU*. – 2016. – No. 5. – P. 82–92.

УДК 691.32

DOI 10.54734/20722958_2023_4_115

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

Коровкин Марк Олимпиевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Ерошкина Надежда Александровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Егоров Алексей Юрьевич,
магистрант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

Шестернин Александр Игоревич,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Korovkin Mark Olimpievich,
Candidate of Science, Associate Professor
of the Department «Technology of Building
Materials and Wood Processing»
E-mail: m_korovkin@mail.ru

Eroshkina Nadezhda Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Technology of Building
Materials and Wood Processing»

Egorov Aleksey Yurievich,
Master Student of the Department
«Technology of Building Materials and Wood
Processing»

Shesternin Aleksander Igorevich,
Postgraduate of the Department «Technology
of Building Materials and Wood Processing»

СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА, ИЗГОТОВЛЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ БЕТОННОГО ЛОМА

М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.Ю. Егоров, А.И. Шестернин

Исследовано влияние замещения гранитного щебня и отсева его дробления продуктами дробления бетонного лома на свойства самоуплотняющегося бетона. Установлено, что, несмотря на ухудшение свойств бетона при таком замещении, возможно получение самоуплотняющегося бетона с прочностью 65-70 МПа.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, утилизация бетонного лома, вторичный заполнитель, отсев дробления, измельченный отсев дробления, консистенция смеси, прочность, истираемость, ударная прочность

PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MADE USING PRODUCTS OF PROCESSING CONCRETE SCRAP

М.О. Korovkin, N.A. Eroshkina, A.Yu. Egorov, A.I. Shesternin

The influence of replacing crushed granite and its screening crushing by concrete scrap products on the properties of self-compacting concrete has been studied. It has been established that, despite the deterioration of the concrete properties in the result of this replacement, it is possible to obtain self-compacting concrete with a strength of 65-70 MPa.

Keywords: self-compacting concrete, recycling of concrete scrap, recycled aggregate, crushing screenings, crushing screenings, mixture consistency, strength, abrasion, impact strength

Введение

Получаемые при дроблении лома бетонных конструкций зерна вторичного крупного заполнителя включают в свой состав цементный камень, который имеет значительно более высокую пористость и низкую прочность в сравнении с традиционным заполнителем бетона. Негативное влияние цементного камня на характеристики вторичного заполнителя не позволяет использовать его в качестве полноценной замены природного заполнителя [1]. Преодоление этой проблемы остается в настоящее время актуальной научно-технической задачей [2].

Анализ существующих технологий сбора бетонных отходов и производства вторичного заполнителя, сопоставимого по качеству с заполнителем из природных материалов, показывает, что для отделения растворной составляющей бетона от крупного заполнителя могут применяться механические, химические и другие методы [3, 4]. Эти методы дают возможность получить вторичный заполнитель высокого качества, однако при этом решают проблему утилизации бетонного лома только частично, так как не позволяют эффективно использовать цементный камень и растворную составляющую бетона, доли которых в объеме бетона составляют 30-40 и 50-60 % соответственно. В связи с этим разрабатываемые технологии переработки бетонного лома должны быть ориентированы на применение не только наиболее ценного компонента бетона – крупного заполнителя. Переработка бетона должна обеспечить получение материалов, которые могут быть рационально использованы в технологии бетона. С этой точки зрения одним из наиболее перспективных направлений утилизации переработанной растворной составляющей бетона можно считать технологию самоуплотняющегося бетона [4], при производстве которого необходимо использовать инертную или активную минеральную добавку.

При измельчении бетонного лома по мягкому режиму [4] образуется значительное количество отсевов дробления вторичного щебня, состоящего преимущественно из растворной составляющей бетона фр. 0-5 мм. Зерна этого материала могут иметь пористость до 20-40 % и прочность менее 10-20 МПа, в связи с чем они малопригодны для использования в качестве мелкого заполнителя. В то же время, учитывая отсутствие во многих регионах месторождений качественных заполнителей, крупные фракции отсева дробления вторичного щебня можно рассматривать в качестве материала для улучшения зернового состава природных мелких песков. Мелкие фракции целесообразно измельчать до дисперсности, сопоставимой с дисперсностью цемента и использовать в составе самоуплотняющегося бетона в качестве альтернативы некоторым минеральным добавкам [6].

Методы и материалы

Для экспериментальной оценки влияния отсева дробления вторичного щебня на свойства самоуплотняющегося бетона применялся вторичный заполнитель, полученный дроблением образцов бетона классов В20-В30.

Образцы-кубы с длиной ребра 100 мм разрушались на гидравлическом прессе, а затем подвергались трехкратному дроблению по мягкому режиму в лабораторной щековой дробилке при максимально открытом разгрузочном отверстии и «под завалом», благодаря чему значительная часть материала дробилась «камень о камень». Такой режим дробления обеспечивает разрушение преимущественно растворной составляющей бетонного лома.

Для приготовления самоуплотняющегося бетона использовался вторичный щебень фр. 5-10 мм и отсев его дробления фр. 1,25-5 мм. Продукты дробления с размером менее 1,25 мм измельчались в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности 350 м²/кг по прибору ПСХ-2. Полученный материал – бетонная мука – применялся в качестве инертной минеральной добавки.

В качестве контрольного состава использовался самоуплотняющийся бетон, приготовленный на гранитном щебне и отсеве его дробления. Отсев дробления гранитного щебня с размером менее 1,25 мм также измельчался в мельнице до удельной поверхности 350 м²/кг.

Для приготовления всех составов применялись цемент ЦЕМ II/A-III 42,5 Н, песок полевошпатный с размером зерна менее 1,25 и суперпластификатор Sika ViscoCrete-5-600 SP.

Контрольные составы бетонов на гранитном заполнителе и составы бетонов, изготовленных с применением продуктов переработки бетонного лома и гранитного заполнителя, приведены в табл. 1. Составы 2 и 4 отличаются от составов 1 и 3 тем, что с целью оценки эффективности оптимизации гранулометрического состава заполнителя в них 10 % вторичного и гранитного щебней замещено крупной фракцией отсева их дробления.

Т а б л и ц а 1

Составы исследованных бетонов

Расход материалов, кг/м ³	1-й состав	2-й состав	3-й состав	4-й состав
Цемент	459	458	446	445
Мука гранитная	202	202	-	-
Мука бетонная	-	-	179	179
Щебень гранитный фр. 5-10 мм	749	673	-	-
Отсев дробления гранитного щебня фр. 1,25-5 мм	164	239	-	-
Щебень вторичный фр. 5-10 мм	-	-	703	631
Отсев дробления вторичного щебня фр. 1,25-5 мм	-	-	147	219
Песок	576	576	540	539
Вода	180	181	215	215
Суперпластификатор	5,7	5,7	5,5	5,5

Консистенция бетонной смеси определялась по расплыву конуса Хегермана (форма-конус по ГОСТ 310.4-81), а прочность – на образцах-кубах с длиной ребра 70 мм. Кроме того, определялись истираемость бетона на лабораторном круге истирания ЛКИ-3 и стойкость к ударным воздействиям на испытательном копре КИ.

Результаты и их обсуждение

Свойства исследованных составов бетона приведены на рис. 1 и в табл. 2.

Как видно из диаграммы на рис. 1, замещение 10 % гранитного щебня отсевами его дробления обеспечивает повышение расплыва смеси. Для бетона, приготовленного с применением вторичного заполнителя, такое замещение приводит к ухудшению текучести смеси, что можно объяснить более высоким водопоглощением отсева дробления вследствие большего содержания в этих фракциях растворной составляющей, что соответственно повышает водопотребность отсева дробления вторичного щебня.

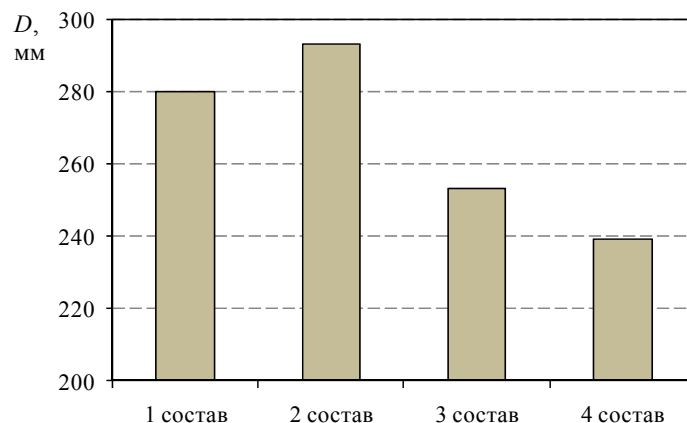


Рис. 1. Расплыв смеси исследованных составов (обозначения по табл. 1)

О высокой водопотребности вторичного заполнителя свидетельствует то, что для получения минимального для самоуплотняющейся смеси расплыва (250 мм) расход воды в составе на бетонном ломе был увеличен на 20 %. В результате такого повышения расхода воды прочность снизилась приблизительно на 20 МПа (см. табл. 2), но при этом прочность осталась достаточно высокой – 65-70 МПа, что соответствует нижней границе прочности высокопрочных бетонов.

Частичное замещение щебня отсевом его дробления повышает истираемость бетона, приготовленного как на гранитном, так и на вторичном заполнителе (см. табл. 2). Увеличение истираемости в составах на вторичном заполнителе объясняется повышенным водоцементным отношением.

Т а б л и ц а 2

Свойства исследованных бетонов

Свойство бетона	1-й состав	2-й состав	3-й состав	4-й состав	
Прочность при сжатии, МПа, через	1 сут	8,8	9,2	7,7	12,6
	2 сут	30,2	27,6	24,8	26,2
	3 сут	48	48,8	44,4	42,8
	7 сут	64,4	64,8	56	59,6
	28 сут	87,1	89,6	65,3	70,4
Истираемость, г/см ²	0,22	0,26	0,31	0,35	
Ударная прочность (среднее значение/ довери-тельный интервал), кДж/м ²	45,2/13,7	47,1/5,9	37,7/11,6	24,6/2,5	

Стойкость к ударным воздействиям при частичном замещении гранитного щебня отсевом его дробления незначительно повышает этот показатель, при этом значительно возрастает его стабильность. Ударная прочность бетона на рециклированном заполнителе при замещении вторичного щебня отсевом дробления, напротив, снижается. В составах на вторичном заполнителе ударная прочность значительно ниже в сравнении с бетоном на граните, что объясняется более высоким водоцементным отношением в сравнении с бетоном на гранитном заполнителе, но при этом повышается стабильность показателя ударной прочности.

Пористость вторичного заполнителя является причиной уменьшения содержания воды в цементном тесте, а также заполнения пор заполнителя цементным тестом [2]. Это, с одной стороны, снижает удобоукладываемость бетонной смеси, а с другой, может повысить прочностные характеристики бетона за счет насыщения цементным тестом реликтового цементного камня в заполнителе и снижения фактического водоцементного отношения цементного теста.

Для оценки влияния на свойства бетона насыщения цементной суспензией порового пространства вторичного заполнителя и уменьшения содержания воды в цементном тесте был проведен эксперимент, в котором часть воды затворения использовалась для предварительного увлажнения смеси вторичного щебня и отсева его дробления.

Это исследование было выполнено на следующем составе бетона: цемент – 455 кг/м³; кварцевая мука – 150 кг/м³; вторичный щебень фр. 5-10 мм – 694 кг/м³; отсев дробления фр. 1,25-5 мм – 151 кг/м³; песок – 556 кг/м³; суперпластификатор – 4,2 кг/м³. Суммарный расход воды во всех составах был постоянным и составлял 210 кг/м³. Было исследовано три состава бетона: первая смесь затворялась водой с растворенным в ней суперпластификатором, а во втором и третьем составах 10 и 20 % воды использовалось для увлажнения вторичного заполнителя.

Кинетика изменения консистенции (диаметра расплыва конуса Хегермана) бетонных смесей, приготовленных с применением заполнителя с различным увлажнением, приведена на рис. 2.

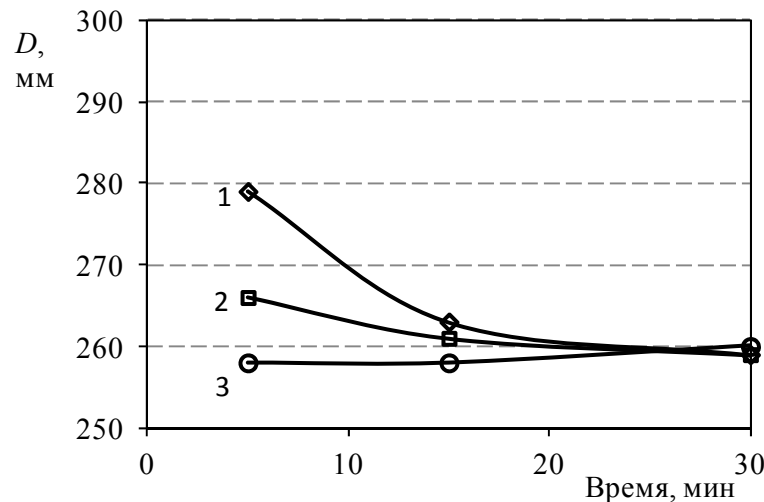


Рис. 2. Диаметры расплывов исследованных составов:

1 – состав, приготовленный на сухом заполнителе; 2 и 3 – составы, в которых 10 и 20 % воды затворения использовалось для предварительного увлажнения вторичного заполнителя

Бетонная смесь, приготовленная на сухом заполнителе, сразу после перемешивания характеризовалась высокими значениями расплыва конуса Хеггермана (см. рис. 2). При этом в этой смеси отмечались признаки водоотделения. Однако, как видно из графика на рис. 2, такая смесь быстро теряла подвижность, что подтверждает предположение о снижении содержания воды в цементном тесте в результате ее капиллярного отсоса вторичным заполнителем. Смесь на увлажненном заполнителе на начальном уровне имела значительно меньший расплыв, но ее консистенция характеризовалась стабильностью, и через 30 мин значения расплывов смесей не различались.

Анализ данных в табл. 3 показывает, что увлажнение вторичного заполнителя незначительно влияет на прочность бетона при изгибе и сжатии. В то же время можно отметить слабую тенденцию роста прочности при сжатии и снижения прочности при изгибе при повышении влажности заполнителя.

Т а б л и ц а 3

Прочностные характеристики бетона
с различной процедурой введения воды затворения

Прочность		1-й состав	2-й состав	3-й состав
после тепловлажностной обработки, МПа	$R_{из}$	7,5	7,3	7,0
	$R_{сж}$	64,2	65,0	65,6
после 28 суток нормального твердения, МПа	$R_{из}$	10,0	9,4	8,6
	$R_{сж}$	68,2	71,6	74,6
при ударном воздействии, кДж/м ²		24,7	32,7	34,8

П р и м е ч а н и е . Обозначения составов по рис. 2.

Прочность бетона при ударном воздействии при повышении влажности заполнителя значительно возрастает (см. табл. 3). Этот рост предположительно можно объяснить меньшей жесткостью и большей деформативностью в таком бетоне реликтового цементного камня во вторичном заполнителе. Кроме того, цементный камень в зоне его контакта с пористым крупным заполнителем имеет более высокую пористость в связи с уменьшением поглощения из него воды поровым пространством вторичного заполнителя, что также может повысить деформативность и, соответственно, демпфирующие свойства бетона при ударном воздействии.

Установленное влияние процедуры введения воды затворения в бетонную смесь на прочность при ударном воздействии и механизм этого явления требуют экспериментальной проверки.

Увлажнение вторичного заполнителя частью воды затворения для снижения поглощения воды из цементного теста в бетонной смеси оказывает значительное влияние на консистенцию последней только при ее определении сразу после перемешивания. В связи с этим предварительное увлажнение вторичного щебня позволяет более точно корректировать расход воды в процессе приготовления самоуплотняющейся бетонной смеси на вторичном заполнителе.

Выводы

Применение в качестве заполнителя и минеральной добавки продуктов переработки бетонного лома позволяет получить самоуплотняющийся бетон с прочностью 65-70 МПа. Бетонная смесь на вторичном заполнителе характеризуется значительно более высокой водопотребностью в сравнении со смесью, приготовленной на гранитном щебне и крупных фракциях его дробления. Исследованные бетоны на вторичном заполнителе имели прочность приблизительно на 20 МПа ниже прочности бетона аналогичного состава, изготовленного из гранитного щебня.

Замещение части вторичного щебня крупными фракциями отсева его дробления приводит к снижению растекаемости смеси в отличие от состава на гранитном заполнителе, в котором текучесть смеси возрастает, что можно объяснить повышенным водопоглощением отсева дробления вторичного заполнителя.

Бетоны, приготовленные на вторичном заполнителе, показали более высокую истираемость и пониженную стойкость к ударным воздействиям, что объясняется низкой прочностью продуктов дробления, содержащих цементный камень, прочность которого намного ниже прочности природных горных пород, применяющихся в качестве заполнителя бетона. Однако ударная прочность бетона на вторичном заполнителе может быть значительно повышена за счет процедуры введения в бетонную смесь воды затворения.

Несмотря на ухудшение свойств бетона при замене природного качественного заполнителя на продукты переработки бетонного лома, самоуплотняющиеся бетоны, изготовленные с применением вторичного заполнителя, обладают достаточно высокими характеристиками и могут быть использованы в производстве железобетонных конструкций со сложными геометрическими характеристиками, в том числе для малых архитектурных форм.

Список литературы

1. Гусев, Б.В. Вторичное использование бетонов / Б.В. Гусев, В.А. Загурский. – М.: Стройиздат, 1988. – 96 с.
2. Wang, Dayang. Mechanical performance of recycled aggregate concrete in green civil engineering: Review / Dayang Wang, Chenxuan Lu, Zhimeng Zhu, Zhenya Zhang, Shaoyi Liu, Yongcheng Ji, Zhiqiang Xing // Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 19. – e02384. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02384>.
3. Коровкин, М.О. Перспективные технологии переработки бетонного лома для получения и использования вторичного заполнителя / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.В. Дружинин, Ю.А. Сарабьева // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2022. – № 4(41). – С. 132–141.
4. Морозова, Н.Н. Бетонные отходы: организация переработки, свойства и применение / Н.Н. Морозова, А.Р. Гиззатуллин, А.П. Аксаков, К.О. Нестерова // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. – 2022. – № 1(10). – С. 32–46.
5. Коровкин, М.О. Использование дробленого бетонного лома в качестве заполнителя для самоуплотняющегося бетона / М.О. Коровкин, А.И. Шестернин, Н.А. Ерошкина // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3(37). – С. 85.
6. Низина, Т.А. Влияние комплексных модификаторов на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и минеральных добавок различного состава на технологические и физико-механические свойства цементных систем / Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1(50). – С. 28–36.

References

1. Gusev, B.V. Secondary use of concrete / B.V. Gusev, V.A. Zagursky. – M.: Stroyizdat, 1988. – 96 p.
2. Wang, Dayang. Mechanical performance of recycled aggregate concrete in green civil engineering: Review / Dayang Wang, Chenxuan Lu, Zhimeng Zhu, Zhenya Zhang, Shaoyi Liu, Yongcheng Ji, Zhiqiang Xing // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – e02384. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02384>.
3. Korovkin, M.O. Promising technologies for processing concrete scrap for the production and use of secondary aggregate / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, A.V. Druzhinin, Yu.A. Sarabyeva // *Education and science in the modern world. Innovation*. – 2022. – № 4(41). – P. 132–141.
4. Morozova, N.N. Concrete waste: organization of processing, properties and application / N.N. Morozova, A.R. Gizzatullin, A.P. Aksakov, K.O. Nesterova // *Polymers in construction: scientific online journal*. – 2022. – № 1(10). – P. 32–46.
5. Korovkin, M.O. The use of crushed concrete scrap as a filler for self-compacting concrete / M.O. Korovkin, A.I. Shesternin, N.A. Eroshkina // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2015. – № 3(37). – P. 85.6.
6. The effect of complex modifiers on the basis of polycarboxylate superplasticizer and mineral additives of different compositions on technological and physical-mechanical properties of cement systems / T.A. Nizina, A.S. Balykov, D.I. Korovkin [et al.] // *Regional Architecture and Engineering*. – 2022. – № 1(50). – P. 28–36.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.131.7

DOI 10.54734/20722958_2023_4_122

*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

Глухов Вячеслав Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Геотехника и дорожное
строительство»
E-mail: gds@pguas.ru

Glukhov Viacheslav Sergeevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Geotechnics and
Road Construction»
E-mail: gds@pguas.ru

Панкина Мария Вячеславовна,
старший преподаватель кафедры
«Геотехника и дорожное строительство»
E-mail: pankina.mary@mail.ru

Pankina Mariia Viacheslavovna,
Senior Teacher of the Department
«Geotechnics and Road Construction»
E-mail: pankina.mary@mail.ru

ООО «Техноконцепт»
Россия, 117638, г. Москва,
Варшавское ш., д. 56

LLC «Technoconcept»
Russia, 117638, Moscow, 56,
Varshavskoe shosse

Вишнякова Юлия Сергеевна,
руководитель проектов
E-mail: 89273713931@mail.ru

Vishniakova Yuliia Sergeevna,
Project manager
E-mail: 89273713931@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ОКОЛОСВАЙНОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

В.С. Глухов, М.В. Панкина, Ю.С. Вишнякова

Отмечено, что увеличение несущей способности свай принудительного погружения во времени объясняется реологическими процессами при формировании околосвайного основания и прохождением грунтом ряда состояний. При вдавливании свай предложено учитывать изменение влажности и консистенции уплотненных связных грунтов в ходе фильтрационной консолидации. По результатам статических испытаний описан новый подход к назначению коэффициента надежности при расчете контролируемого усилия вдавливания для свай, устраиваемых в водонасыщенных глинистых грунтах.

Ключевые слова: околосвайное грунтовое основание, формирование, несущая способность свай, статические испытания, сваи вдавливания, контролируемое усилие, реологические процессы, методика

FORMATION OF A SOIL ZONE NEAR A PILE

V.S. Glukhov, M.V. Pankina, Yu.S. Vishniakova

The increase of the bearing capacity of forced immersion piles in time is explained by rheological processes during the formation of a soil zone near the pile and the soil condition transformation. The

moisture and consistency changes during filtration consolidation in compacted cohesive soil are proposed to consider when pressing piles. Based on the static tests results a new way of reliability coefficient assignment is described when the controlled force for pressing piles in water-saturated clay soils is calculated.

Keywords: soil zone near a pile, formation, bearing capacity of piles, static tests, pressing piles, controlled force, rheological processes, methodology

Напряженно-деформированное состояние грунтового основания свайных фундаментов определяется особенностью устройства свай: наиболее эффективными считаются технологии, обеспечивающие вытеснение грунта в околосвайную зону и улучшение строительных свойств основания. Расчет несущей способности свай требует оценки изменения показателей глинистых водонасыщенных грунтов из-за сложного уплотнения вследствие фильтрационной консолидации (способности сопротивляться перемещению свободной воды в вязком грунте, состояние которого обусловлено консистенцией).

Анализ существующих методов

Если жесткость такой строительной конструкции, как колонна, принимается из произведения модуля упругости E на площадь сечения, то жесткость грунта характеризуется коэффициентом консистенции, зависящим от способа нагружения, размеров и формы вязкого течения деформаций, а также геометрических параметров. Границы консистенции присущи только связным грунтам, где имеет место взаимное притяжение твердых минеральных частиц [1]. Последнее выражается всесторонним внутренним давлением связности и зависит от степени сближения частиц грунтового скелета, т.е. плотности грунта. Не следует путать давление связности с капиллярным давлением, которое определяется уровнем грунтовых вод и одинаково во всех направлениях. Молекулярное давление связности не всегда одинаково во всех направлениях.

При оценке механических свойств и напряженно-деформированного состояния грунтового основания выделяют пределы текучести и пластичности, для которых существуют стандартные методы определения [2]. Степень сближения указанных показателей с естественной влажностью грунта обуславливает консистенцию (жесткость) околосвайного основания и, следовательно, несущую способность свай. По Терцаги различают три степени вязкости грунта: твердую, пластичную и текучую [3]. По мере фильтрационной консолидации твердое и полутвердое состояние достигается при влажности ниже предела пластичности; пластичное – при влажности выше предела пластичности и ниже предела текучести; а текучее – при влажности выше предела текучести. Грунт твердой и полутвердой консистенции практически водонепроницаем и представляет собой скелет и молекулярную воду. В пластичном состоянии основание – упругая среда с молекулярными оболочками, между которыми движется свободная вода, влияющая на механические свойства грунта. Разность между пределами текучести и пластичности называется числом пластичности и является мерой, указывающей на содержание упругих частиц в составе скелета (чем больше число пластичности, тем больше упругих частиц скелета и пластичнее грунт). В текучем состоянии грунт представляет собой суспензию со взвешенными частицами скелета.

При погружении свай до проектной отметки фиксируется усилие вдавливания и оценивается несущая способность свай. Конечное усилие носит название контролируемого усилия вдавливания N_k . Важно установить соотношение последнего, несущей способности сваи и проектного требуемого значения N_k для гарантируемого обеспечения расчетно-допускаемой нагрузки $N_{рд}$ на сваю (нет единого мнения по выбору контролируемого усилия вдавливания свай: различные авторы устанавливают величины, превышающие расчетно-допускаемую нагрузку в 1,5–2,0 раза) [4, 5].

По ТСН 50-302-2004 «Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге» в проектах рекомендуется указывать параметры вдавливания, обязательные для обеспечения необходимой расчетно-допускаемой нагрузки на сваю. На основе результатов экспериментальных исследований эмпирические коэффициенты перехода конечного усилия вдавливания к несущей способности свай принимаются в диапазоне 0,65–1,1 и зависят от состояния грунтов околосвайного пространства.

Теоретические основы процесса

При вдавливании свай в водонасыщенные глинистые грунты промежутки между частицами скелета заполнены водой, отдавая последние друг от друга; связность частиц минимизируется или вообще не имеет места. В таком текучем состоянии околосвайный грунт представляет собой жидкую бесформенную массу. Происходит уплотнение массива, сопровождающееся фильтрацией свободной воды в направлении менее сжатой области, т.е. от свай. Уменьшение количества воды способствует сближению частиц грунта и начинает проявляться связность (предел текучести). Снижение влажности менее предела текучести запускает фильтрационную консолидацию основания. Сжатие и разуплотнение грунта в околосвайной зоне завершается не сразу после погружения сваи из-за медленного передвижения молекулярной воды, которая представляет собой «вязкое» тело [6]. К концу фильтрационной консолидации проявляются реологические явления в уплотненных областях. Между сближившимися частицами возникают силы притяжения N_e , которое тем больше, чем теснее сдвинуты частицы. Реологические процессы не ведут к восстановлению грунта до разуплотненного вида, а достаточно плотная структура препятствует вклиниванию прежнего объема молекулярной воды и возвращению частиц грунта к водонасыщенному состоянию. Отмеченные особенности деформации связных грунтов в достаточной мере подтверждаются опытным путем при компрессионных испытаниях, обеспечивающих свободное перемещение воды [7]. Уместно отметить, что модуль деформации E грунта как величина непостоянная увеличивается по мере уплотнения основания, что обуславливается сближением частиц скелета грунта и образованием все более вязких молекулярных оболочек. Исследования деформаций основания при разных влажностях образцов показали, что по мере достижения определенной влажности деформации образцов резко стремятся к критическому значению [8]. Как только вязкость устанавливается меньше предельной, снижается деформируемость грунта, вырастает водонепроницаемость. За критическую влажность принимается предел пластичности или раскатывания, и параметр существенно отличается для грунтов с нарушенной и ненарушенной структурой. Часто основание естественного сложения находится в пластичном состоянии и обладает значительным сопротивлением, тогда как при лабораторных испытаниях грунта консистенция близка к текучей с низким сопротивлением.

Метод проведения эксперимента

Целью исследования являлось уточнение требуемой величины контролируемого усилия N_k при принятой в проекте расчетной нагрузке на сваю. Нами проведены испытания восьми составных свай длиной 16,0–18,0 м и сечением 30×30 см статической вертикальной вдавливающей нагрузкой. Сваи погружались в грунт по технологии вдавливания установкой «Тайзер» на площадке строительства 16-этажных жилых домов по ул. Советской Армии в г. Самаре, где грунтовая толща на всю глубину состоит из водонасыщенных слабых мягкопластичных глин. При расчетной нагрузке на сваю $N = 650,0$ кН в процессе погружения последней на заданную отметку ставилась задача достижения контролируемого усилия $N_k = 780,0$ кН, в 1,2 раза превышающего проектное значение. Для каждой сваи далее фиксировались усилия, которые следует приложить для минимального смещения сваи через два часа после погружения и через сутки. Через два часа «отдыха» сваи для смещения опытных свай требовались усилия в диапазоне 830,0–940,0 кН, а через сутки – 910,0–960,0 кН. После «отдыха» сваи в течение не менее семи суток проводились статические испытания в соответствии с требованиями ГОСТ 5686-2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями».

Результаты эксперимента

Несущая способность опытных свай составила порядка 940,0–1050,0 кН, что в 1,45–1,6 раза превышает проектное значение расчетной нагрузки на сваю $N_{рд} = 650,0$ кН и свидетельствует о значительном эффекте процесса фильтрационной консолидации глин данной площадки. Определен коэффициент перехода от проектной расчетной нагрузки к контролируемому усилию вдавливания $\gamma_n = 1,0$, что позволило по

результатам опытного вдавливания составных свай уменьшить длину последних на 3,0–4,0 м.

Выводы

1. Описаны этапы формирования околосвайной зоны грунта с учетом реологических процессов.
2. Установлена необходимость учета изменения влажности в ходе фильтрационной консолидации глинистого грунта, так как несущая способность грунтового основания существенным образом обуславливается консистенцией грунта, зависящей от степени приближения параметра влажности к пределу пластичности или пределу текучести.
3. Рекомендуется до начала массового погружения свай проводить статические испытания для назначения в проекте контролируемого усилия вдавливания.
4. Предлагается новый подход к выбору значения коэффициента надежности при расчете контролируемого усилия для вдавливания свай в водонасыщенных глинистых грунтах.

Список литературы

1. Герсеванов, Н.М. Теоретические основы механики грунтов и их практическое применение / Н.М. Герсеванов, Д.Е. Польшин. – М.: Госстройиздат, 1948. – 248 с.
2. Moreno-Maroto, J.M. An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test / J.M. Moreno-Maroto, J. Alonso-Azcárate // *Applied Clay Science*. – 2015. – Vol. 114. – P. 497–508.
3. Терцаги, К. Теория механики грунтов / К. Терцаги. – М.: Госстройиздат, 1961. – 507 с.
4. Глухов, В.С. Рекомендации по определению несущей способности свай при погружении вдавливанием / В.С. Глухов, Ю.С. Вишнякова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – №3(40). – С. 107 – 112.
5. Швецов, В.М. О назначении усилия вдавливания свай / В.М. Швецов, Р.К. Ибрагимов // *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. – 2004. – № 8. – С. 129–131.
6. Машенко, А.В. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов / А.В. Машенко, А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина. – Пермь: ПНИПУ, 2014. – 176 с.
7. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading / I.T. Mirsayapov, I.V. Koroleva // *Geotechnics fundamentals and applications in construction: new materials, structures, technologies and calculations*, 6–8 Feb. – Saint Petersburg, 2019. – P. 193–196. – DOI: 10.1201/9780429058882-37.
8. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1973. – 368 с.

References

1. Gersevanov, N.M. Theoretical foundations of soil mechanics and their practical application / N.M. Gersevanov, D.E. Polshin. – M.: Gosstroizdat. – 1948. – 248 p.
2. Moreno-Maroto, J.M. An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test / J.M. Moreno-Maroto, J. Alonso-Azcárate // *Applied Clay Science*. – 2015. – Vol. 114. – P. 497–508.
3. Terzaghi, K. Theory of soil mechanics / K. Terzaghi. – M.: Gosstroizdat, 1961. – 507 p.
4. Glukhov, V.S. Recommendations on the determination of the carrying ability of piles diving under pressure / V.S. Glukhov, I.S. Vishniakova // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – №3(40). – P. 107–112.

5. Shvezov, V.M. About the purpose of the pile indentation force / V.M. Shvezov, R.K. Ibragimov // Urban reconstruction and geotechnical construction. – 2004. – № 8. – P. 129–131.
6. Mashenko, A.V. Special sections of soil mechanics and mechanics of rocky soils / A.V. Mashenko, A.B. Ponomarev, E.N. Sichkina. – Perm: PNRPU, 2014. – 176 p.
7. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading / I.T. Mirsayapov, I.V. Koroleva // Geotechnics fundamentals and applications in construction: new materials, structures, technologies and calculations, 6–8 Feb. – Saint Petersburg, 2019. – P. 193–196. – DOI: 10.1201/9780429058882-37.
8. Goldshtein, M.N. Mechanical properties of soils / M.N. Goldshtein. – M.: Stroiizdat, 1973. – 368 p.

УДК 624.012

DOI 10.54734/20722958_2023_4_127

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

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Начертательная геометрия
и графика»

E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Корнюхин Анатолий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail kornuhin@mail.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

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Descriptive
Geometry and Graphics»

E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Kornyukhin Anatoly Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Structures»
E-mail: kornuhin@mail.ru

ОЦЕНКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК НА ДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин

Приводится оценка методов расчета прочности железобетонных балок без поперечного армирования в зоне действия поперечных сил при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3 по экспериментальным данным. Из сравнения с опытными данными показано, что методы расчета железобетонных конструкций на действие поперечных сил, представленные в наиболее значимых нормативных документах, существенно отличаются друг от друга (американские и европейские нормы являются более осторожными, в отличие от отечественного СП), не отражают характера изменения опытных величин, содержат различные эмпирические коэффициенты, что указывает на необходимость соблюдения осторожности при выборе расчетной модели.

Ключевые слова: железобетонные балки, методы расчета, прочность, наклонное сечение, относительный пролет среза

EVALUATION OF METHODS FOR CALCULATION STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER THE ACTION OF TRANSVERSAL FORCES

O.V. Snezhkina, A.V. Kornyukhin

An assessment of methods for calculating the strength of reinforced concrete beams without transverse reinforcement in the zone of action of transverse forces with a change in the relative span a/h_0 from 1 to 3 according to experimental data is given. Based on a comparison with experimental data, it is shown that the methods for calculating reinforced concrete structures for the action of transverse forces, presented in the most significant regulatory documents, differ significantly from each other (American and European standards are more careful, unlike the domestic ones), do not reflect the nature of the experimental values change, contain various empirical coefficients, which demand caution choosing a calculation model.

Keywords: reinforced concrete beams, calculation methods, strength, inclined section, relative shear span

При действии поперечных сил применяются различные расчетные модели оценки прочности железобетонных элементов. На сегодня накоплена обширная база экспериментальных исследований, определяющая формы разрушения железобетонных элементов в зоне действия поперечных сил. Однако, несмотря на многочисленные иссле-

дования железобетонных элементов, методы расчета содержат разнообразные эмпирические коэффициенты, затрудняющие их применение в практике проектирования [1].

Существующие расчетные модели определения прочности изгибаемых железобетонных элементов в зоне действия поперечных сил из-за сложного напряженно-деформированного состояния имеют существенные расхождения с фактическим характером работы конструкций [2]. Наибольшие расхождения между экспериментальными и расчетными значениями прослеживаются в железобетонных балках с относительным пролетом среза (a/h_0) от 1 до 3 [3–5].

По своду правил СП 6313330.2018 [6], расчет по прочности изгибаемых железобетонных элементов при действии поперечных сил проводят на основе модели наклонных сечений по полосе между наклонными сечениями и наклонному сечению на действие поперечных сил; по наклонному сечению на действие моментов. Расчетные зависимости по СП 6313330.2018 учитывают: расчетное сопротивление бетона сжатию и растяжению, рабочую высоту и ширину сечения, проекцию наклонного сечения. В европейских нормах, согласно ТКП EN 1992–1–1–2009 (Eurocode 2) [7], расчетное значение сопротивления поперечной силе в изгибаемых железобетонных балках без поперечной арматуры определяется на основе модели, состоящей из растянутых и сжатых стержневых элементов. Расчетные зависимости по ТКП EN 1992–1–1–2009 учитывают: сопротивление бетона сжатию, рабочую высоту и ширину сечения, процент продольного армирования. В американских нормах ACI 318-19 (Building Code Requirements for Structural Concrete) [8] расчетное значение сопротивления поперечной силе в изгибаемых железобетонных балках без поперечной арматуры определяется на основе модели на срез (сдвиг). Расчетные зависимости для изгибаемых элементов по ACI 318-19 учитывают: сопротивление бетона сжатию, рабочую высоту и ширину сечения, коэффициент продольного армирования [9]. Ниже дается сравнительный анализ методов расчета прочности наклонного сечения изгибаемого железобетонного элемента с экспериментальными данными, полученными в Американском институте бетона (ACI).

Рассматриваются три серии испытаний железобетонных балок, проведенных профессором G. Kani (ACI). Все опытные образцы имеют ряд постоянных параметров, таких, как прочность бетона (26,5 МПа), прочность и процент продольного армирования ($\mu_s=2,8\%$), ширина балок ($b=0,1525$ м). Изменяемыми факторами являются: высота балок ($h_0=0,135$ м в I серии, $h_0=0,27$ м во II серии, $h_0=0,54$ м в III серии) и расстояние от опоры до линии действия сосредоточенной нагрузки (анализировались балки со значением a от $1h_0$ до $3h_0$). Схема опытных образцов показана на рис. 1.

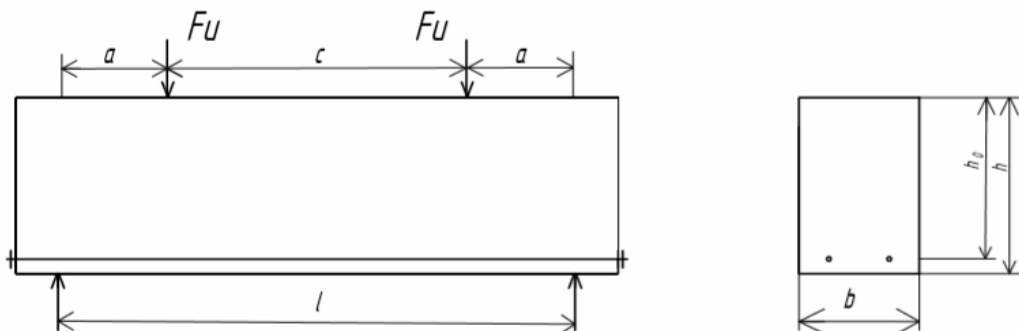


Рис. 1. Схема опытных образцов железобетонных балок

Расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов при действии поперечных сил (по СП 6313330.2018) выполнялся отдельно по бетонной полосе между наклонными сечениями:

$$Q_{\text{нп}} = 0,3\varphi_{b1}R_bbh_0 \quad (1)$$

и наклонному сечению:

$$Q_{\text{нс}} = \frac{\varphi_{b2}R_bbh_0^2}{c}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{нп}}$ – поперечная сила в нормальном сечении элемента; $Q_{\text{нс}}$ – поперечная сила в наклонном сечении изгибаемого железобетонного элемента, которая воспринимается бетоном и на которую накладывается ряд ограничений: $0,5R_{bt}bh_0 \leq Q_{\text{нс}} \leq 2,5R_{bt}bh_0$; R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию; R_{bt} – расчетное сопротивление бетона растяжению; h_0 – рабочая высота сечения; b – ширина сечения; c – длина проекции наклонного сечения на ось балки ($h_0 \leq c \leq 2h_0$); ϕ_{b1} – коэффициент, принимаемый равным 0,3; ϕ_{b2} – коэффициент, принимаемый равным 1,5.

Предельная поперечная сила (по ТКП EN 1992-1-1-2009) для элементов без распределенной арматуры и преднапряжения определяется как:

$$V_{Rc} = \left[C_{Rd,c} k (100\rho_l f_{ck})^{1/3} \right] b_w d, \quad (3)$$

где V_{Rc} – расчетное значение сопротивления поперечной силе (принимается с ограничением, $V_{Rc} = \vartheta_{\min} b_w d$); f_{ck} – нормативная прочность бетона на сжатие; b_w – ширина сечения (b); d – рабочая высота сечения (h_0); ρ_l – процент продольного армирования (принимается с ограничением, $\rho_l \leq 0,02$); $C_{Rd,c}$, k – эмпирические коэффициенты.

Для изгибаемых железобетонных элементов, у которых $0,5 \leq a/h_0 \leq 2$, при определении расчетного значения сопротивления поперечной силе вводится поправочный коэффициент $\beta = a/2h_0$:

$$V = \beta \left[C_{Rd,c} k (100\rho_l f_{ck})^{1/3} \right] b_w d. \quad (4)$$

Предельное усилие на срез, воспринимаемое бетоном, для изгибаемых железобетонных элементов без распределенной арматуры и преднапряжения (по АСІ 318-2019) допускается определять любым из двух способов:

$$V_c = \left[0,17\lambda \sqrt{f'_c} + 6 \frac{N_u}{A_s} \right] b_w d, \quad (5)$$

$$V_c = \left[0,66\lambda (\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c} + 6 \frac{N_u}{A_s} \right] b_w d, \quad (6)$$

где f'_c – нормативная прочность бетона на сжатие; b_w – ширина сечения; d – рабочая высота; ρ_w – коэффициент продольного армирования; N_u – нормальная сжимающая сила, действующая в том же сечении, что и поперечная сила; A_s – площадь бетонного сечения элемента; λ – коэффициент модификации, отражающий снижение механических свойств легкого бетона по сравнению с обычным бетоном.

Результаты расчета по зависимостям (1)–(6) приведены в табл. 1, 2, 3.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета по зависимостям (1)–(6) (серия 1, $h/b=1$)

a/h_0	$P/R_{bt}bh_0$	$Q_{\text{нп}}/R_{bt}bh_0$	$Q_{\text{нс}}/R_{bt}bh_0$	$V/R_{bt}bh_0$	$V_{Rc}/R_{bt}bh_0$	$V_c/R_{bt}bh_0$	$P/Q_{\text{нп}}$	$P/Q_{\text{нс}}$	P/V_c	P/V	P/V_{Rc}
1	4,19	4,82	1,5	1,20	0,6	0,55	0,87	2,80	7,59	3,49	6,99
1,03	4,13	4,68	1,5	1,17	0,6	0,55	0,88	2,75	7,47	3,54	6,88
2	1,84	2,41	0,75	0,60	0,6	0,55	0,76	2,45	3,32	3,06	3,06
2,04	1,72	2,36	0,74	0,59	0,6	0,55	0,73	2,32	3,11	2,92	2,86
2,41	1,37	2,00	0,62	0,50	0,6	0,55	0,68	2,21	2,47	2,75	2,28
2,67	1,33	1,81	0,56	0,45	0,6	0,55	0,74	2,38	2,41	2,97	2,22
2,94	1,05	1,64	0,5	0,41	0,6	0,55	0,64	2,09	1,89	2,56	1,74
3,02	0,87	1,60	0,5	0,40	0,6	0,55	0,54	1,73	1,57	2,18	1,44

П р и м е ч а н и е . При расчете прочности наклонного сечения (зависимость (2), СП 6313330.2018) длина проекции наклонного сечения на ось балки принималась в границах $h_0 \leq c \leq 3h_0$.

Методологические основы анализа и синтеза сложных многокритериальных систем достаточно полно представлены в [10–12].

Расчетная зависимость (1) (СП 6313330.2018) не обеспечивает прочность по наклонной сжатой бетонной полосе ($P/Q_{\text{нп}} < 1$ при $1 < a/h_0 < 2,5$), хотя по характеру распределения она наиболее близка к опытным величинам. Наибольшее расхождение с опытными данными наблюдается у расчетных зависимостей (3) (ТКП EN 1992–1–1–2009, предельная поперечная сила $V_{Rc}/R_{bt}bh_0$) и (5), (6) (ACI 318-2019, предельное усилие на срез $V_c/R_{bt}bh_0$). Зависимости (2) (СП 6313330.2018, прочность по наклонному сечению $Q_{\text{нс}}/R_{bt}bh_0$) и (4) (ТКП EN 1992–1–1–2009, предельная поперечная сила $V/R_{bt}bh_0$) имеют аналогичный характер распределения (рис. 2, табл. 1).

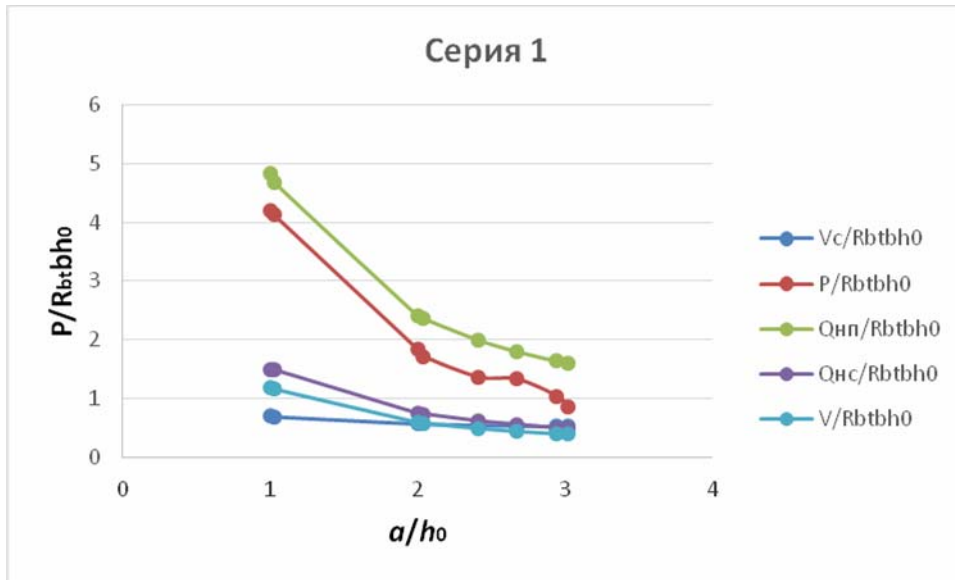


Рис. 2. Сопоставление расчетных величин с опытными данными (серия 1, $h_0/b=1$): ряд $P/R_{bt}bh_0$ – опытные данные; ряд $Q_{\text{нп}}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (1); ряд $Q_{\text{нс}}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (2); ряд $V_{Rc}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (3); ряд $V/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (4); $V_c/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (6)

Т а б л и ц а 2

Результаты расчета по зависимостям (1)–(6) (серия 2, $h/b=2$)

a/h_0	$P/R_{bt}bh_0$	$Q_{\text{нп}}/R_{bt}bh_0$	$Q_{\text{нс}}/R_{bt}bh_0$	$V/R_{bt}bh_0$	$V_{Rc}/R_{bt}bh_0$	$V_c/R_{bt}bh_0$	$P/Q_{\text{нп}}$	$P/Q_{\text{нс}}$	P/V_c	P/V	P/V_{Rc}
1,02	4,78	2,36	1,50	0,99	0,5	0,55	2,02	3,19	8,65	4,84	9,56
1,99	1,47	1,21	0,75	0,51	0,5	0,55	1,21	1,96	2,66	2,90	2,94
2,02	1,49	1,19	0,75	0,50	0,5	0,55	1,25	1,98	2,69	2,98	2,98
2,46	0,97	0,98	0,61	0,41	0,5	0,55	0,99	1,59	1,75	2,36	1,93
2,47	1,01	0,97	0,61	0,41	0,5	0,55	1,04	1,66	1,84	2,49	2,03
2,5	1,03	0,96	0,6	0,40	0,5	0,55	1,06	1,71	1,86	2,55	2,05
2,95	0,83	0,82	0,51	0,34	0,5	0,55	1,02	1,63	1,50	2,43	1,66
3	0,86	0,80	0,5	0,34	0,5	0,55	1,07	1,73	1,56	2,57	1,73

П р и м е ч а н и е. При расчете прочности наклонного сечения (зависимость (2), СП 6313330.2018) длина проекции наклонного сечения на ось балки принималась в границах $h_0 \leq c \leq 3h_0$.

Наименьшее расхождение с опытными величинами (при $2 \leq a/h_0 \leq 3$) показывает расчетная зависимость (1) (СП 6313330.2018, прочность по наклонной сжатой бетонной полосе $Q_{\text{нп}}/R_{bt}bh_0$). Наибольшее расхождение с опытными данными наблюдается у расчетных зависимостей (3) (ТКП EN 1992–1–1–2009, предельная поперечная сила $V_{Rc}/R_{bt}bh_0$) и (5), (6) (ACI 318-2019, предельное усилие на срез $V_c/R_{bt}bh_0$). Зависимости (1) (СП 6313330.2018, прочность по наклонной сжатой бетонной полосе $Q_{\text{нп}}/R_{bt}bh_0$), (2)

(СП 6313330.2018, прочность по наклонному сечению $Q_{nc}/R_{bt}bh_0$) и (4) (ТКП EN 1992–1–1–2009, предельная поперечная сила $V/R_{bt}bh_0$) имеют аналогичный характер распределения (рис. 3, табл. 2).

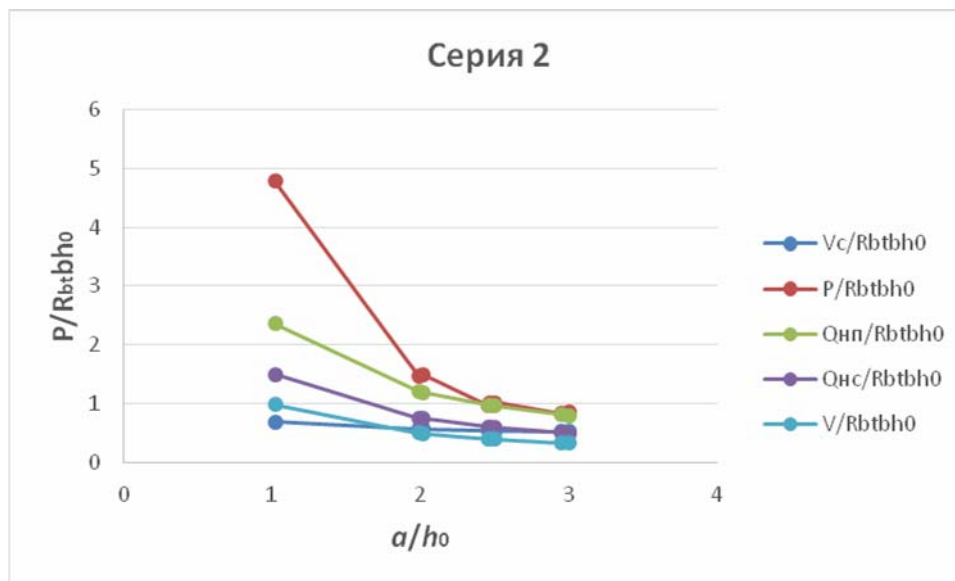


Рис. 3. Сопоставление расчетных величин с опытными данными (серия 1, $h_0/b=2$):
 ряд $P/R_{bt}bh_0$ – опытные данные; ряд $Q_{np}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (1);
 ряд $Q_{nc}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (2); ряд $V_{Rc}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (3);
 ряд $V/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (4); $V_c/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (6)

Т а б л и ц а 3

Результаты расчета по зависимостям (1)–(6) (серия 3, $h/b=3$)

a/h_0	$P/R_{bt}bh_0$	$Q_{np}/R_{bt}bh_0$	$Q_{nc}/R_{bt}bh_0$	$V/R_{bt}bh_0$	$V_{Rc}/R_{bt}bh_0$	$V_c/R_{bt}bh_0$	P/Q_{np}	P/Q_{nc}	P/V_c	P/V	P/V_{Rc}
1	3,89	1,21	1,5	0,87	0,43	0,55	3,23	2,59	7,04	4,47	9,05
1,03	3,64	1,17	1,5	0,85	0,43	0,55	3,11	2,43	6,59	4,31	8,47
1,96	1,31	0,62	0,77	0,44	0,43	0,55	2,13	1,70	2,37	2,94	3,04
2	1,09	0,60	0,75	0,44	0,43	0,55	1,80	1,45	1,96	2,49	2,52
2,62	0,76	0,46	0,57	0,33	0,43	0,55	1,66	1,34	1,38	2,30	1,77
2,99	0,68	0,40	0,5	0,29	0,43	0,55	1,68	1,36	1,23	2,33	1,58
3,11	0,72	0,39	0,5	0,28	0,43	0,55	1,85	1,43	1,29	2,56	1,66
3,11	0,72	0,39	0,5	0,28	0,43	0,55	1,85	1,43	1,30	2,56	1,67

П р и м е ч а н и е . При расчете прочности наклонного сечения (зависимость (2), СП 6313330.2018) длина проекции наклонного сечения на ось балки принималась в границах $h_0 \leq c \leq 3h_0$.

Наименьшее расхождение с опытными величинами (при $2 \leq a/h_0 \leq 3$) показывает расчетная зависимость (2) (СП 6313330.2018, прочность по наклонному сечению $Q_{nc}/R_{bt}bh_0$). Наибольшее расхождение с опытными данными наблюдается у расчетных зависимостей (3) (ТКП EN 1992–1–1–2009, предельная поперечная сила $V_{Rc}/R_{bt}bh_0$) и (5), (6) (АСИ 318-2019, предельное усилие на срез $V_c/R_{bt}bh_0$). Зависимости (1) (СП 6313330.2018, прочность по наклонной сжатой бетонной полосе $Q_{np}/R_{bt}bh_0$), (2) (СП 6313330.2018, прочность по наклонному сечению $Q_{nc}/R_{bt}bh_0$) и (4) (ТКП EN 1992–1–1–2009, предельная поперечная сила $V/R_{bt}bh_0$) имеют аналогичный характер распределения (рис.4, табл. 3).

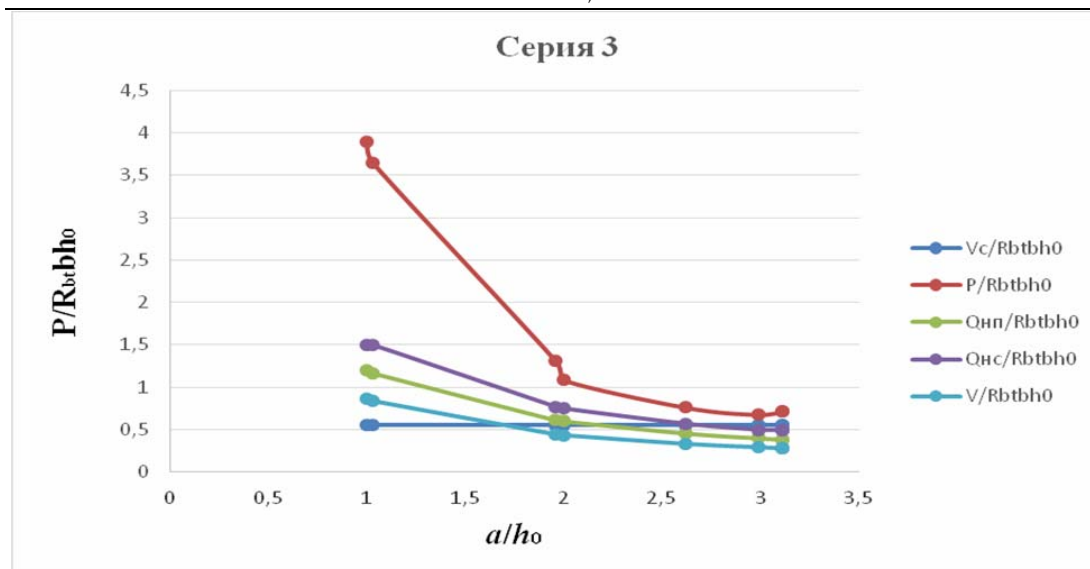


Рис. 4. Сопоставление расчетных величин с опытными данными (серия 1, $h_0/b=3$):
 ряд $P/R_{bt}bh_0$ – опытные данные; ряд $Q_{нп}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (1);
 ряд $Q_{нс}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (2); ряд $V_{Rc}/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (3);
 ряд $V/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (4); $V_c/R_{bt}bh_0$ – расчет по зависимости (6)

Анализируя расчетные зависимости СП 6313330.2018, ТКП EN 1992–1–1–2009 и ACI 318-2019, определяющие прочность изгибаемых железобетонных элементов на действие поперечных сил при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3, можно констатировать отсутствие универсальных моделей расчета как в отечественных, так и в зарубежных нормативных актах. Как видим, методы расчета железобетонных конструкций на действие поперечных сил, представленные в наиболее значимых нормативных документах, существенно отличаются друг от друга и содержат различные эмпирические коэффициенты, что свидетельствует о необходимости соблюдения осторожности при выборе расчетной модели.

Выводы

Определены различные подходы к определению прочности в зоне действия поперечных сил.

В отечественных нормах (СП 6313330.2018) расчет по прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил производят на основе модели наклонных сечений. Несущая способность наклонного сечения по бетону определяется площадью поперечного сечения (bh_0), расчетным сопротивлением бетона при растяжении и коэффициентом, зависящим от пролета среза ($\varphi_{b2}h_0/c$); несущая способность бетонной полосы между наклонными сечениями определяется площадью поперечного сечения (bh_0), расчетным сопротивлением бетона сжатию и коэффициентом φ_{b1} .

В европейских нормах (ТКП EN 1992–1–1–2009) расчетное значение сопротивления поперечной силе в изгибаемых железобетонных балках определяется на основе модели, состоящей из растянутых и сжатых стержневых элементов. Предельная поперечная сила в изгибаемых железобетонных элементах без преднапряжения, не требующих (по расчету) поперечной арматуры, определяется эмпирической зависимостью, учитывающей такие факторы, как нормативное сопротивление бетона сжатию, площадь поперечного сечения, процент продольного армирования и ряд коэффициентов. Для изгибаемых железобетонных элементов, у которых $0,5 \leq a/h_0 \leq 2$, при определении расчетного значения сопротивления поперечной силе вводится поправочный коэффициент $\beta = a/2h_0$.

В американских нормах (ACI 318–19) расчетное значение сопротивления поперечной силе в изгибаемых железобетонных балках без поперечной арматуры определяется на основе модели на срез. Расчетные зависимости учитывают такие факторы, как сопротивление бетона сжатию в виде эмпирического коэффициента $0,66(f'_c)^{1/2}$, площадь поперечного сечения ($b_w d$), коэффициент продольного армирования (ρ_w)^{1/3}.

В отечественных нормах, по сравнению с зарубежными, присутствуют расчетные, а не нормативные характеристики прочности бетона; отсутствует влияние процента продольного армирования.

Отечественные нормы ограничивают длину проекции наклонной трещины величиной $c=1\div 2h_0$; европейские – $c=1\div 2,5h_0$; американские – $c=1h_0$.

По сравнению с опытными данными американские и европейские нормы являются более осторожными, в отличие от отечественного СП.

В целом, расчетные зависимости СП, EN и ACI не отражают характера изменения опытных величин при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3, имеют эмпирический характер и требуют своего уточнения.

Список литературы

1. Краснощеков, Ю.В. Расчетная модель сопротивления поперечной силе железобетонных изгибаемых элементов / Ю.В. Краснощеков // Вестник СИБАДИ. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 182–192.
2. Филатов, В.Б. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил / В.Б. Филатов, А.С. Арцыбасов, М.А. Багаутдинов, Д.И. Гордеев, А.И. Картунов, Р.А. Никитин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С. 642–645.
3. Снежкина, О.В. Железобетонные балки в зоне действия поперечных сил / О.В. Снежкина, С.А. Толушов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 23(52). – С.126–133.
4. Скачков, Ю.П. Зависимость прочности железобетонных балок от их геометрических характеристик в зоне действия поперечных сил / Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, Р.А. Ладин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38). – С.56–62.
5. Снежкина, О.В. Расчет прочности железобетонных балок со средним пролетом среза / О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин, Р.А. Ладин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1(18). – С. 118–122.
6. Свод правил СП 63.13330.2018 «СНиП 52–01–2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
7. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings (ТКП EN 1992–1–1–2009).
8. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318–19).
9. Залесов, А.С. Расчет прочности железобетонных балок с использованием объемных конечных элементов в развитие норм по проектированию железобетонных конструкций / А.С. Залесов, А.А. Пащанин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – №4. – С. 66–71.
10. Гарькина, И.А. Проектирование и оптимизация свойств сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 5–11.
11. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Yu. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>
12. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32. – DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-2-25-32.

References

1. Krasnoshchekov, Yu.V. Calculation model of resistance to transverse force of reinforced concrete bending elements / Yu.V. Krasnoshchekov // Bulletin of SIBADI. – 2019. – Vol. 16, No. 2. – P. 182–192.
2. Filatov, V.B. Analysis of calculation models when calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete beams on the action of transverse forces /

V.B. Filatov, A.S. Artsybasov, M.A. Bagautdinov, D.I. Gordeev, A.I. Kortunov, R.A. Nikitin // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 16, No. 4 (3). – P. 642–645.

3. Snezhkina, O.V. Reinforced concrete beams in the zone of action of transverse forces / O.V. Snezhkina, S.A. Tolushov // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 23 (52). – P. 126–133.

4. Skachkov, Yu.P. Dependence of the strength of reinforced concrete beams on their geometric characteristics in the zone of action of transverse forces / Yu.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, R.A. Ladin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1 (38). – P. 56–62.

5. Snezhkina, O.V. Calculation of the strength of reinforced concrete beams with an average shear span / O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornukhin, R.A. Ladin // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 1 (18). – P.118–122.

6. Code of rules SP 63.13330.2018 «SNiP 52-01-2003 Concrete and reinforced concrete structures. Basic Provisions».

7. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings (TKP EN 1992-1-1-2009).

8. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318–19).

9. Zalesov, A.S. Calculation of the strength of reinforced concrete beams using volumetric finite elements in the development of norms for the design of reinforced concrete structures / A.S. Zalesov, A.A. Paschanin // Structural mechanics and calculation of structures. – 2011. – No. 4. – P. 66–71.

10. Garkina, I.A. Design and optimization of the properties of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 4 (37). – P. 5–11.

11. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I.Garkina, A. Danilov, Yu. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>

12. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32. – DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-2-25-32.

УДК 678.033

DOI 10.54734/20722958_2023_4_135

*Вятский государственный университет
(ВятГУ)**Vyatka State University (VyatSU)*Россия, 610000, г. Киров,
ул. Московская, д. 36,
тел.: (8332) 74-25-65Russia, 610000, Kirov, 36,
Moskovskaya St.,
tel.: (8332) 74-25-65**Юркин Юрий Викторович**,
кандидат технических наук,
зав. кафедрой «Строительные конструкции
и машины»
E-mail: yurkin@vyatsu.ru**Yurkin Yuriy Viktorovich**,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Building Structures and
Machines»
E-mail: yurkin@vyatsu.ru**Авдонин Валерий Викторович**,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительные
конструкции и машины»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru**Avdonin Valeriy Viktorovich**,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building Structures and
Machines»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru**Широкова Евгения Сергеевна**,
кандидат химических наук,
доцент кафедры «Химия и технология
переработки полимеров»
E-mail: usr06779@vyatsu.ru**Shirokova Evgeniya Sergeevna**,
Candidate of Chemical Sciences, Associate
Professor of the Department «Chemistry and
Technology of Polymer Processing»
E-mail: usr06779@vyatsu.ruИсследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00301,
<https://rscf.ru/project/21-79-00301/>.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТИРОЛЬНЫХ ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ (ТЭП)

Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин, Е.С. Широкова

Изучено влияние базового блок-сополимера на демпфирующие свойства материалов. Выявлено, что наиболее перспективными для использования в качестве демпфирующих подкладок являются материалы на основе стирол-изопрен-стирольного блок-сополимера (СИС). Определены температурные диапазоны, при которых материалы демонстрируют высокие демпфирующие свойства.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, динамический механический анализ (ДМА), вибропоглощение, демпфирующие материалы, стирольные термоэластопласты, температура стеклования

ANALYSIS OF DYNAMIC AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STYRENE THERMOPLASTIC ELASTOMERS (TPE)

Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin, E.S. Shirokova

The effect of the base block copolymer on the damping properties of materials has been studied. It is found that the most promising materials for damping pads are materials based on styrene-isoprene-styrene block copolymer (SIS). The temperature ranges at which the materials demonstrate high damping properties are determined.

Keywords: polymer composite materials, dynamic mechanical analysis (DMA), vibration absorption, damping materials, styrene thermoplastic elastomers, glass transition temperature

Введение. Полимеры широко используются в различных областях науки и техники [1, 2]. Одна из крупных областей применения – строительная индустрия, в которой особым спросом пользуются материалы, обладающие демпфирующими свойствами. Демпфирование – это процесс гашения и предотвращения нежелательных колебаний или рассеивание механической энергии системы. Особое внимание демпфированию колебаний уделяется при строительстве в сейсмоопасных районах, так как чрезвычайно важно снизить амплитуду колебаний в зданиях при землетрясениях.

Полимерные композиционные материалы являются эффективными вибропоглощающими материалами, так как обладают способностью к диссипации внешней энергии, что обусловлено особенностями их молекулярного и надмолекулярного строения. Часть энергии внешнего механического поля, затрачиваемой на колебания, полимеры рассеивают в виде тепла вследствие релаксационных явлений, происходящих в них при циклическом нагружении [3].

Длительное время полимерные демпфирующие материалы изготавливались из резин на основе натурального или синтетических каучуков [4]. Однако этот тип материала в настоящее время вытесняется термоэластопластами (ТЭП), которые представляют собой группу материалов, способных в процессе эксплуатации к большим обратимым деформациям, подобно резинам, а также к вторичной переработке, подобно пластикам [5, 6]. Применение ТЭП вместо резин позволяет на 30 % снизить энерго- и трудозатраты (благодаря отсутствию этапов изготовления заготовок, вулканизации, удаления облоя), в 10-20 раз уменьшить газовыделение и обеспечить полную утилизацию отходов. Кроме того, в 2-2,5 раза увеличивается производительность и съем изделий с производственных площадей при снижении материалоемкости изделий на 25-30 % (благодаря уменьшению удельного веса материала) [7, 8].

Теоретический анализ. В [9] показано, что эффективность демпфирования колебаний в композите главным образом определяется природой полимера. В связи с этим целесообразно начинать разработку состава композита с выбора полимера – основы, в данном исследовании – с выбора ТЭП.

Термоэластопласты включают в себя две большие группы материалов: блок-сополимеры (например, стирольные блок-сополимеры, сополимеры сложных эфиров, термопластичные полиуретаны, блок-полиамиды) и композиции на основе смеси каучука и термопласта (например олефиновые термоэластопласты) [10, 11]. При изучении опыта использования термопластичных эластомеров в качестве демпфирующих материалов было установлено, что одними из наиболее перспективных ТЭП для этой цели являются блок-сополимеры бутадиена и стирола [12].

Цель данной работы:

1. Установить, какой тип стирольного блок-сополимера является наиболее перспективным базовым полимером, обеспечивающим высокие демпфирующие свойства.
2. Определить температурные интервалы, в которых материалы на основе ТЭП наиболее эффективны с точки зрения поглощения вибраций.

Методика

Материалы. Блок-сополимеры бутадиена и стирола (СИС, СБС, СЭБС) можно рассматривать как базовые полимеры с уникальным сочетанием прочности и эластичности.

В качестве базового полимера было использовано несколько видов стирольных ТЭП:

- блок-сополимеры типа стирол-изопрен-стирол (СИС): SIS Vector 4111 NS (производство TRSC Specialty Materials LLC), SIS Vector 4113 NS (производство TRSC Specialty Materials LLC) и SIS HYBRAR 5127 (производство Kuraray Elastomer);
- блок-сополимеры типа стирол-бутадиен-стирол (СБС): SBS P 30-00A (производство СИБУР) и ДСТ-30Л-01 (производство СИБУР п);
- блок-сополимеры типа стирол-этилен-бутадиен-стирол (СЭБС): SEBS TAIPOL 6150 (производство TSRC Company) и SEBS LCY 7551 (производство LCY Company).

Выбранные СИС представляют собой линейные триблоки, различающиеся содержанием стирола: 20 % для SIS HYBRAR 5127, 15,2 и 18,1 % для SIS Vector 4111 NS и

4113 NS соответственно. Кроме того, SIS Vector 4111 NS содержит в своем составе 17,5 % диблока; меньшее содержание стирола и присутствие диблока придают ему большую мягкость. SIS HYBRAR 5127 обогащен виниловыми связями и рекомендуется для областей применения, требующих высокого демпфирования.

Выбранные СБС также представляют собой триблок-сополимеры, содержащие около 30 % стирола. Они обладают превосходной способностью к переработке в расплаве и значительной эластичностью при низких температурах, различаются по структуре: SBS P 30-00A имеет радиальную структуру, ДСТ-30Л-01 – линейную.

Блок-сополимеры типа стирол-этилен-бутилен-стирол (СЭБС) представляют собой гидрогенизированные СБС. Гидрогенизация СБС практически устраняет двойные связи в молекулах СБС и, следовательно, значительно снижает деградацию, вызванную кислородом, озоном и ультрафиолетом. СЭБС демонстрирует улучшенную стойкость к окислению, сопротивление ползучести и остаточную деформацию при сжатии.

Ввиду того что переработка стирольных ТЭП часто осуществляется совместно с полипропиленом (ПП), испытаниям подвергались как исходные ТЭП, так и их смеси с ПП марки H030GP (производство «СИБУР»).

Приготовление композиций. Блок-сополимеры были смешаны с полипропиленом в соотношении 75/25 массовых частей соответственно. Компоненты смешивали в микромиксере типа Brabender при температуре 180 °С в течение 6 минут.

Для последующих испытаний материалов образцы отливались на лабораторном термопластавтомате серии SZS при температуре 190 °С и давлении впрыска 5 атмосфер.

Экспериментальная часть. Наиболее интенсивное вибропоглощение в материале соответствует температуре стеклования. При этой температуре происходит «размораживание» сегментальной подвижности больших кинетических сегментов основной цепи полимера, что приводит к максимальному изменению основных вязкоупругих характеристик полимеров [13]. Для определения температуры стеклования и основных вязкоупругих свойств полимера воспользовались методом динамического механического анализа (ДМА), который проводили согласно ASTM D7028-07(2015) на динамическом механическом анализаторе DMA 242C/1/F, фирма NETZSCH. Из отлитых на термопластавтомате лопаток подготавливались образцы размерами не менее 5 мм в диаметре и 2 мм толщиной.

Режимы испытаний образцов: температурный диапазон испытаний – от –80°С до +80°С; изменение температуры – 1-2 градуса в минуту; частота испытаний – 10 Гц; нагрузка на образец – 5 Н.

В ходе испытаний фиксировали тангенс угла механических потерь $\text{tg}\delta$, коэффициент механических потерь (или КМП) η и температуру, соответствующую максимальному значению коэффициента механических потерь, – T при $\text{tg}\delta_{\text{max}}$.

Известно, что коэффициент механических потерь полимеров, определяющий эффективность гашения вибраций, не является константой и в значительной степени зависит от температуры и частоты колебаний. Максимальные потери механической энергии ($\text{tg}\delta_{\text{max}}$) в полимерах проявляются в области перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое, положение которой на шкале температур определяется температурой стеклования ($T_{\text{ст}}$) [14, 15].

Результаты. Для каждого типа блок-сополимера и его композиции с ПП были проведены испытания на динамическом механическом анализаторе.

На рис. 1-3 представлены результаты испытаний СИС трех разных марок и композиций СИС/ПП.

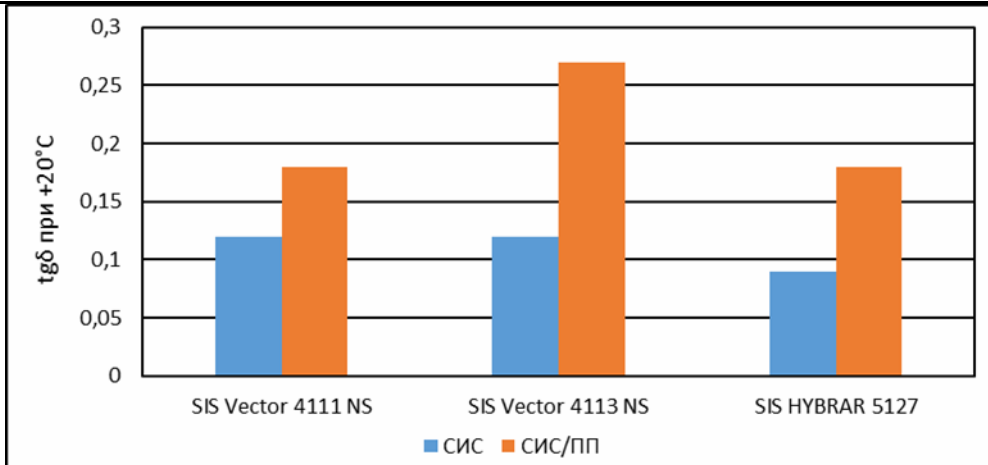


Рис. 1. Зависимость удельной демпфирующей способности материалов на основе чистого СИС и композиций СИС/ПП при температуре +20°C

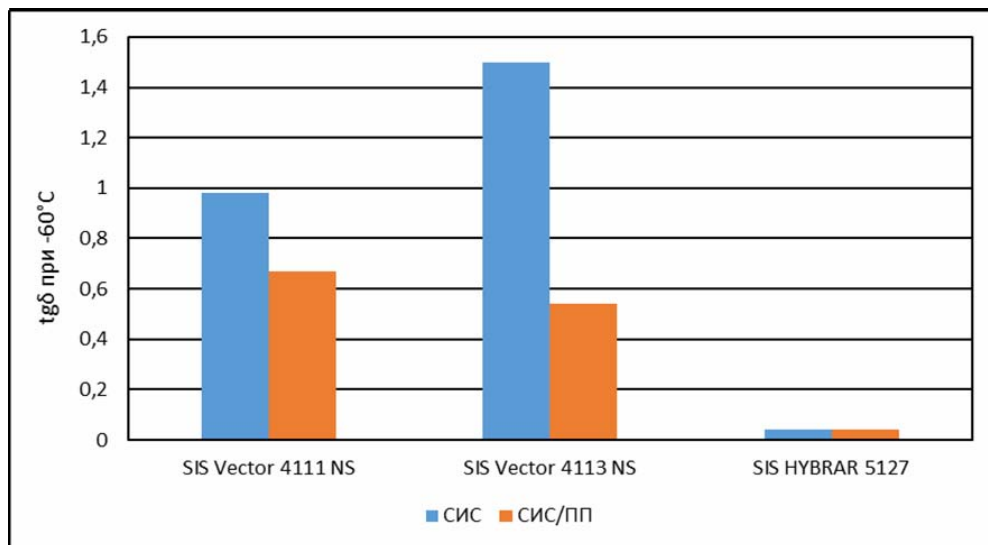


Рис. 2. Зависимость удельной демпфирующей способности материалов на основе чистого СИС и композиций СИС/ПП при температуре -60°C

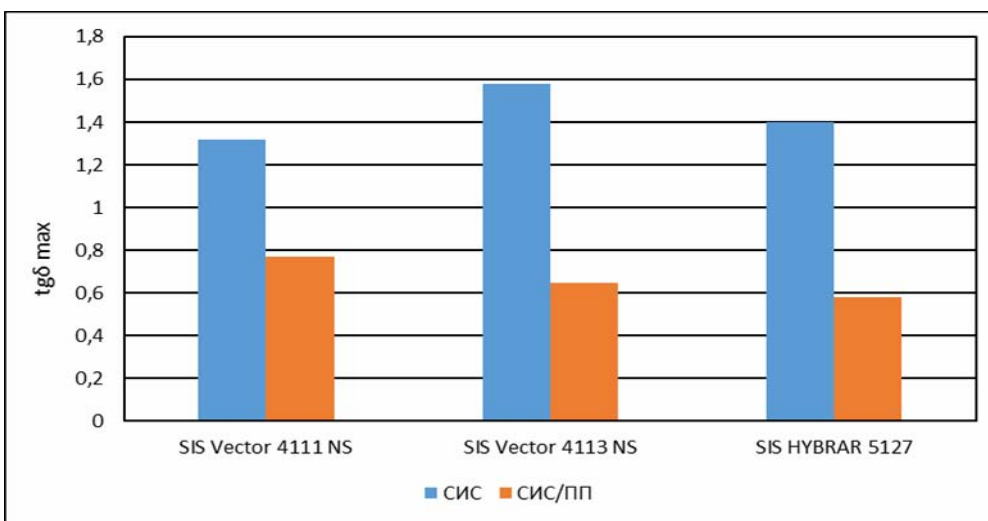


Рис. 3. Максимальная удельная демпфирующая способность материалов на основе чистого СИС и композиций СИС/ПП

В табл. 1 приведены результаты динамического механического анализа для материалов на основе чистого СИС и композиций СИС/ПП.

Т а б л и ц а 1

Результаты динамического механического анализа для материалов на основе СИС и СИС/ПП при частоте в 10 Гц

Частота 10 Гц	$\text{tg}\delta_{\text{max}}$	T при $\text{tg}\delta_{\text{max}}$	$\text{tg}\delta$ при $+20^\circ\text{C}$	$\text{tg}\delta$ при -60°C
SIS Vector 4111 NS	1,32	-75	0,12	0,98
SIS Vector 4113 NS	1,58	-76	0,12	1,5
SIS HYBRAR 5127	1,4	45	0,09	0,04
SIS Vector 4111 NS/ПП	0,77	-42	0,18	0,67
SIS Vector 4113 NS/ПП	0,645	-45	0,27	0,54
SIS HYBRAR 5127/ПП	0,58	34	0,18	0,04

Для композиций СИС с ПП наблюдается снижение максимального тангенса угла механических потерь и тангенса угла механических потерь при -60°C , но происходит увеличение значения тангенса при $+20^\circ\text{C}$.

Стирол-этилен-бутадиен-стирол (СЭБС) и стирол-бутадиен-стирол (СБС) подвергались испытаниям на динамический механический анализ только в композиции с полипропиленом, так как показатель текучести расплава для индивидуальных СБС и СЭБС менее 1 г/10 мин, что не позволяет получать образцы методом литья под давлением.

Рис. 4 демонстрирует зависимость удельной демпфирующей способности от температуры для двух марок СЭБС и СБС, смешанных с полипропиленом.

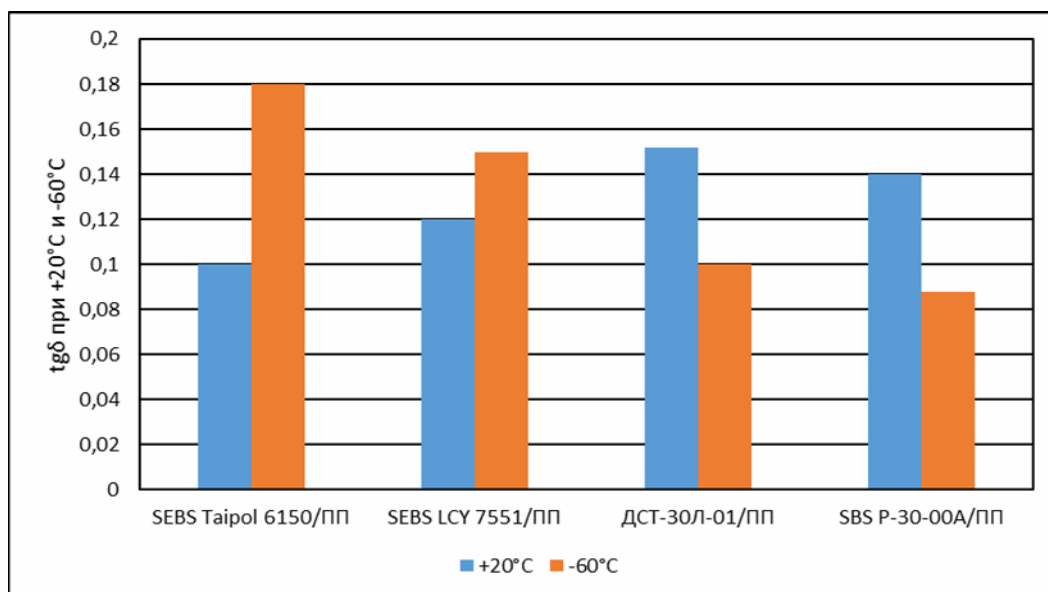


Рис. 4. Зависимость удельной демпфирующей способности материалов на основе композиций СЭБС/ПП и СБС/ПП при температурах $+20$ и -60°C

В табл. 2 представлены результаты ДМА для материалов на основе СЭБС и СБС с полипропиленом при частоте в 10 Гц.

Результаты динамического механического анализа для материалов на основе композиций СЭБС/ПП и СБС/ПП

Частота 10 Гц	$\text{tg}\delta_{\text{max}}$	T при $\text{tg}\delta_{\text{max}}$	$\text{tg}\delta$ при $+20^\circ\text{C}$	$\text{tg}\delta$ при -60°C
SEBS Taipol 6150/ПП	0,19	-48	0,1	0,18
SEBS LCY 7551/ПП	0,16	-51	0,12	0,15
ДСТ-30Л-01/ПП	0,18 при $+80^\circ\text{C}^*$	-	0,15	0,1
SBS P-30-00/ПП	0,17 при $+80^\circ\text{C}^*$	-	0,14	0,088

* В выбранном температурном диапазоне материал не достиг максимальных демпфирующих свойств.

Сравнивая различные марки стирольных блок-сополимеров, можно сделать вывод, что наиболее высокие демпфирующие свойства демонстрирует материал на основе стирол-изопрен-стирольного блок-сополимера (рис. 5).

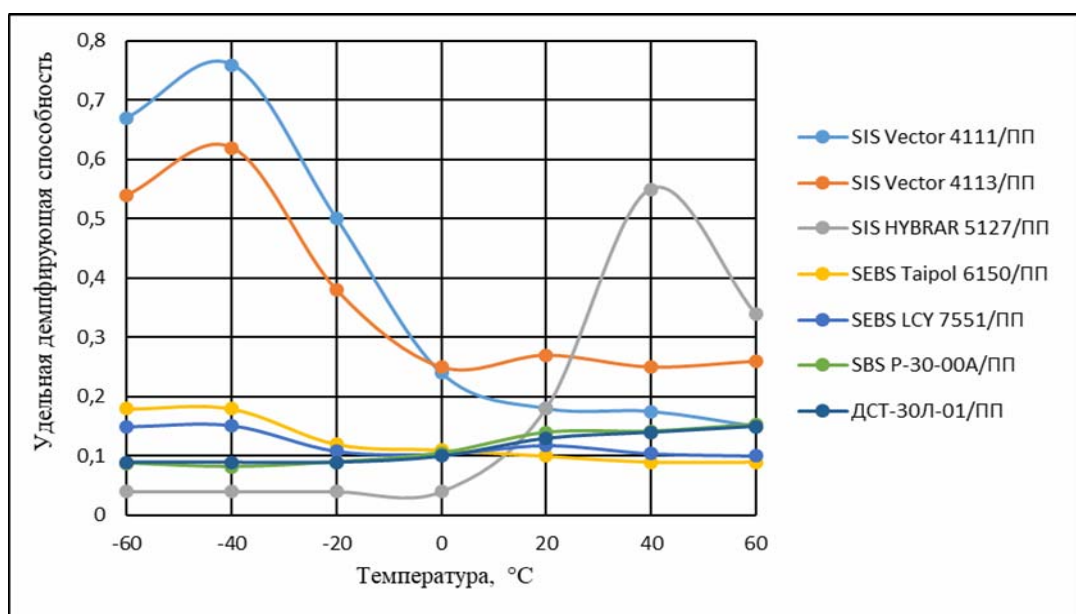


Рис. 5. Удельная демпфирующая способность различных марок стирольных блок-сополимеров

Заключение. Согласно полученным данным, наиболее перспективными базовыми полимерами, обеспечивающими высокие демпфирующие свойства, являются блок-сополимеры типа стирол-изопрен-стирол (СИС). Этот тип блок-сополимеров обеспечивает максимальный тангенс угла механических потерь, максимальный тангенс угла механических потерь при температуре $+20^\circ\text{C}$ ($\text{tg}\delta$ при $+20^\circ\text{C}$) и максимальный тангенс угла механических потерь при температуре -60°C ($\text{tg}\delta$ при -60°C).

Сравнивая полученные результаты ДМА для чистого стирол-изопрен-стирольного блок-сополимера (см. рис. 2) и результаты ДМА для смеси стирол-изопрен-стирольного блок-сополимера с полипропиленом (см. рис. 1), можно сделать вывод, что полипропилен, имеющий более высокую температуру стеклования ($T_c = -10...-20^\circ\text{C}$), смещает температуру стеклования стирол-изопрен-стирольного блок-сополимера типа SIS 4111 и SIS 4113 с более низких температур (-50 и -58°C соответственно) в более высокие (-42 и $-45,4^\circ\text{C}$ соответственно). Для стирол-изопрен-стирольного блок-сополимера типа SIS HYBRAR полипропилен смещает температуру стеклования с более высоких температур ($+43^\circ\text{C}$) в более низкие ($+34^\circ\text{C}$). На основании результатов исследования можем сделать вывод, что блок-сополимеры типа стирол-изопрен-стирол марок SIS Vector 4111NS, SIS Vector 4113NS и SIS HYBRAR 5127 обеспечивают

высокие демпфирующие свойства материалов. С помощью различных комбинаций блок-сополимеров типа стирол-изопрен-стирол между собой и с другими полимерами (полипропилен, полиэтилен низкого давления, полиэтилен высокого давления и т.д.) можно обеспечить высокие демпфирующие свойства композиционного материала в широком интервале температур эксплуатации.

Список литературы

1. Fan, R. Experimental study of the effect of viscoelastic damping materials on noise and vibration reduction within railway vehicles / R. Fan, G. Meng, J. Yang, C. He // *Journal of Sound and Vibration*. – 2009. – Vol. 319, № 1–2. – P. 58–76.
2. Сытый, Ю.В. Новые вибропоглощающие материалы / Ю.В. Сытый, В.А. Сагомонова, В.И. Кислякова, В.А. Большаков // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – №2 (23). – С. 51–54.
3. Сагомонова, В.А. Основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения / В.А. Сагомонова // *Материалы остекления и термопласты в авиационной промышленности*. – 2013. – №11. – С. 3–12.
4. Сагомонова, В.А. Оценка возможности применения вибропоглощающего материала на основе полиуретана в качестве уплотнителей / В.А. Сагомонова, С.С. Долгополов, А.Е. Сорокин, В.В. Целикин // *Труды ВИАМ*. – 2021. – №10 (104). – С. 28–35.
5. Kaliyathan, A.V. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering / A.V. Kaliyathan, A.V. Rane, K. Kanny, H.J. Maria, S. Thomas // Elsevier Inc. – 2022.
6. Долинская, Р.М. Изменение свойств эластомерных композиций при различных видах старения / Р.М. Долинская, Н.Р. Прокопчук // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. – 2018. – №2 (2). – С. 30–34.
7. Abitha, V.K. Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers / V.K. Abitha, V.A. Rane, K. Kanny, J.M. Hanna, S. Thomas // Elsevier Inc. – 2022.
8. Waseem, S.K. Recycling and Reusing of Engineering Materials / S.K. Waseem, A. Eylem, U. Md. Nizam, R. Asmatulu // Elsevier Inc. – 2022.
9. Черкасов, В.Д. Строительные композиты с повышенными вибропоглощающими свойствами: дис. ... д-ра техн. наук / В.Д. Черкасов. – М., 1995. – 332 с.
10. Прут, Э.В. Разработка полимерных композиционных материалов на основе термопластичных эластомеров / Э.В. Прут, Н.И. Черкашина, А.В. Ястребинская // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2016. – №12. – С. 195–199.
11. Dick, J.S. Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance / J.S. Dick. – 2010. – P. 620.
12. Hui, H. Wall slip of styrene-isoprene-styrene (SIS) triblock copolymer induced by micro elastic phase / H. Hui, T. Guannan, G. Qingqing, H. Haiqing, Zh. Jian, Li Junyu // *Polymer*. – 2020. – Vol. 209.
13. Rao, M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes / M.D. Rao // *Journal of Sound and Vibration*. – 2003. – Vol. 262, № 3. – P. 457–474.
14. Соломатов, В.И. Вибропоглощающие композиционные материалы / В.И. Соломатов, В.Д. Черкасов, Н.Е. Фомин. – Саранск: Изд-во Мордовского университета. – 2001. – С. 95.
15. Аскадский, А.А. Вибропоглощающие градиентные полимерные материалы / А.А. Аскадский, Л.В. Лучкина, Г.Г. Никифорова // *Пластические массы*. – 2007. – №4. – С. 30–33.

References

1. Fan, R. Experimental study of the effect of viscoelastic damping materials on noise and vibration reduction within railway vehicles / R. Fan, G. Meng, J. Yang, C. He // *Journal of Sound and Vibration*. – 2009. – Vol. 319, № 1–2. – P. 58–76.

2. Syty, Yu.V. New vibration-absorbing materials / Yu.V. Syty, V.A. Sagomonova, V.I. Kislyakova, V.A. Bolshakov // *Aviation materials and technologies*. – 2012. – №2 (23). – P. 51–54.
3. Sagomonova, V.A. Basic principles of creating vibration-absorbing materials for aviation purposes / V.A. Sagomonova // *Glazing materials and thermoplastics in the aviation industry*. – 2013. – No. 11. – P. 3–12.
4. Solomonova, V.A. Evaluation of the possibility of using a vibration-absorbing material based on polyurethane as seals / V.A. Sagomonova, S.S. Dolgopolov, A.E. Sorokin, V.V. Tselikin // *Proceedings of VIAM*. – 2021. – №10 (104). – P. 28–35.
5. Kaliyathan, A.V. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering / A.V. Kaliyathan, A.V. Rane, K. Kanny, H.J. Maria, S. Thomas // Elsevier Inc. – 2022.
6. Dolinskaya, R.M. Changing the properties of elastomeric compositions in various types of aging / R.M. Dolinskaya, N.R. Prokopchuk // *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoecology*. – 2018. – №2 (2). – C. 30–34.
7. Abitha, V.K. Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers / V.K. Abitha, V.A. Rane, K. Kanny, J.M. Hanna, S. Thomas // Elsevier Inc. – 2022.
8. Waseem, S.K. Recycling and Reusing of Engineering Materials / S.K. Waseem, A. Eylem, U. Md. Nizam, R. Asmatulu // Elsevier Inc. – 2022.
9. Cherkasov, V.D. Building composites with increased vibration-absorbing properties: dis. ... Doctor of Sciences / V.D. Cherkasov. – M., 1995. – 332 p.
10. Prut, E.V. Development of polymer composite materials based on thermoplastic elastomers / E.V. Prut, N.I. Cherkashina, A.V. Yastrebinskaya // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. – 2016. – No. 12. – P. 195–199.
11. Dick, J.S. Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance / J.S. Dick. – 2010. – P. 620.
12. Hui, H. Wall slip of styrene-isoprene-styrene (SIS) triblock copolymer induced by micro elastic phase / H. Hui, T. Guannan, G. Qingqing, H. Haiqing, Zh. Jian, Li Junyu // *Polymer*. – 2020. – Vol. 209.
13. Rao, M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes / M.D. Rao // *Journal of Sound and Vibration*. – 2003. – Vol. 262, № 3. – P. 457–474.
14. Solomatov, V.I. Vibration-absorbing composite materials / V.I. Solomatov, V.D. Cherkasov, N.E. Fomin. – Saransk: Publishing House of the Mordovian University. – 2001. – P. 95.
15. Askadsky, A.A. Vibration-absorbing gradient polymer materials / A.A. Askadsky, L.V. Luchkina, G.G. Nikiforova // *Plastic masses*. – 2007. – No. 4. – P. 30–33.

УДК 004.02

DOI 10.54734/20722958_2023_4_143

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

Титова Елена Ивановна,
кандидат педагогических наук,
доцент кафедры «Математика
и математическое моделирование»

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 54-85-16

Акимова Ирина Викторовна,
кандидат педагогических наук, доцент
кафедры «Информатика и методика
обучения информатике и математике»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Titova Elena Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Mathematics and
Mathematical Modeling»

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 54-85-16

Akimova Irina Victorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Informatics and Methods
of Teaching Science and Mathematics»

МНОГОСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ УТЕПЛЕНИЯ: ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Е.И. Титова, И.В. Акимова

Представлено разработанное в программной среде MS Visual Studio 2022 приложение для расчета теплопроводности многослойных конструкций. Изложен полный алгоритм работы данного приложения. Приведен пример решения задачи теплопроводности трехслойной конструкции утепления стен со всеми необходимыми расчетами.

Ключевые слова: строительство, многослойные конструкции, теплопроводность, программное обеспечение, среда MS Visual Studio

MULTILAYER INSULATION STRUCTURES: SOFTWARE

E.I. Titova, I.V. Akimova

An application developed in the MS Visual Studio 2022 software environment is proposed for calculating the thermal conductivity of multilayer structures. The full algorithm of this application is presented. An example of solving the problem of thermal conductivity of a three-layer wall insulation structure is given with all necessary calculations.

Keywords: construction, multilayer structures, thermal conductivity, software, MS Visual Studio

При строительстве жилых домов, офисных зданий, складских помещений, гаражей и т.д. одним из главных вопросов является определение теплопроводности стен и необходимой в помещении температуры с учетом вида строительных материалов и их свойств. На рынке почти каждый день появляются новые виды утеплителей, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Нередко используют многослойную конструкцию утепления. Одной из таких является колодцевая кладка, представляющая собой трехслойную конструкцию утепления стен. Каждый слой – это один из видов строительных материалов: дерево; кирпич; газобетонные блоки; керамоблоки и т.д. Данная кладка продумана для снижения теплоотдачи стен и является самой энергоэффективной. При ее использовании в строительстве необходимо продумать, какой материал будет внутренним, какой – внешним: от этого зависит расчет температуры внутри здания. Вторым важным фактором является толщина утеплителя, точнее, его теплопроводность.

Потеря тепла в построенном помещении – одна из главных проблем, возникающих при сдаче объекта. Поэтому на начальной стадии строительства расчету теплопро-

водности следует уделить достаточное внимание. Современные технологии всегда приходят на помощь и позволяют достигнуть поставленных целей быстрее и точнее.

Нами разработано приложение в программной среде MS Visual Studio 2022 для расчета теплопроводности описанной выше конструкции. Выбранная нами MS Visual Studio 2022 является комплексной интегрированной средой разработки, которую можно использовать для полной сборки, отладки и запуска приложения. В ней осуществлялся весь алгоритм по созданию приложения.

Данное приложение призвано решать две важные строительные задачи:

- расчет температуры на выходе трехслойной конструкции;
- расчет толщины утеплителя.

Рассмотрим алгоритм работы приложения в виде блок-схемы (рис. 1). Для расчета внутренней температуры необходимо задать четыре параметра: толщину трех слоев строительной конструкции и внешнюю температуру. Результатом будет вычисленное значение внутренней температуры. Для расчета толщины слоя утеплителя необходимо задать толщину первого и третьего слоя, а также внешнюю температуру и необходимую внутреннюю температуру.

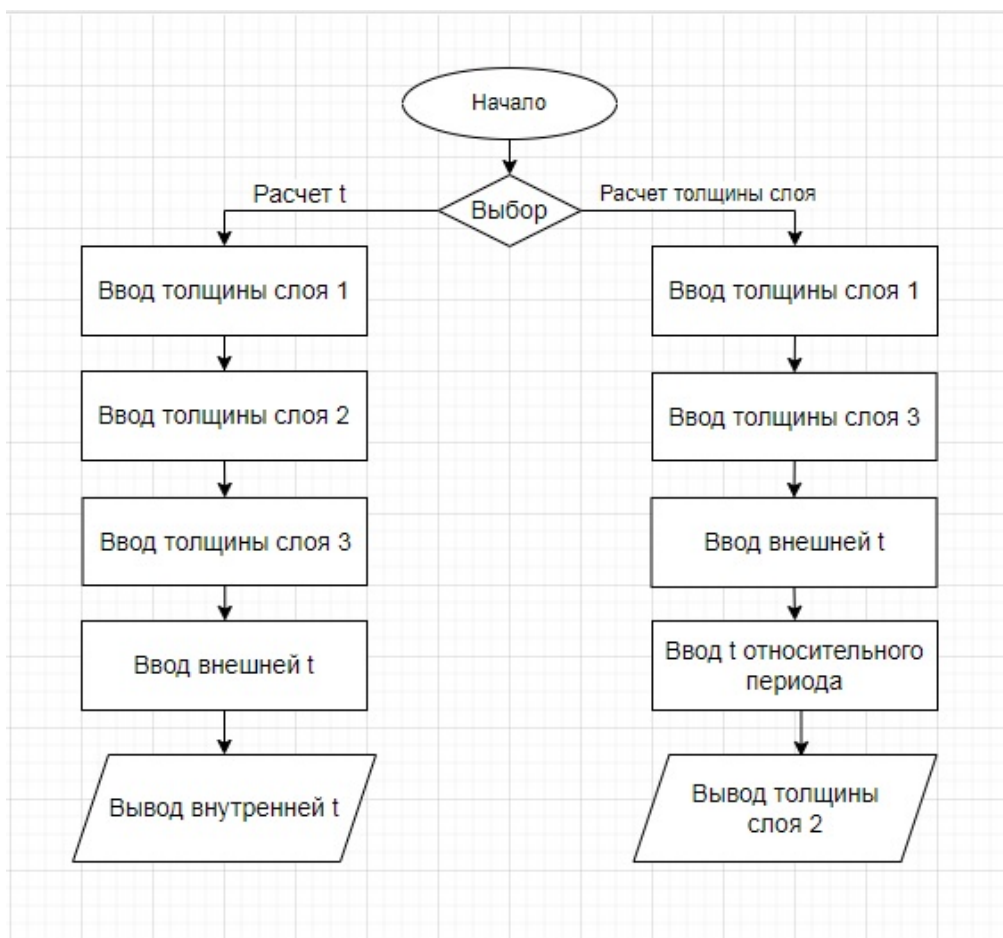


Рис.1. Схема работы программы

Для расчёта толщины слоя в приложении используются следующие формулы:

$$\delta_2 = \left(\frac{R_{req}}{r} - \frac{1}{a_{внутр}} - \frac{1}{a_{внеш}} - R_1 - R_3 \right) \cdot \lambda_2;$$

$$D_d = (t_{внутр} - t_{внешн}) z;$$

$$R_{req} = aD_d + b,$$

где R_{req} – нормируемое сопротивление теплопередаче; D_d – градусо-сутки отопительного периода; Z – количество суток; a, b – коэффициенты, значения которых следует принимать по данным, находящимся в общем доступе, в соответствии с необходимым материалом.

В разработанном приложении с помощью элементов управления `comboBox` организуется выбор типа утеплителя: дерево; кирпич; газобетонные блоки; керамоблоки; пенопласт; железобетон. Вводится толщина каждого слоя с помощью элемента управления `textBox`, в `textBox` вводится и внешняя температура.

Ниже представлен фрагмент программы для расчета температуры в помещении:

```
d1=l1-l0;
d2=l2-l1;
d3=l3-l2;
tvnu=tvne+d1/a1+d2/a2+d3/a3;
tb1=tvnu-d1/a1;
tb2=tvnu-d1/a1-d2/a2;
t1=tvnu-(x-l0)/a1;
t2=tvnu-(x-l1)/a2-d1/a1;
t3=tvnu-(x-l2)/a3-d1/a1-d2/a2;
```

Помимо вывода результата температуры в помещении также осуществляется построение графика распределения температур, где указана температура при выходе из каждого слоя и итоговая в самом помещении.

Полностью приложение на экране имеет следующий вид (рис. 2):

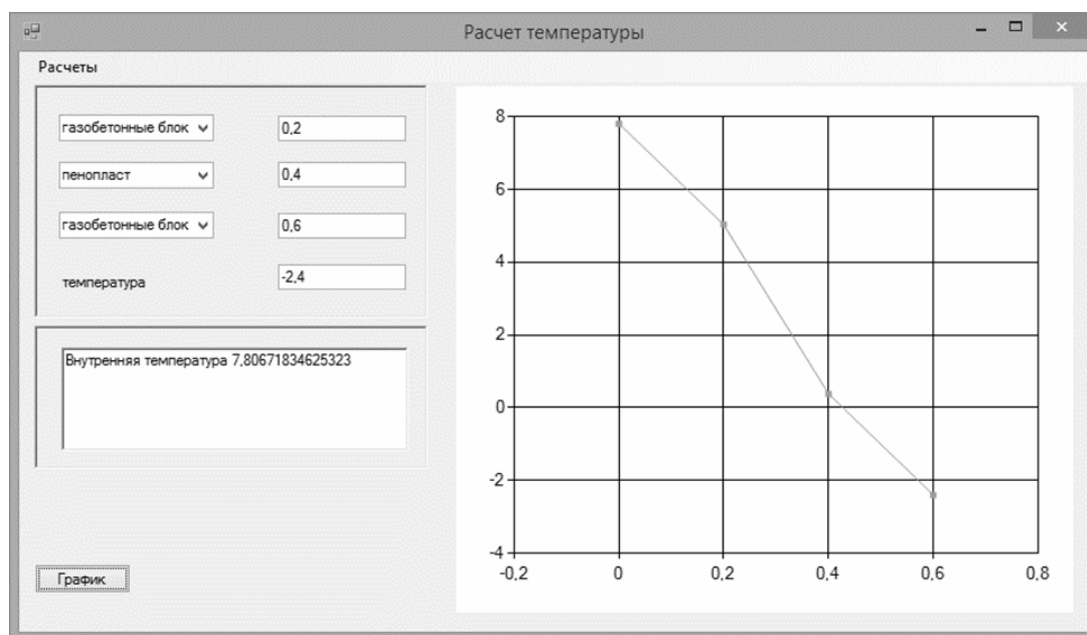


Рис. 2. Вид приложения

Перейдем к алгоритму расчета второй задачи.

Для организации ввода данных вызывается дополнительная форма. В ней задается ввод типа трех слоев и толщина двух слоев, внешняя температура, средняя температура для отопительного периода (рис. 3).

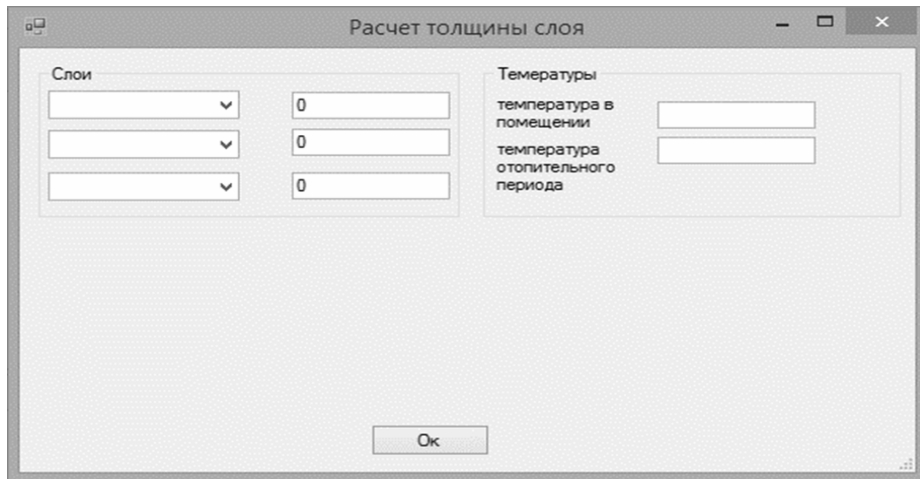


Рис. 3. Форма для расчета толщины слоя утеплителя

Фрагмент самой программы расчета представлен ниже:

```

tvne=Convert::ToDouble(tvne1->Text);
tvnu=Convert::ToDouble(tvnu1->Text);
l1=Convert::ToDouble(textBox1->Text);
l3=Convert::ToDouble(textBox3->Text);
d=(tvnu-tvne)*205;
req=0.00035*d+1.4;
req=req/0.75;
d2=(req-1/(8.7)-1/23-a1-a3)*a2.
    
```

Реализация приложения была апробирована на нескольких строительных объектах. Решались следующие задачи:

Задача 1: планируется постройка здания, в качестве утеплителя предполагается использовать газобетонные блоки. Необходимо рассчитать возможную температура внутри помещения. Результаты работы приложения приведены на рис. 4.

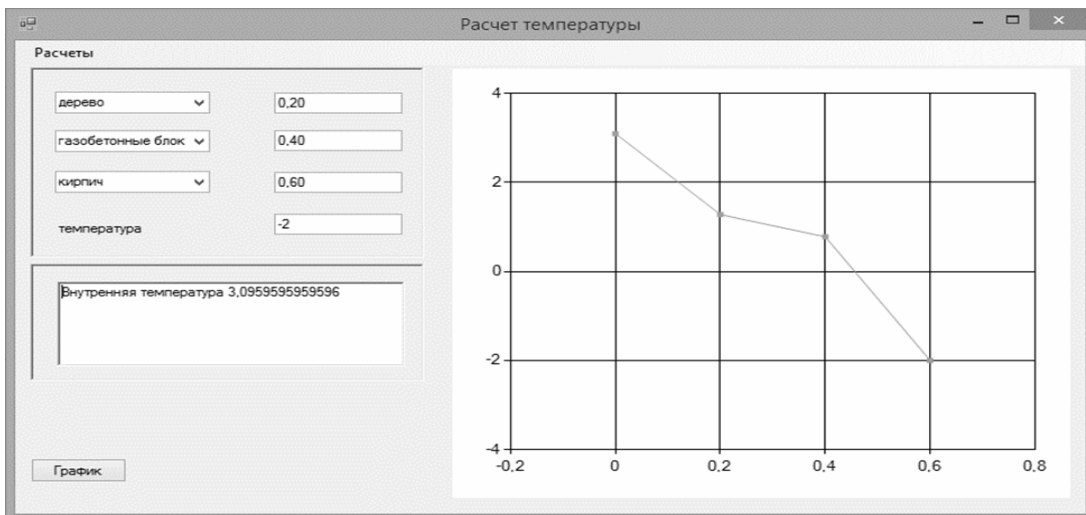


Рис. 4. Пример расчета температуры помещения

Задача 2: дом с кирпичными стенами необходимо для утепления обшить деревом. Вычислим толщину утеплителя-пенопласта для достижения комфортной температуры в помещении. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

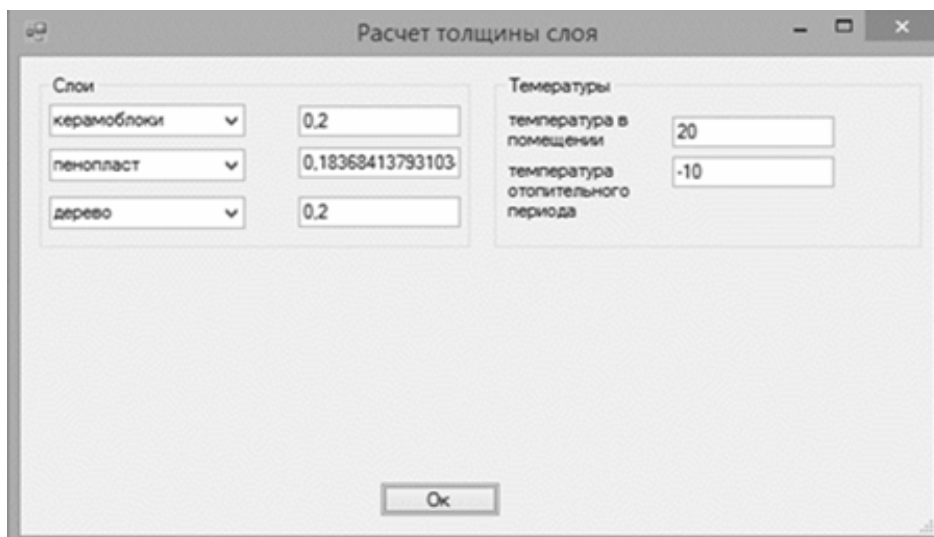


Рис. 5. Пример расчета толщины слоя утеплителя

Актуальность таких приложений обусловлена необходимостью оптимизировать процесс выбора материалов при строительстве домов. Критерием оптимальности служит поддержание необходимой для данного конструктивного решения температуры в доме. Разработанное приложение избавляет от рутинной вычислительной работы и может быть использовано на этапе проектирования дома. Оно экономит время, позволяет получить точный результат и подобрать эффективный и нужный вариант материалов для утепления.

Список литературы

1. Акимова, И.В. Создание электронного учебника модульной структуры курса математики / И.В. Акимова, Е.И. Титова, В.А. Буркина // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – №3. – С.15–19.
2. Акимова, И.В. Использование современных цифровых технологий в решении математических задач строительного профиля / И.В. Акимова, Е.И. Титова // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – №5 (часть2). – С.261–268.
3. Будылина, Е.А. Системные исследования в материаловедении / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4(49). – С.48–53.
4. Гарькин, И.Н. Из опыта экспертизы зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера / И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина, С.В. Ключев, Д.С. Саженко // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №4(53). – С.66–74.
5. Титова, Е.И. Регрессионные методы в строительном материаловедении: компьютерная реализация / Е.И. Титова, Ю.Н. Волчкова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2020. – №1(10). – С.18–22.

References

1. Akimova, I.V. Creation of electronic textbook of modular structure of mathematics course / Akimova I.V., E.I. Titova, V.A. Burkina // Modern science-intensive technologies. – 2015. – No. 3. – P. 15–19.
2. Akimova, I.V. The use of modern digital technologies in solving mathematical problems of the construction profile / I.V. Akimova, E.I. Titova // Modern high-tech technologies. – 2022. – No. 5 (part2). – P. 261–268.
3. Budylyna, E.A. System research in materials science / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №4(49). – P.48–53.

4. Garkin, I.N. From the experience of examination of buildings and structures in the conditions of the Far North / I.N. Garkin, I.A. Garkina, S.V. Klyuev, D.S. Sadenko // Regional architecture and engineering. – 2022. – №4(53). – P.66–74.

5. Titova, E.I. Regression methods in building materials science: computer implementation / E.I. Titova, Y.N. Volchkova // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. – 2020. – №1(10). – P.18–22.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 519.87 : 697.956

DOI 10.54734/20722958_2023_4_149

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 технических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы», действительный
член Нью-Йоркской академии наук

*Автономная некоммерческая
образовательная организация высшего
профессионального образования
«Сколковский институт науки
и технологий»*

Россия, 121205, г. Москва, Территория
Инновационного Центра
«Сколково», Большой бульвар д.30, стр.1.
тел. +7 (495) 280 14 81

Кошев Николай Александрович,
кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель
E-mail: nikolay.koshev@gmail.com

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 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 Sciences, Professor of the
Department «Information and Computing
Systems», Full member of the New York
Academy of Sciences

*Autonomous non-profit educational
organization of Higher Professional Education
«Skolkovo Institute of Science and
Technology»*

Russia, 121205, Moscow, Territory of the
Skolkovo Innovation Center, Bolshoi
boulevard, 30, building 1,
tel.: +7 (495) 280 14 81

Koshev Nikolay Aleksandrovich,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Senior lecturer
E-mail: nikolay.koshev@gmail.com

Penza State university
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay 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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХМЕРНОГО ДИФФУЗИОННО- КОНВЕКТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ СВЕЧЕЙ В ХРАМЕ

В.В. Кузина, А.Н. Кошев, Н.А. Кошев, И.К. Пономарева

Определяется распределение технического углерода при горении церковных свечей на подсвечнике в форме плоского круга или прямоугольника симметрично его центру в замкнутом пространстве помещения. Исследование проводилось с применением

современных математических и экспериментальных методов. Дается сравнительный анализ результатов расчетов с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность полученных математических моделей и позволяет сделать выводы о возможности и эффективности использования результатов исследования для решения практических задач по обеспечению чистоты воздуха в закрытых помещениях. Эффективность использованных методов подтверждена при реконструкции Спасского кафедрального собора в городе Пензе.

Ключевые слова: тепловой источник, конвективный поток, диффузия, технический углерод, копоть, сажа, математическое моделирование, церковная свеча, зал богослужения

MATHEMATICAL MODELING OF TWO-DIMENSIONAL DIFFUSIVE-CONVECTIVE DISTRIBUTION OF CANDLE BURNING PRODUCTS IN A CHURCH

V.V. Kuzina, A. N. Koshev, N.A. Koshev, I.K. Ponomareva

The distribution of carbon black during the burning of paraffin candles located on a candlestick in the form of a flat circle or rectangle is given symmetrically to its center in a closed space of the room. The study was carried out using the methods of mathematical modeling and experimentally. Comparison of calculated values with experimental data confirms the adequacy of the obtained mathematical models, which allows us to draw conclusions about the possibility and effectiveness of using the results of the study to solve practical problems of studying the purity of air in enclosed spaces, in particular, in the hall of worship of Orthodox religious buildings.

Keywords: heat source, convective flow, diffusion, carbon black, soot, soot, mathematical modeling, church candle, worship hall

Состояние качества воздуха внутри помещений, в которых могут находиться точечные источники горения, в частности церковные свечи в залах богослужения, требует тщательного исследования. С целью обеспечения комфортных условий для прихожан и сохранения объектов историко-культурного наследия нами применяются современные математические методы, позволяющие рассчитать параметры аэродинамических процессов в конвективных потоках, образующихся за счет теплоты горящих свечей [1–5].

Рассматриваются два варианта возможного распространения технического углерода (копоти и сажи) в зале богослужения при горении церковных свечей в православных культовых сооружениях:

- двухмерная плоская диффузия, когда распространение продуктов горения свечей в пространстве помещения происходит на некотором фиксированном участке;
- двухмерная плоская конвективная диффузия, при которой кроме диффузионной составляющей потока углекислого газа и микрочастиц копоти и сажи существенной является конвективная составляющая потока, обусловленная вертикальной или горизонтальной принудительной или естественной вентиляцией помещения.

Моделирование данных процессов связано с созданием условий для улавливания и удаления копоти и сажи из помещений и исследованием диффузии копоти и сажи из конвективного потока во внутренний воздух помещения.

Упрощение трехмерной задачи до двухмерной модели возможно, когда процессы, протекающие в параллельных плоскостях $z = \text{const}$, можно считать идентичными, что вполне соответствует рассматриваемой ситуации. При этом имеет место малая величина источника горения в сравнении с пространственными размерами рассматриваемого помещения.

Распределение технического углерода (копоти и сажи) в ограниченном пространстве вследствие горения свечей в точечных источниках описывается в общем виде уравнением

$$\rho \frac{dC}{d\tau} = D\nabla^2 C + J. \quad (1)$$

Здесь C – концентрация интересующего нас технического углерода (копоти и сажи), г/см^3 ; τ – текущее время, с ; ρ – плотность среды, г/см^3 ; J – источник массы, г ; D – коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$; ∇^2 – дивергенция рассматриваемых векторов.

Условимся, что эффектами термодиффузии и бародиффузии можно пренебречь в сравнении с диффузией, вызванной градиентом концентрации молекул технического углерода (копоти и сажи) в зоне точечных источников горения – сферическом пространстве Ω (рис. 1) – и в помещении. Примем значение $D = \text{const}$.

Рассмотрим плоскую диффузию технического углерода (копоти и сажи) в пространстве помещения.

*Плоская диффузия технического углерода (копоти и сажи)
в пространстве помещения*

Сделанные ранее предположения и упрощения позволяют рассматривать уравнение диффузии вредных веществ как двумерное, заданное в некоторой области Ω , которое имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

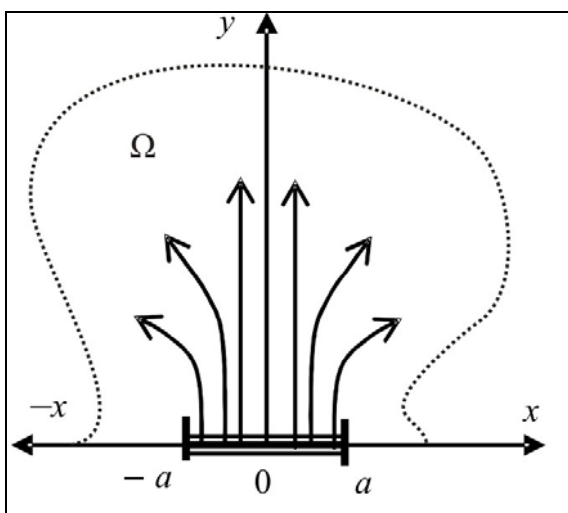


Рис. 1. Источник горения постоянной мощности, действующий на участке границы $[-a; a]$ плоского сечения ограниченного пространства Ω в виде сферы

Если на участке границы $[-a, a]$ находится постоянно действующий источник горения с плотностью $p(x, \tau)$, а начальная концентрация технического углерода в пространстве Ω равна нулю, в качестве граничных условий можно выбрать следующие:

$$C(x, y, 0) = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=0} = \begin{cases} p(x, \tau) & \text{при } -a \leq x \leq a, \\ 0 & \text{при } x \notin [-a, a], \end{cases} \quad (3)$$

$$C(x, 0) = C_0, \quad -a \leq x \leq a, \quad C(x, y) \Big|_{y=\infty} = 0, \quad C(x, y) \Big|_{x=\pm\infty} = 0,$$

где $p(x, \tau)$ – плотность потока примеси.

Решение задачи для рассматриваемого случая при условии, что в любой точке $x \in [-a, a]$ в любой момент времени τ через границу $[-a, a]$ в помещение от горения свечей поступает технический углерод (копоть и сажа) с фиксированной плотностью потока ($p(x, \tau) = \text{const} = p$), производится по формуле

$$C(x, y, \tau) = \frac{p}{(2\sqrt{D\pi})^3} \int_0^\tau \int_{-a}^a \frac{1}{(\tau-t)^{3/2}} e^{-\frac{(x-\xi)^2+y^2}{4D(\tau-t)}} d\xi dt. \quad (4)$$

Формула (4) позволяет рассчитывать распределение концентрации вредностей от горения свечей в горизонтальном поперечном сечении пространства области Ω в направлении помещения в заданный момент времени t .

На рис. 2, 3 приведены результаты численных экспериментов при значении скорости перемещения воздуха в помещении, равной нулю, т.е. в закрытом, неветилируемом помещении. Рис. 2 иллюстрирует распределение технического углерода при диффузии без учета конвекции в плоскости (x,y) вертикального сечения пространства распространения сажи при следующих геометрических и физических параметрах процесса: расчетная область и область источника горения $-20 \div 20$ и $-1 \div 1$ см, соответственно; мощность источника – 10^{-12} г/(см³с); время t , с, указано на соответствующих графиках; коэффициент термоконвективной диффузии – $0,2$ см²/с; скорость движения воздуха – $0,0$ см/с; концентрация копоти и сажи соответствует цветовой гамме, приведенной на цветовой шкале (на графиках справа), г/см³.

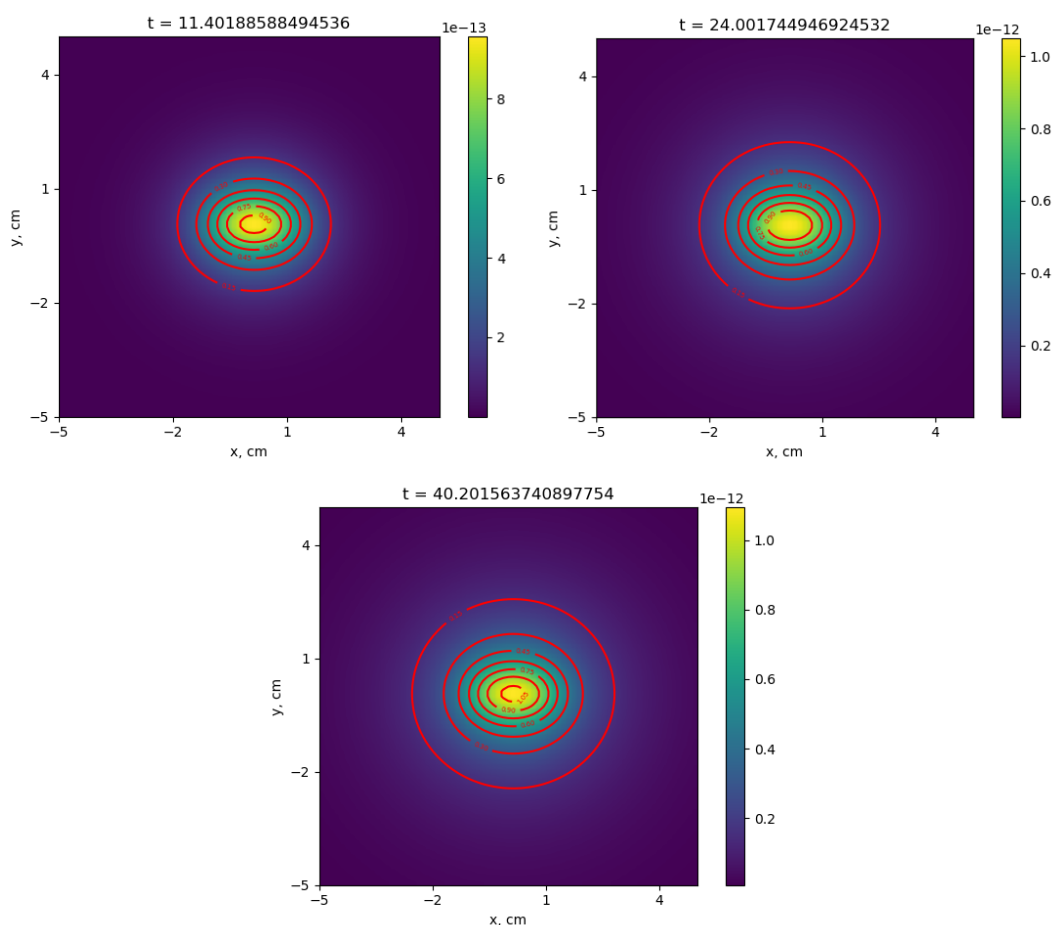


Рис. 2. Вид плоской диффузии технического углерода без учета конвекции в плоскости (x,y) вертикального сечения пространства

На рис. 3 представлено распределение концентрации (г/см³) технического углерода в плоскости (y,t) , (x,t) вертикального сечения пространства распространения сажи при геометрических и физических параметрах процесса, указанных на рис. 2.

Анализируя результаты вычислений, приведенных на рис. 2 и 3, можно сделать вывод, что увеличение времени процесса горения в четыре раза приводит к увеличению накопления продуктов горения приблизительно в два раза. Исходя из результатов вычислительного и натурального экспериментов можно, например, оценить время, за которое накопление продуктов горения превысит в пространстве Ω предельно допустимую норму по сравнению с концентрацией копоти и сажи в помещении. Это приведет к интенсификации диффузии из пространства Ω в воздух помещения.

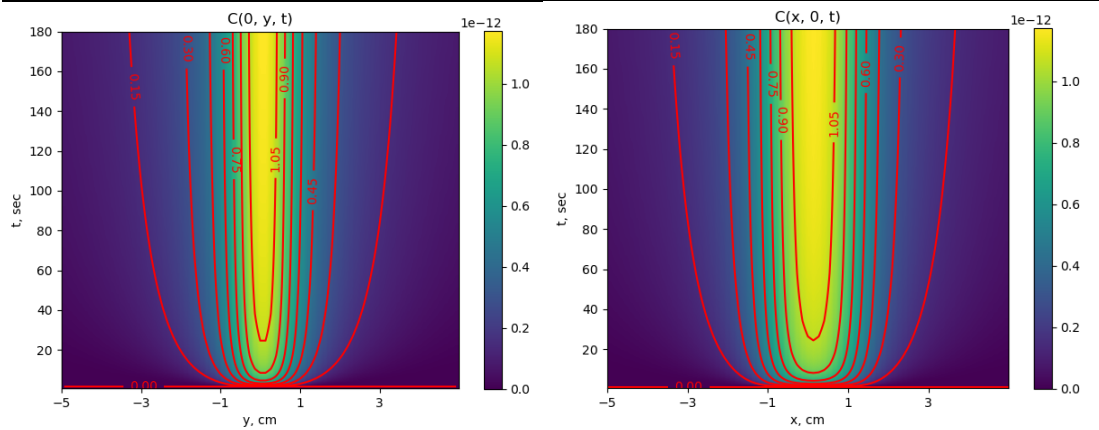


Рис. 3. Вид плоской диффузии технического углерода без учета конвекции в плоскости (y,t) , (x,t) вертикального сечения пространства

Далее рассмотрим случай плоской конвективной диффузии загрязняющих веществ в пространство помещения.

Плоская конвективная диффузия технического углерода (копоти и сажи) в пространстве помещения

В случае нестационарной конвективной диффузии в плоской воздушной среде помещения (рис. 4), обусловленной принудительной или естественной вентиляцией, распространение технического углерода (копоти и сажи) от постоянно горящего источника определяется в виде

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + v \nabla C,$$

где $v = (v_x, v_y)$ – вектор скорости движения воздушной смеси.

Наиболее реалистичным является случай, когда $v = v_x$, т.е. движение воздуха осуществляется в одном направлении, параллельном оси OX , на которую помещен источник горения. Источник горения и загрязняющего вещества с плотностью $p(x, t)$ находится на участке границы $[-a, a]$ (см. рис. 4).

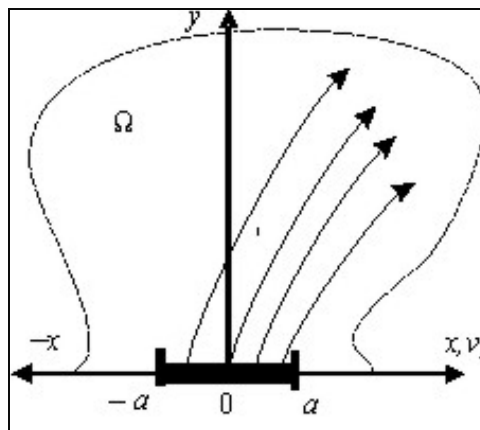


Рис. 4. Вид плоской конвективной диффузии продуктов горения

При принятых допущениях справедливо:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + v \frac{\partial C}{\partial x}.$$

Или путем замены $C(x, y, \tau) = G(x, y, \tau) \cdot e^{-\frac{v}{2D}x - \frac{v^2}{4D}\tau}$ получаем:

$$\frac{\partial G}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

с краевыми условиями:

$$\frac{\partial G}{\partial y} = \begin{cases} p(x, \tau) \cdot e^{\frac{v}{2D}x + \frac{v^2}{4D}\tau} & \text{при } -a \leq x \leq a, \\ 0 & \text{при } x \notin [-a, a]. \end{cases} \quad (6)$$

Решение задачи (5), (6) может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} G(x, y, \tau) &= \frac{1}{(2\sqrt{D\pi})^3} \int_0^\tau \frac{dt}{(\tau-t)^{3/2}} \int_{-a}^a e^{-\frac{(x-\xi)^2+y^2}{4D(\tau-t)} - \frac{v\xi}{2D} - \frac{v^2\tau}{4D}} P(\xi, t) d\xi = \\ &= \frac{1}{(2\sqrt{D\pi})^3} \int_0^\tau \int_{-a}^a \frac{dt}{(\tau-t)^{3/2}} e^{-\frac{(x-\xi)^2+y^2}{4D(\tau-t)} - \frac{v\xi}{2D} - \frac{v^2\tau}{4D}} P(\xi, t) d\xi dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Заметим, что в случае, когда принудительная вентиляция над источником горения осуществляется в вертикальном направлении (например, при размещении над источником вытяжного зонта) или когда движение воздуха в помещении происходит как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении, решение задачи (7) и краевые условия для неизвестной функции формируются аналогично представленному в выражениях (5) – (7).

В данной работе для расчетов использован язык программирования *Python* с библиотеками/модулями *Numpy*, *Scipy* и *Matplotlib*. Очевидно, для численной реализации расчетных формул необходимо знание физических величин и констант, в частности: плотности источника технического углерода, коэффициента конвективной диффузии для каждого процесса, скорости конвективного переноса воздушной смеси, геометрических размеров источника. Значения перечисленных констант для исследуемых процессов конвективной диффузии углекислого газа в стандартных условиях (температура в помещении $T = 20$ °С, атмосферное давление $P = 760$ мм рт. ст.) следующие: плотность источника горения $10^{-4} - 10^{-2}$ г/см³; коэффициент диффузии $0,01 - 0,124$ см²/с; скорость потока $1 - 10$ см/с; размер источника $1 - 20$ см.

Для других температур и давлений коэффициент молекулярной диффузии находится по формуле

$$D = D_0 \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5}.$$

Примеры численного решения уравнения (7) с использованием языка программирования *Python* с библиотеками/модулями *Numpy*, *Scipy* и *Matplotlib* приведены на рис. 5–8. На рис. 5 представлено распределение технического углерода в плоскости (x, y) вертикального сечения пространства распространения сажи при следующих геометрических и физических параметрах процесса: расчетная область $-20 \div 20$ см; область источника горения $-1 \div 1$ см; мощность источника 10^{-13} г/(см³с); время t , с, указано на соответствующих рисунках; коэффициент термоконвективной диффузии $1,5$ см²/с; скорость движения воздуха $0,2$ см/с; концентрация сажи соответствует цветовой гамме, приведенной на цветовой шкале (на рисунках справа), г/см³.

В процессе эксплуатации в помещении возникают боковые движения внутреннего воздуха, которые отклоняют конвективный поток от вертикали. Результаты расчетов, приведенные на рис. 5, иллюстрируют смещение распространения технического угле-

рода в сторону движения воздуха, при этом, чем длительнее время, заданное в численном эксперименте, тем значимее смещение сажи, что, очевидно, соответствует наблюдаемым эффектам в натуральных экспериментах [6].

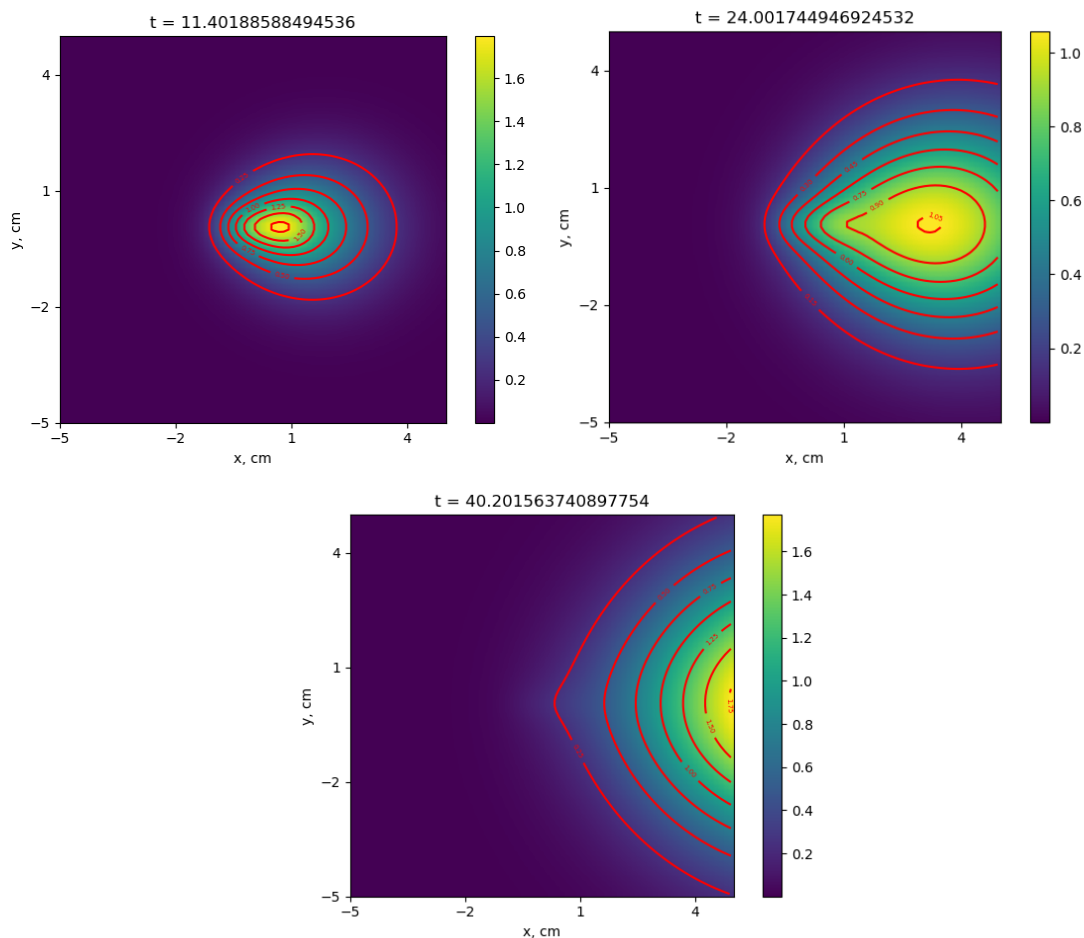


Рис. 5. Распределение конвективной диффузии продуктов горения в плоскости (x, y) вертикального сечения пространства

На рис. 6 представлено распределение концентрации ($\text{г}/\text{см}^3$) технического углерода в плоскости (y, t) , (x, t) вертикального сечения пространства распространения сажи, геометрические и физические параметры процесса.

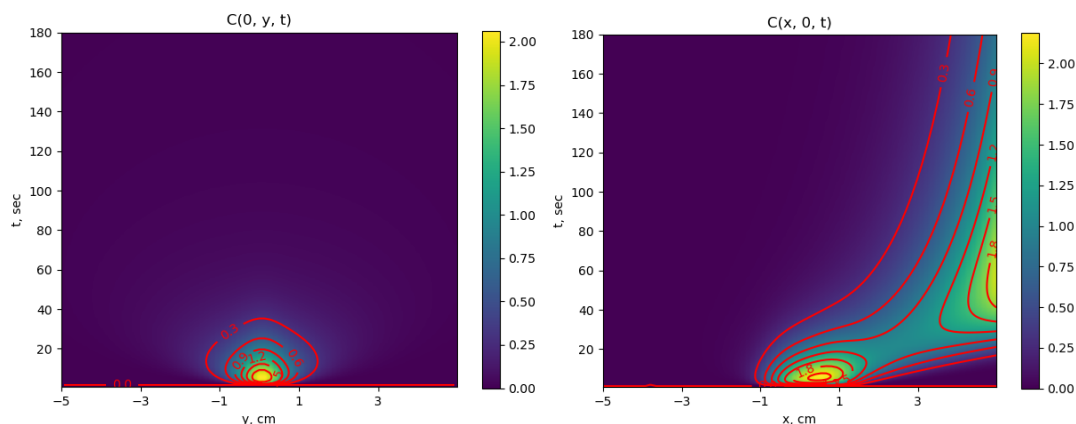


Рис. 6. Распределение конвективной диффузии продуктов горения в плоскости (y, t) , (x, t) вертикального сечения пространства

По результатам численных экспериментов, приведенных на рис. 6, можно сделать вывод, что движение воздуха оказывает незначительное влияние на распределение копоти и сажи по вертикальной оси и определяющим является распределение копоти и сажи по горизонтальной оси. При этом следует обратить внимание на эффект накопления технического углерода на гипотетической границе (границе расчетной области) в количествах, сравнимых с концентрацией технического углерода в окрестности источника горения свечи.

На рис. 7 представлено распределение концентрации ($\text{г}/\text{см}^3$) технического углерода в плоскости (x,t) и в плоскости (x,y) вертикального сечения пространства распространения сажи для двух значений коэффициента диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$, – 0,2 и 1,5, соответственно, при прочих геометрических и физических параметрах процесса, соответствующих рис. 5.

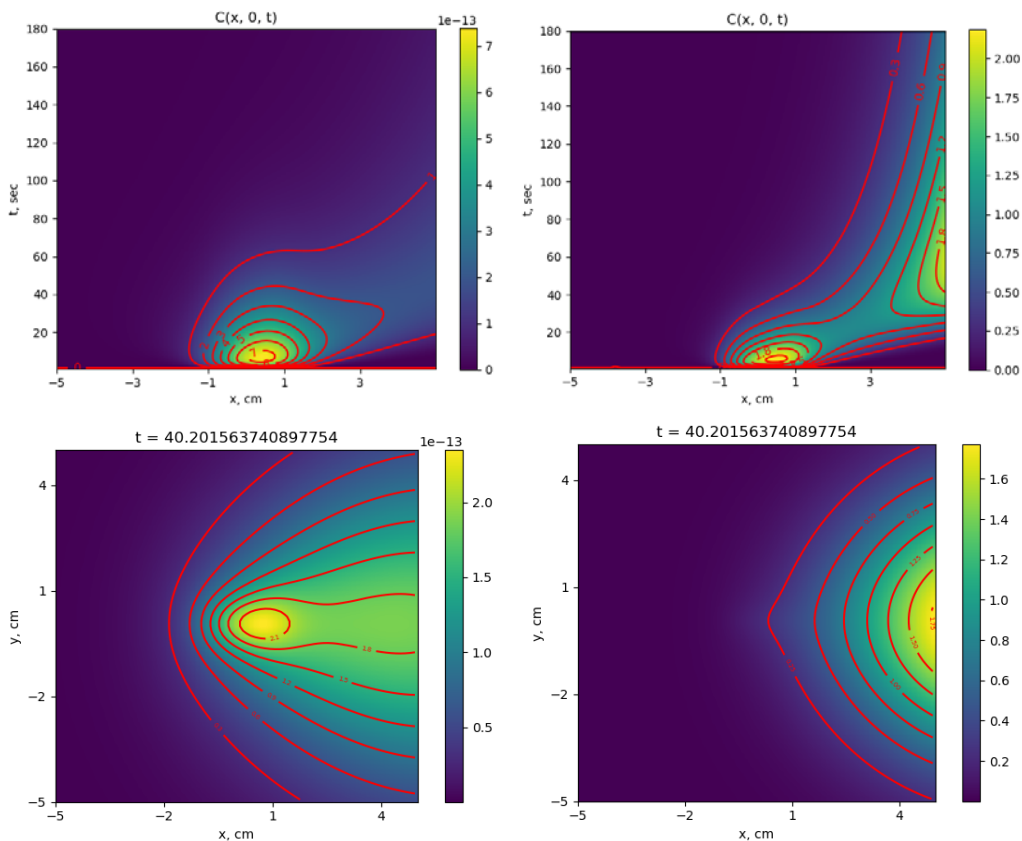


Рис. 7. Распределение конвективной диффузии продуктов горения в плоскости (x,t) и (y,t) вертикального сечения пространства

Результаты, представленные на рис. 7, свидетельствуют о существенной зависимости накопления сажи в рассматриваемом пространстве от величины коэффициента диффузии технического углерода, которая, очевидно, зависит от скорости перемещения воздуха в конвективном потоке и температуры горения источника. При этом чем больше значение коэффициента диффузии, тем интенсивнее происходит смещение накопления сажи в сторону движения воздуха.

На рис. 8 представлено распределение концентрации ($\text{г}/\text{см}^3$) технического углерода в плоскости (x,t) и в плоскости (x,y) вертикального сечения пространства распространения сажи при значении коэффициента диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$, – 0,2 и скорости движения воздуха, $\text{см}/\text{с}$, – 0,2 и 0,4, соответственно, при прочих геометрических и физических параметрах процесса, соответствующих рис. 5.

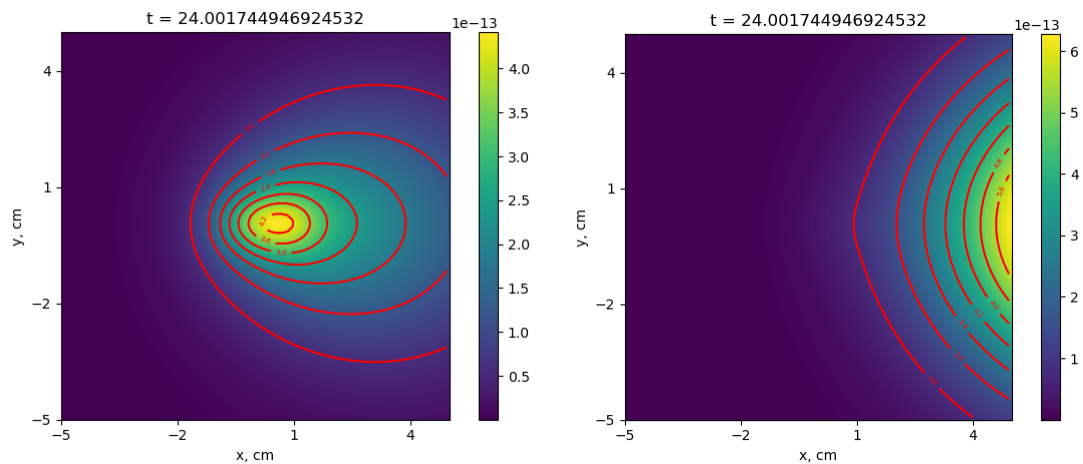


Рис. 8. Распределение конвективной диффузии продуктов горения в плоскости (x,t) , (x,y) вертикального сечения пространства

Приведенные на рис. 8 результаты отражают значительное влияние скорости движения воздуха в конвективном потоке на распределение продуктов горения точечного источника. Увеличение скорости в два раза влечет за собой более чем двухкратное смещение процесса по оси перемещения воздуха, при этом заметим, что в зоне горения источника копоть и сажа практически не накапливаются, а уносятся конвективным потоком воздуха и частично диффундируют нормально потоку в сторону помещения с меньшей концентрацией технического углерода (копоти и сажи).

Заметим в заключение, что время расчета в вычислительной системе с использованием многоядерного процессора повышенной производительности *Apple M1 Max*, возможности которого позволяют выполнять ресурсоемкие задачи, составило в среднем 3 секунды, объем использованной оперативной памяти – около 5 Гб.

В результате использования теоретических основ и закономерностей процессов конвективных потоков от теплоты горящих свечей разработаны математические модели для определения концентраций технического углерода (копоти и сажи) в продуктах сгорания свечей, выявлено влияние скорости движения воздуха в конвективном потоке, времени горения свечи на диффузионные процессы. Для численных решений использованы современные языки программирования.

Список литературы

1. Кузина, В.В. Математическое моделирование процессов переноса пассивной примеси в ограниченном пространстве / В.В. Кузина, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4(33). – С. 133–141.
2. Кузина, В.В. Математическое моделирование распределения конвективного потока над компактно расположенными точечными тепловыми источниками / В.В. Кузина, А.Н. Кошев, А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1(50). – С. 75–80.
3. Килин, П.И. Исследование закономерностей диффузионного распространения вредных примесей / П.И. Килин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 1(9). – С. 66–78.
4. Старкова, Л.Г. Оптимизация микроклимата в православном храме методом числового моделирования воздушных потоков / Л.Г. Старкова, Ю.А. Морева, Ю.Н. Новоселова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 53–59.
5. Пророкова, М.В. Математическое моделирование тепломассообмена в помещении для решения задач энергосбережения / М.В. Пророкова, В.В. Бухмиров // Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. –

Том II. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 260–263.

6. Еремкин, А.И. Теоретические и экспериментальные исследования по определению массовой концентрации сажи и копоти в воздухе залов богослужения / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1. – С. 84–87.

References

1. Kuzina, V.V. Mathematical Modeling of Passive Impurity Transfer Processes in Limited Space / V.V. Kuzina, A.N. Koshev // Regional Architecture and Engineering. – 2017. – № 4(33). – P. 133–141.

2. Kuzina, V.V. Mathematical modeling of convective flow distribution over compactly located point heat sources / V.V. Kuzina, A.N. Koshev, A.I. Eremkin // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – № 1(50). – P. 75–80.

3. Kilin, P.I. Research of regularities of diffusion distribution of harmful impurities / P.I. Kilin // Bulletin of the Ural State University of Railway Transport. – 2011. – № 1(9). – P. 66–78.

4. Starkova L.G., Moreva Y.A., Novoselova Y.N. Optimization of Microclimate in an Orthodox Church by Numerical Modeling of Airflows. Series «Construction and Architecture». – 2018. – Vol. 18, № 3. – P. 53–59.

5. Prorokova M.V., Bukhmirov V.V. Mathematical modeling of heat and mass transfer in the room to solve the problems of energy conservation / M.V. Prorokova, V.V. Bukhmirov // Proceedings of the International (XX All-Russian) Scientific and Technical Conference. – Vol. II. – Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University V.I. Lenin, 2019. – P. 260–263.

6. Eremkin, A.I. Development and testing of methods for calculating air exchange based on determining the concentration of soot and soot in the air when burning church candles in Orthodox places of worship / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva // Privolzhsky Scientific Journal. – 2022. – № 2. – P. 119–127.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2023_4_159

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

Андреев Сергей Юрьевич,

доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Тюменский индустриальный университет

Россия, 625000, г.Тюмень,
ул.Володарского, 38,
тел./факс: +7 (3452) 28-36-60

Белова Лариса Владимировна,

кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Начертательная геометрия и графика»,
доцент кафедры «Инженерные системы
и сооружения»
E-mail: beloalv@tyuiu.ru

Пензенский государственный университет

Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,

кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.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

Andreev Sergey Yuryevich,

Doctor of Sciences, Professor
of the Department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail:andreev3007@rambler.ru

Industrial University of Tyumen

Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel./fax: +7 (3452) 28-36-60

Belova Larisa Vladimirovna,

Candidate of Sciences, Head of the
Department «Descriptive Geometry and
Graphics», Professor of the department
«Engineering Systems and Structures»
E-mail: beloalv@tyuiu.ru

Penza State University

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,

Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ВСПЛЫВАНИЯ В ЧИСТОЙ ВОДЕ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА И ТОНКОСТЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ТЕЛ

С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский

Приведены результаты теоретических исследований закономерностей процессов всплывания в чистой воде пузырьков воздуха и тонкостенных сферических тел. Определены значения основных показателей, характеризующих кинетику процессов движения пузырька воздуха и тонкостенной сферической капсулы, всплывающих в различных режимах. Получены математические зависимости, описывающие процессы всплывания в чистой воде пузырьков воздуха и тонкостенных сферических тел в различных режимах.

Ключевые слова: коэффициент дисперсности, коэффициент формы, линейный размер, дисперсный размер, характерный размер, режим всплывания

THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE PROCESSES OF FLOATING AIR BUBBLES AND THIN-WALLED SPHERICAL BODIES IN CLEAN WATER

S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinskiy

The results of theoretical studies of the regularities of the processes of floating air bubbles and thin-walled spherical bodies in clean water are presented. The values of the main indicators characterizing the kinetics of the processes of movement of an air bubble and a thin-walled spherical capsule surfacing in various modes are determined. Mathematical dependences describing the

processes of air bubbles and thin-walled spherical bodies floating in clean water in various modes are obtained.

Keywords: dispersion coefficient, shape coefficient, linear size, dispersed size, characteristic size, pop-up mode

В настоящее время широкое распространение получили разнообразные технологические схемы аэробной биологической очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод, предусматривающие использование сложного комплекса инженерно-технических сооружений, предназначенных для насыщения иловой смеси аэротенков кислородом воздуха. Значительная часть эксплуатационных затрат на процесс аэробной биологической очистки сточных вод приходится на эти системы аэрации. Оптимизирование технологических и конструктивных параметров аэрационных систем аэротенков может позволить существенно сократить эксплуатационные затраты, необходимые для нормального функционирования сооружений биологической очистки.

Оптимизировать процесс работы аэрационной системы аэротенка невозможно без учета основных технологических показателей, характеризующих свойства динамической двухфазной дисперсной системы (вода – воздух), образующейся в аэрационном объеме аэротенка в процессе функционирования системы аэрации.

В качестве основных технологических показателей динамической дисперсной системы (вода – воздух), образующейся в аэрационном объеме аэротенка в процессе функционирования аэрационной системы, выступают показатели, адекватно описывающие степень дисперсности и особенности формы пузырьков воздуха.

Таковыми показателями являются:

1. **Основной линейный размер пузырька воздуха d , м.** Поскольку поперечный разрез пузырька воздуха всегда представляет собой круг, в качестве основного линейного размера принимается величина диаметра его поперечного сечения наибольшей площади ω , м²:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \omega}{\pi}}, \text{ м.} \quad (1)$$

2. **Дисперсный размер пузырька воздуха δ , м.** Величина дисперсного размера характеризует степень дисперсности (раздробленности) – признак объекта, связанный с его размерами и геометрией. Дисперсный размер пузырька воздуха δ является величиной, обратной его удельной поверхности $f_{уд}$, м²/м³, и определяется как отношение объема пузырька W , м³, к площади его поверхности f , м²:

$$\delta = \frac{1}{f_{уд}} = \frac{W}{f}, \text{ м.} \quad (2)$$

3. **Характерный размер пузырька воздуха h , м.** Величина характерного размера пузырька воздуха определяется как отношение объема пузырька воздуха W , м³, к площади его поперечного сечения ω , м²:

$$h = \frac{W}{\omega}, \text{ м.} \quad (3)$$

4. **Коэффициент формы пузырька воздуха K_{Φ}** – безразмерный параметр, характеризующий форму пузырька, величина которого определяется как отношение площади поверхности пузырька f , м², к площади его поперечного сечения ω , м²:

$$K_{\Phi} = \frac{f}{\omega}. \quad (4)$$

Для пузырька воздуха сферической формы коэффициент формы имеет значение

$$K_{\Phi} = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{4}{\pi \cdot d^2} = 4. \quad (5)$$

5. **Коэффициент дисперсности пузырька воздуха** K_D – отношение линейного размера пузырька d , м, к величине его дисперсного размера δ , м:

$$K_D = \frac{d}{\delta}. \quad (6)$$

Для пузырька воздуха сферической формы коэффициент дисперсности имеет значение

$$K_D = \frac{d}{\delta} = d \cdot \frac{f}{W} = d \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \frac{6}{\pi \cdot d^3} = 6. \quad (7)$$

Из формул (2), (3), (4) и (6) следует, что

$$h = \frac{W}{\omega} = \frac{\delta \cdot f}{\omega} = \frac{d}{K_D} \cdot \frac{K_{\Phi} \cdot \omega}{\omega} = \frac{K_{\Phi}}{K_D} \cdot d, \text{ м}, \quad (8)$$

и

$$\delta = \frac{h}{K_{\Phi}} = \frac{d}{K_D}, \text{ м}. \quad (9)$$

Для пузырька сферической формы величина характерного размера может быть определена как

$$h = \frac{K_{\Phi}}{K_D} \cdot d = \frac{4}{6} \cdot d, \text{ м}. \quad (10)$$

В процессе всплывания пузырька воздуха в турбулентном режиме при увеличении его диаметра более $d = 0,0015$ м происходит деформация пузырька, в результате чего он изменяет свою форму и приобретает вид сплющенного сфероида с большей осью, нормальной к направлению движения. Изменение формы пузырька приводит к повышению значения коэффициента гидравлического сопротивления ζ и снижению скорости всплывания пузырька при увеличении его диаметра d [1, 2].

В настоящее время сложилась традиция при описании движения пузырьков газа в жидкости в поле действия силы тяжести параллельно рассматривать и процесс всплывания в жидкости тонкослойных сферических капсул, имеющих величину плотности, близкую к плотности содержащегося в них газа [3, 4].

При анализе всплывания в жидкости твердых тел фиксированной формы можно исключить влияние изменения геометрических характеристик на кинетику движения тела в жидкости, что существенно упрощает процесс описания этого явления.

Всплывание в воде пузырька воздуха и твердой тонкостенной капсулы происходит в стационарном режиме, при котором действующие на всплывающее тело силы уравновешивают друг друга и средняя величина скорости всплывания сохраняет постоянное значение $V = \text{const}$, м/с:

$$F_g = F_{\Delta P} = F_{\tau}, \text{ Н}, \quad (11)$$

$$F_g = W \cdot (\rho - \rho_B) \cdot g = W \cdot \Delta \rho \cdot g, \text{ Н}, \quad (12)$$

$$F_{\Delta P} = \omega \cdot \Delta P = \omega \cdot \rho \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2}, \text{ Н}, \quad (13)$$

$$F_{\tau} = \tau_* \cdot f, \text{ Н}, \quad (14)$$

где F_g , $F_{\Delta P}$, F_{τ} – соответственно выталкивающая сила Архимеда; сила гидродинамического давления набегающего на всплывающее тело потока воды; сила трения потока жидкости о поверхность всплывающего тела, Н; ρ и ρ_B – плотности воды и воздуха, кг/м^3 ; $\Delta\rho = \rho - \rho_B$ – разность плотностей воды и воздуха, кг/м^3 ; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; ΔP – гидродинамическое давление, действующее на тело в потоке жидкости, Па; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления (сопротивление среды); τ_* – касательное напряжение силы вязкого трения потока жидкости о поверхность всплывающего тела, Н/м^2 .

Из (3), (8), (11), (12) и (13) имеем

$$\Delta P = \frac{W}{\omega} \cdot \Delta\rho \cdot g = h \cdot \Delta\rho \cdot g = \frac{K_{\Phi}}{K_{\Delta}} \cdot d \cdot \Delta\rho \cdot g = \rho \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2}, \text{ Па}. \quad (15)$$

В работе Кутателадзе С.С. («Гидродинамика газожидкостных систем», 1976) было рассмотрено понятие градиента гидродинамического давления, действующего на тело в потоке жидкости, движущейся относительно тела со скоростью V , м/с:

$$\frac{dP}{dl} = \frac{\Delta P}{h} = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2 \cdot h}, \frac{\text{Па}}{\text{м}}. \quad (16)$$

С учетом формул (2), (3), (11), (13) и (14) формула (16) может быть представлена в виде

$$\frac{dP}{dl} = \frac{\Delta P}{h} = \Delta P \cdot \frac{\omega}{W} = \frac{F_{\Delta P}}{W} = \frac{F_{\tau}}{W} = \frac{F_{\tau}}{f \cdot \delta} = \frac{\tau_*}{\delta}, \frac{\text{Па}}{\text{м}}, \quad (17)$$

откуда с учетом формулы (9)

$$\tau_* = \Delta P \cdot \frac{\delta}{h} = \Delta P \cdot \frac{h}{K_{\Phi}} \cdot \frac{1}{h} = \frac{\Delta P}{K_{\Phi}}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}. \quad (18)$$

Из формулы (17) следует, что величина приведенного градиента гидродинамического давления на всплывающее в воде ($\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$) тело с плотностью $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$ имеет постоянное значение:

$$\frac{dP}{dl} = \frac{\Delta P}{h} = \frac{h \cdot \Delta\rho \cdot g}{h} = \Delta\rho \cdot g = 997 \cdot 9,8 = 9771 \frac{\text{Па}}{\text{м}}. \quad (19)$$

Формула (17) показывает, что величина приведенного градиента гидродинамического давления потока жидкости на свободно всплывающее тело $\frac{dP}{dl}$, Па/м, может быть определена как отношение значения силы трения потока жидкости о поверхность всплывающего тела F_{τ} , Н, к объему этого тела W , м^3 , и является отношением величины касательного напряжения силы вязкого трения набегающего потока жидкости τ_* , Н/м^2 , к величине его дисперсного размера δ , м.

По аналогии с всплыванием тела в жидкости может быть рассмотрен и процесс установившегося равномерного движения жидкости с постоянной скоростью V , м/с, в

трубе длиной l , м, круглого сечения диаметром d_R , м, при условии равенства силы перепада давлений $F_{\Delta P}$, Н, и силы трения жидкости о поверхность стенок трубы F_τ , Н:

$$F_{\Delta P} = F_\tau, \text{ Н}, \quad (20)$$

$$F_{\Delta P} = \Delta P_R \cdot \omega_R = \Delta P_R \cdot \frac{\pi \cdot d_R^2}{4} = \Delta P_R \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2, \text{ Н}, \quad (21)$$

$$F_\tau = \tau_{*R} \cdot f_R = \tau_{*R} \cdot \chi \cdot l = \tau_{*R} \cdot \pi \cdot d_R \cdot l = \tau_{*R} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot l, \text{ Н}, \quad (22)$$

где ΔP_R , Па, – перепад давлений в сечениях трубы диаметром d_R , м, находящихся на расстоянии друг от друга l , м; ω_R , м², – площадь поперечного сечения трубы; $f_R = \chi \cdot l$, м², – площадь внутренней поверхности трубы, соприкасающейся с движущейся жидкостью на рассматриваемом участке; $\chi = \pi \cdot d_R = 4 \cdot \pi \cdot R$, м, – смоченный периметр, часть периметра поперечного сечения трубы, на котором жидкость соприкасается с ее твердыми стенками; $R = \frac{d_R}{4} = \frac{\omega_R}{\chi}$, м, – гидравлический радиус трубы – отношение площади поперечного сечения потока жидкости ω_R , м², к величине смоченного периметра χ , м; τ_{*R} , Н/м², – касательное напряжение силы вязкого трения жидкости о стенки трубы (сила трения на единице площади поверхности соприкосновения движущегося потока жидкости о стенки трубы).

Из (20), (21) и (22) имеем

$$F_{\Delta P} = F_\tau = \Delta P_R \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2 = \tau_{*R} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot l, \text{ Н}, \quad (23)$$

откуда

$$\tau_{*R} = \Delta P_R \cdot \frac{R}{l} = \Delta P_R \cdot \frac{R}{l} \cdot \frac{\chi}{\chi} = \Delta P_R \cdot \frac{\omega_R}{\chi} \cdot \frac{\chi}{l \cdot \chi} = \Delta P_R \cdot \frac{\omega_R}{f_R} = \frac{\Delta P_R}{K_{\Phi R}}, \text{ Н/м}^2, \quad (24)$$

где $K_{\Phi R} = \frac{f_R}{\omega_R}$ – коэффициент формы трубы.

Величина приведенного градиента давлений в трубе может быть определена как

$$\frac{dP_R}{dl} = \frac{\Delta P_R}{l} = \frac{\Delta P_R}{l} \cdot \frac{\omega_R}{\omega_R} = \frac{F_{\Delta P}}{W} = \frac{F_\tau}{W} = \tau_{*R} \cdot \frac{l}{R} \cdot \frac{1}{l} = \frac{\tau_{*R}}{R}, \frac{\text{Па}}{\text{м}}. \quad (25)$$

Для случая течения жидкости в трубе было введено понятие скорости касательного напряжения силы вязкого трения жидкости о поверхность стенки трубы (динамическая скорость) V_{*R} , м/с [5]:

$$V_{*R} = \sqrt{\frac{\tau_{*R}}{\rho}} = V \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \text{ м/с}, \quad (26)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси), откуда

$$\lambda = 8 \cdot \frac{V_{*R}^2}{V^2}. \quad (27)$$

По аналогии с (26) можем записать

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}} = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho \cdot K_\Phi}} = \sqrt{d \cdot \frac{K_\Phi}{K_D} \cdot \frac{\Delta \rho \cdot g}{\rho \cdot K_\Phi}} = \sqrt{\frac{d \cdot g}{K_D} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}} = \sqrt{\delta \cdot g \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (28)$$

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}} = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho \cdot K_\Phi}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot K_\Phi} \cdot \rho \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2}} = V \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{2 \cdot K_\Phi}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (29)$$

откуда

$$\zeta = 2 \cdot K_\Phi \cdot \frac{V_*^2}{V^2}. \quad (30)$$

Уравнение (15) может быть представлено в виде

$$\zeta = \frac{K_\Phi}{K_D} \cdot \frac{2 \cdot d}{V} \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot g \cdot \Delta \rho = \frac{1}{G_V \cdot V} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot g \cdot \Delta \rho = \frac{g \cdot \Delta \rho}{a_F \cdot \rho} \cdot \frac{W}{W} = \frac{F_g}{F_{\text{ам}}}, \quad (31)$$

где G_V – приведенный градиент скорости всплывания тела, с^{-1} ,

$$G_V = \frac{K_D}{K_\Phi} \cdot \frac{V}{2 \cdot d} = \frac{V}{2 \cdot h}, \text{с}^{-1}; \quad (32)$$

где a_F – приведенное ускорение характерного масштаба силы гидродинамического давления набегающего потока жидкости $F_{\Delta P}$, Н, на всплывающее тело, движущееся со скоростью V , м/с,

$$a_F = G_V \cdot V, \text{ м/с}^2; \quad (33)$$

$F_{\text{ам}}$ – характерный масштаб силы гидродинамического давления потока на всплывающее тело, Н,

$$F_{\text{ам}} = a_F \cdot \rho \cdot W, \text{ Н}. \quad (34)$$

Величина силы гидродинамического давления набегающего потока жидкости на всплывающее тело имеет значение

$$F_{\Delta P} = \omega \cdot \rho \cdot \zeta \cdot \frac{V^2}{2} = \zeta \cdot a_F \cdot \rho \cdot W, \text{ Н}, \quad (35)$$

и

$$\zeta = \frac{2 \cdot g \cdot h}{V^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{g}{G_V \cdot V} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{g}{a_F} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}, \text{ Н}, \quad (36)$$

при этом

$$F_g = F_{\Delta P} = F_\tau = \zeta \cdot F_{\text{ам}}, \text{ Н}. \quad (37)$$

Формула (15) также может быть записана в виде

$$V = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\zeta \cdot \rho}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{K_\Phi}{K_D} \cdot d} = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\zeta \cdot \rho}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (38)$$

где φ – коэффициент скорости,

$$\varphi = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\zeta \cdot \rho}}. \quad (39)$$

Формула (38) имеет вид, аналогичный виду формулы, используемой для определения величины средней скорости потока жидкости, вытекающей из отверстия в стенке сосуда:

$$V = \varphi_V \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\text{пр}}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (40)$$

где $H_{\text{пр}}$ – величина приведенного напора жидкости над отверстием, м; φ_V – коэффициент скорости истечения жидкости из отверстия,

$$\varphi_V = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_V}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (41)$$

здесь ζ_V – коэффициент сопротивления, учитывающий потери напора при истечении жидкости из отверстия.

Величина приведенного градиента скорости также может быть определена по формуле

$$G_V = \frac{\Delta \rho}{\zeta \cdot \rho} \cdot \frac{g}{V} = \varphi^2 \cdot \frac{g}{V}, \text{ с}^{-1}, \quad (42)$$

откуда

$$\varphi = \sqrt{\frac{G_V \cdot V}{g}} = \sqrt{\frac{a_V}{g}}. \quad (43)$$

На рис. 1 представлен график зависимости величины гидравлического сопротивления ζ в процессе всплывания в чистой воде сферического тела (А), пузырька воздуха (В) от значения критерия Рейнольдса Re .

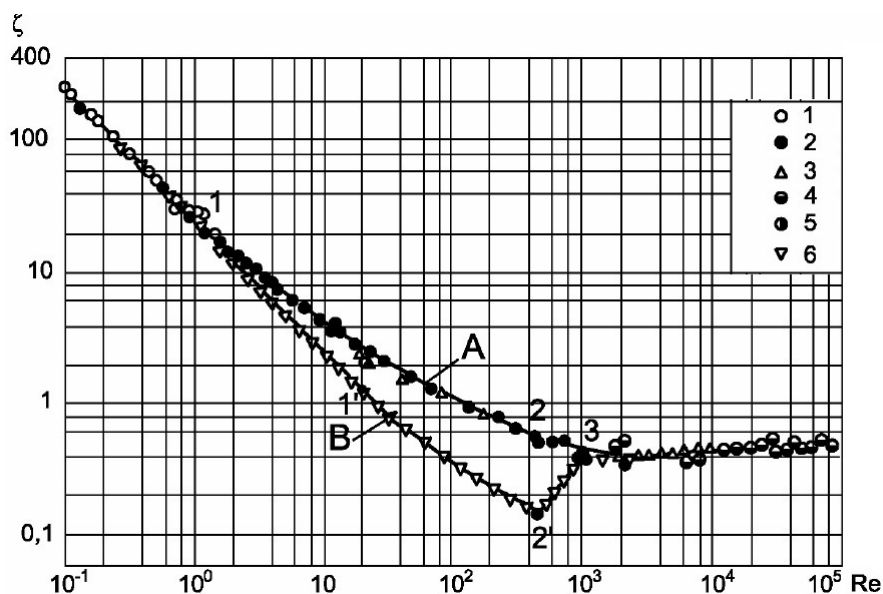


Рис. 1. График зависимости величины коэффициента гидравлического сопротивления ζ в процессе всплывания в чистой воде сферического тела (А), пузырька воздуха (В) от значения критерия Рейнольдса Re

По измерениям: 1 – Шиллера – Шмиделя; 2 – Либстера; 3 – Аллена; 4, 5 – Визельсбергера; 6 – Кутателадзе

График А – зависимость величины гидравлического сопротивления ζ в процессе всплывания сферического тела от значения критерия Рейнольдса Re – был приведен в работе Кутателадзе С.С. («Анализ подобия в теплофизике», 1982). График В – зависимость величины гидравлического сопротивления ζ в процессе всплывания в чистой воде пузырька воздуха от значения критерия Рейнольдса Re – был построен

нами в соответствии с данными, приведенными в работе Кутателадзе С.С. («Гидродинамика газожидкостных систем», 1976). На графиках, изображенных на рис. 1, нами были расставлены точки 1, 2, 3, выделяющие режимы всплывания твердого сферического тела, и точки 1', 2', 3 выделяющие режимы всплывания пузырька воздуха.

В процессе всплывания сферического тела и пузырька воздуха можно выделить следующие основные режимы:

- Режим вязкого обтекания набегающим на всплывающее тело ламинарным потоком неподвижной границы жидкой пленки, прилегающей к поверхности раздела фаз «твердая поверхность – вода» и «воздух – вода» (область ползущего течения), при котором действует закон Стокса

$$V = \frac{g \cdot d^2}{18 \cdot \nu} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (44)$$

и выполняется равенство

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}}. \quad (45)$$

Стоксовский режим всплывания сферического тела наблюдается левее точки 1 при числах Рейнольдса $\text{Re} \leq 1$. В работе Дерягина Б.В. («Кинематическая теория флотации малых частиц» // Успехи химии. 1982. №51) приводятся данные о том, что при всплывании пузырька воздуха в отличие от твердого сферического тела стоксовский режим сохраняется вплоть до значения критерия Рейнольдса $\text{Re} = 20$ (график В левее точки 1'). У пузырька воздуха отсутствует твердая поверхность, соприкасающаяся с проскальзывающей жидкой пленкой, в результате чего режим всплывания сохраняется при увеличении числа Рейнольдса более граничного значения $\text{Re} = 1$.

- Ламинарный режим всплывания сферического тела со скользящим пристеночным слоем (переходный режим) наблюдается между точками 1 и 2 (при числах Рейнольдса $\text{Re} = 1$ и $\text{Re} = 500$) при всплывании твердого тела и между точками 1', 2' (при числах Рейнольдса $\text{Re} = 20$ и $\text{Re} = 500$) при всплывании пузырька воздуха. При всплывании в этом режиме твердого сферического тела выполняется равенство

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\text{Re}^{1/3}}. \quad (46)$$

При всплывании пузырька воздуха выполняется равенство

$$\zeta = 7,488 \cdot \text{Re}^{-0,611}. \quad (47)$$

3. Турбулентный режим всплывания тела наблюдается между точками 2 и 3 при всплывании твердого тела и между точками 2' и 3 при всплывании пузырька воздуха (при числах Рейнольдса $\text{Re} = 500$ и $\text{Re} = 1100$). При всплывании в этом режиме твердого сферического тела выполняется равенство

$$\zeta = \frac{6,967}{\text{Re}^{0,408}}, \quad (48)$$

при всплывании в этом режиме пузырька воздуха –

$$\zeta = 2,01 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re}^{1,085}. \quad (49)$$

При всплывании в турбулентном режиме пузырька воздуха, в отличие от сферического тела, происходит его деформация. Сферическая форма сплющивается, и пузырек приобретает форму сфероида, в результате чего его скорость V при увеличении диаметра d уменьшается, а величина коэффициента гидравлического сопротивления ζ возрастает.

6. Турбулентный режим всплывания тела в области автомодельности закона сопротивления (в области развитой турбулентности) наблюдается правее точки 3 при числах Рейнольдса $\text{Re} > 1100$. В этом режиме при всплывании как твердого тела, так и пузырька воздуха коэффициент гидравлического сопротивления сохраняет свое постоянное значение $\zeta = 0,4 = \text{const}$. Процесс сплющивания пузырька воздуха в этом

режиме прекращается, и он сохраняет постоянное значение величины коэффициента формы $K_{\phi} = 2,63 = \text{const}$. Величина коэффициента дисперсности в этом режиме может быть определена по формуле

$$K_d = \frac{d^{0,5}}{0,0141} \cdot K_{\phi}. \quad (50)$$

На рис. 2 представлены графики зависимостей величин касательных напряжений силы вязкого трения τ_* , Н/м², на поверхности сферического тела (А) и пузырька воздуха (В), свободно всплывающих в чистой воде, от значений числа Рейнольдса Re .

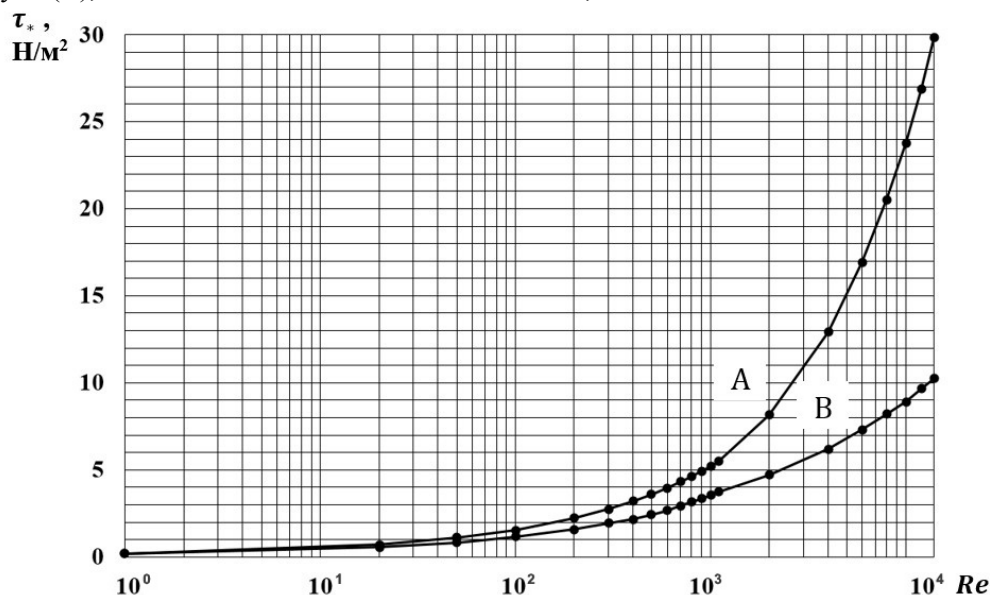


Рис. 2. Графики зависимости величин касательного напряжения силы вязкого трения τ_* , Н/м², на поверхности сферического тела (А) и пузырька воздуха (В), свободно всплывающих в чистой воде, от значения числа Рейнольдса Re

На рис. 3 изображены графики зависимостей величины гидродинамического давления набегающего потока жидкости ΔP , Па, на свободно всплывающее в чистой воде сферическое тело (А) и пузырек воздуха (В) от значений числа Рейнольдса Re .

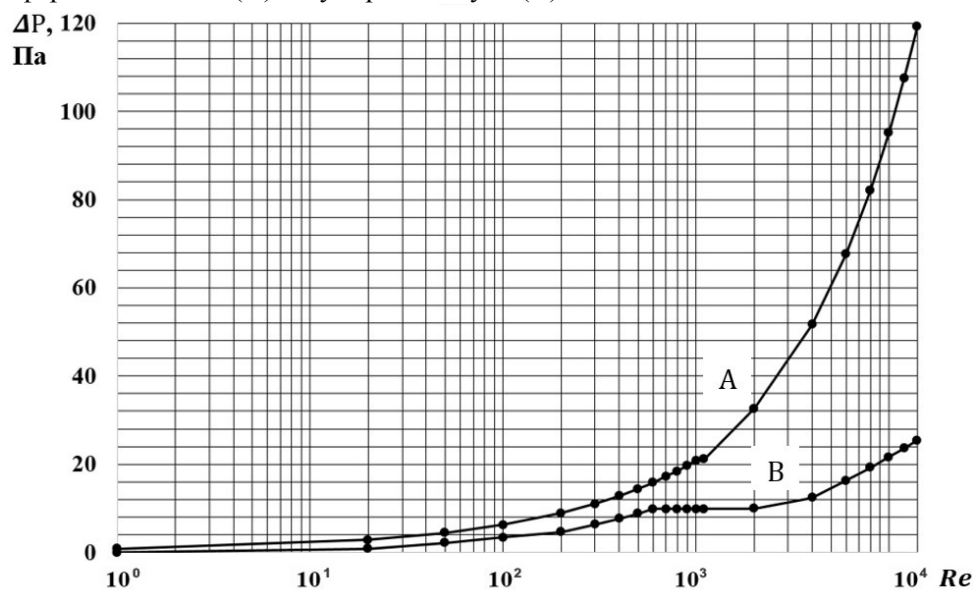


Рис. 3. Графики зависимости величин гидродинамического давления набегающего потока жидкости ΔP , Па, на свободно всплывающее в чистой воде сферическое тело (А) и пузырек воздуха (В) от значений числа Рейнольдса Re

Данные, представленные на графиках 2 и 3, свидетельствуют о том, что:

- изменение формы пузырька воздуха, всплывающего в турбулентном режиме, происходит при постоянной величине гидродинамического давления набегающего на него потока жидкости $\Delta P = 9,8$ Па (при постоянной величине давления воздуха внутри пузырька), при этом величина касательного напряжения силы вязкого трения на поверхности пузырька увеличивается со значения $\tau_* = 2,43$ Н/м² при $Re = 500$ до $\tau_* = 5,47$ Н/м² при $Re = 1100$;
- величины гидродинамического давления на твердое тело, всплывающее в турбулентном режиме, и касательного напряжения силы вязкого трения на его поверхности непрерывно увеличиваются со значений $\Delta P = 14,4$ Па и $\tau_* = 3,60$ Н/м² при $Re = 500$ до $\Delta P = 21,1$ Па и $\tau_* = 5,47$ Н/м² при $Re = 1100$.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование закономерностей всплывания пузырьков в динамических водовоздушных смесях, используемых в процессах флотационной очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Н.Н. Ласьков, М.И. Яхкинд // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №3. – С.176–185.
2. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water–Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – 95(1). – P. 230–239.
3. Рыбкин, К.А. Хаотическая динамика гравитационного дрейфа компактных тел в жидкостях и газах: автореф. дис. ... канд. физико-математических наук по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы / К.А. Рыбкин. – Пермь, 2013. – 16 с.
4. Козелков, А.С. Исследование особенностей всплывания пузырьков воздуха и твердых тел / А.С. Козелков, В.Г. Ефремов [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидродинамика. – 2018. – Т.11, №4. – С. 73–80.
5. Прандтль, Л. Гидродинамика / Л. Прандтль; пер. со второго немецкого издания Г.А. Вольперта. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.

References

1. Andreev, S.Yu. Mathematical modeling of the patterns of bubble popping in dynamic water-air mixtures used in the processes of flotation wastewater treatment / S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, N.N. Laskov, M.I. Yakhkind // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 3. – P.176–185.
2. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water–Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – 95(1). – P. 230–239.
3. Rybkin, K.A. Chaotic dynamics of gravitational drift of compact bodies in liquids and gases: Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of physical and mathematical sciences in the scientific specialty 01.02.05 – Mechanics of liquid, gas and plasma / K.A. Rybkin. – Perm, 2013. – 16 p.
4. Kozelkov, A.S. Investigation of the features of the surfacing of air bubbles and solids / A.S. Kozelkov, V.G. Efremov [et al.] // Fundamental and applied hydrodynamics. – 2018. – Vol.11, No. 4. – P. 73–80.
5. Prandtl, L. Hydrodynamics / L. Prandtl; Translated from the second German edition by G.A. Wolpert. – Izhevsk: SIC «Regular and chaotic dynamics», 2000. – 576 p.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2023_4_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

Андреев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Тюменский индустриальный университет

Россия, 625000, г.Тюмень,
ул.Володарского, 38,
тел./факс: +7 (3452) 28-36-60

Белова Лариса Владимировна,
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Начертательная геометрия и графика»,
доцент кафедры «Инженерные системы
и сооружения»
E-mail: beloalv@tyuiu.ru

Пензенский государственный университет

Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.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

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the Department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail:andreev3007@rambler.ru

Industrial University of Tyumen

Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel./fax: +7 (3452) 28-36-60

Belova Larisa Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Descriptive Geometry and
Graphics», Professor of the Department
«Engineering Systems and Structures»
E-mail: beloalv@tyuiu.ru

Penza State University

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ ЭРЛИФТНЫХ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский

Приведены результаты теоретических исследований процессов работы перемешивающих аэрационных систем аэротенков. Получено уравнение для определения скорости восходящего потока жидкости в газожидкостном потоке, образующемся над аэратором. Разработанное теоретическое уравнение, описывающее процесс работы перемешивающего эрлифтного устройства, позволит оптимизировать параметры функционирования пневматической системы аэрации.

Ключевые слова: эрлифтное устройство, динамический режим, статический режим, циркуляционный поток, коэффициент газонаполнения

A NEW METHOD FOR CALCULATING MIXING AIRLIFT DEVICES OPERATING IN DYNAMIC MODE

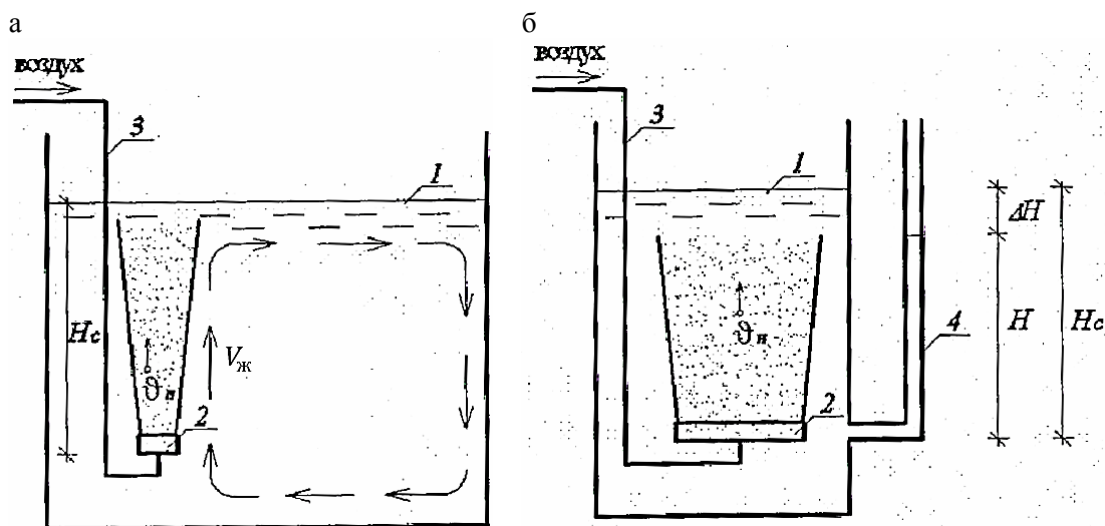
S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinsky

The results of theoretical studies of the processes of mixing aeration systems of aerotanks are presented. An equation for determining the velocity of the upward fluid flow in the gas-liquid flow formed above the aerator is obtained. The developed theoretical equation describing the process of operation of the mixing airlift device will optimize the parameters of the pneumatic aeration system functioning.

Keywords: airlift device, dynamic mode, static mode, circulation flow, gas filling coefficient

Сточные воды, отводимые с территории населенных пунктов и промышленных предприятий, как правило, обезвреживаются на станциях биологической очистки, где основными технологическими сооружениями являются аэротенки [1, 2]. Аэротенки представляют собой емкостные сооружения, оснащенные системой пневматической аэрации. Пневматическая система аэрации включает в себя ряд распределительных трубопроводов и воздухораспределительных устройств (аэраторов), которые расположены в определенном порядке в бассейне аэротенка и к которым под давлением подается сжатый воздух от нагнетательных устройств (вентиляторов, воздуходувок, компрессоров). Образующиеся на выходе с аэраторов пузырьки воздуха свободно всплывают в аэрационном бассейне аэротенка, в результате чего протекают процессы массопередачи кислорода воздуха из пузырьков в иловую смесь и осуществляется перемешивание иловой смеси за счет эрлифтного эффекта. Эрлифтный эффект, возникающий в процессе функционирования пневматической системы аэрации, обеспечивает поддержание величины циркуляционной скорости иловой смеси на уровне, достаточном для взвешивания хлопьев активного ила в аэрационном объеме аэротенка.

Система пневматической аэрации аэротенка представляет собой перемешивающее эрлифтное устройство, работающее в динамическом режиме (см. рисунок «а»).



Перемешивающие эрлифтные устройства:

а – работает в динамическом режиме; б – работает в статическом режиме;

1 – аэрационный объем; 2 – воздухораспределительное устройство (аэратор); 3 – воздуховод;
4 – пьезометр

В процессе функционирования пневматической системы аэрации (см. рисунок «а») выходящие из аэратора 2 пузырьки воздуха образуют над аэратором газожидкостный факел, называемый ядром струи. Вследствие разности плотностей иловой смеси в аэрационном объеме аэротенка и водовоздушной смеси, образующейся над аэратором, возникает восходящий поток. Внутренняя часть восходящего потока представляет собой всплывающую водовоздушную смесь, а внешняя часть потока состоит из жидкости, которая вовлекается (эжектируется) в движущееся ядро. Скорость движения газовой фазы (пузырьков воздуха) в ядре струи восходящего потока относительно стенок аэротенка $V_{я}$ равна сумме скорости движения жидкой части струи $V_{ж}$ и скорости всплывания пузырьков воздуха относительно движущейся жидкости $V_{п}$ ($V_{я} = V_{ж} + V_{п}$, м/с).

Ядро струи движется с максимальной скоростью и имеет форму конуса с углом раскрытия около $10...14^\circ$. В ядре струи сосредоточены практически все всплывающие пузырьки воздуха. Скорость движения ядра $V_{п}$ и всей увлекаемой им струи возрастает

с увеличением глубины погружения аэратора H_c . Величина скорости движения ядра эрлифтного потока $V_{я}$, м/с, в гораздо большей степени зависит от значения глубины погружения аэратора H_c , м, чем от величины расхода сжатого воздуха, подаваемого на аэратор, Q_a , м³/с.

В перемешивающем эрлифтном устройстве, работающем в статическом режиме, расстояние между стенками, ограничивающими аэрационный объем, имеет меньшую величину, чем диаметр факела пузырьков воздуха, поднимающегося с поверхности аэратора (см. рисунок «б»). В этом случае средняя скорость движения газовой фазы в аэрационном объеме равна средней скорости всплывания пузырьков воздуха. Жидкая фаза в перемешивающем эрлифтном устройстве, работающем в статическом режиме, является неподвижной средой, а пузыри воздуха всплывают относительно его стенок со средней скоростью $V_{п}$, м/с. В состоянии равновесия уровень столба водовоздушной смеси над аэратором в статическом режиме его работы установится на значении $H_c = H + \Delta H$, при этом уровень столба жидкости в пьезометре 4 будет иметь величину H .

В соответствии с законом распределения гидростатического давления в сообщающихся сосудах, давление столба воды H , м, имеющей плотность $\rho = 998,2$ кг/м³, будет уравниваться давлением столба водовоздушной смеси $H_c = H + \Delta H$, м, имеющей плотность ρ_c . Уровень водовоздушной смеси поднимается над уровнем столба воды на высоту ΔH , м.

Из равенства гидростатических давлений

$$H \cdot \rho \cdot g = (H + \Delta H) \cdot \rho_c \cdot g, \text{ Па}, \quad (1)$$

может быть определена высота подъема водовоздушной смеси

$$\Delta H = H \cdot \frac{\rho - \rho_c}{\rho_c}, \text{ м}. \quad (2)$$

Величина относительного объема воздуха в водовоздушной смеси характеризуется значением коэффициента газонаполнения

$$\varphi = \frac{W_B}{W_B + W_{ж}} = \frac{W_B}{W_c}, \quad (3)$$

где W_B , $W_{ж}$, W_c – объемы эрлифтной зоны, занимаемые соответственно воздухом, водой и водовоздушной смесью, м³.

С учетом $W_B = \Delta H \cdot \omega_3$; $W_{ж} = H \cdot \omega_3$; $W_c = H_c \cdot \omega_3$, м³, где ω_3 – площадь поперечного сечения эрлифтной зоны, м²; ΔH , H , H_c – соответственно, высота слоя воздуха, воды и водовоздушной смеси в эрлифтной зоне, м, можно записать

$$\varphi = \frac{\Delta H \cdot \omega_3}{H_c \cdot \omega_3} = \frac{\Delta H}{H_c} = \frac{\Delta H}{H + \Delta H}, \quad (4)$$

откуда

$$\Delta H = \varphi \cdot H + \varphi \cdot \Delta H \quad (5)$$

и

$$\Delta H = H \cdot \frac{\varphi}{1 - \varphi}. \quad (6)$$

Величина коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси φ и высота ее подъема ΔH над уровнем жидкости в эрлифтном устройстве, работающем в статическом режиме, определяются значением скорости подачи воздуха в эрлифтную зону I , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (значением интенсивности аэрации), которое равно отношению расхода воздуха, подаваемого в эрлифтную зону Q_B , $\text{м}^3/\text{с}$, к площади его поперечного сечения ω_3 , м^2 :

$$I = \frac{Q_B}{\omega_3}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (7)$$

В этом случае продолжительность пребывания газовой фазы в эрлифтной зоне над аэратором, работающем в статических условиях, определяется по формуле

$$t_B = \frac{W_B}{Q_B} = \frac{\varphi \cdot W_3}{I \cdot \omega_3} = \frac{\varphi \cdot H_c}{I} = \frac{\Delta H}{I}, \text{ с}. \quad (8)$$

Продолжительность пребывания газовой фазы в эрлифтной зоне в этом случае равна средней продолжительности процесса всплывания отдельного пузырька воздуха, движущегося со средней скоростью V_{Π} , $\text{м}/\text{с}$, в слое водовоздушной смеси H_c , м

$$t_B = \frac{H_c}{V_{\Pi}}, \text{ с}, \quad (9)$$

откуда

$$\frac{H_c}{V_{\Pi}} = \frac{\varphi \cdot H_c}{I}, \text{ с}, \quad (10)$$

и

$$\varphi = \frac{I}{V_{\Pi}}. \quad (11)$$

Формула (11) может быть использована для определения величины газонаполнения аэрационного объема φ над пневматическим аэратором, работающим в статическом режиме.

В системе пневматической аэрации, работающей в динамическом режиме, площадь, занимаемая водовоздушной смесью ω_c , м^2 , имеет существенно меньшее значение, чем площадь поперечного сечения аэрационного бассейна ω_a , м^2 .

Продолжительность пребывания газовой фазы в восходящем потоке водовоздушной смеси над аэратором (время пребывания пузырька воздуха в эрлифтной зоне аэрационного бассейна) в этом случае определится как

$$t_B = \frac{H_c}{V_{\Pi} + V_{ж}}, \text{ с}, \quad (12)$$

откуда с учетом (8) имеем

$$\frac{\varphi \cdot H_c}{I} = \frac{H_c}{V_{\Pi} + V_{ж}}, \text{ с}, \quad (13)$$

и

$$\varphi = \frac{I}{V_{\Pi} + V_{ж}}. \quad (14)$$

В работе (Брагинский Л.Н., Евилевич М.А. [и др.]. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод, 1980) приводится следующая эмпирическая зависимость величины скорости движения жидкости $V_{\text{ж}}$, м/с, в струе над аэратором от значения интенсивности аэрации I , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, и глубины погружения аэратора H , м:

$$V_{\text{ж}} = 0,4 \cdot I^{0,4} \cdot H^{1,4}, \quad \frac{\text{М}}{\text{с}}. \quad (15)$$

Эмпирические зависимости дают наиболее точные результаты в узких границах значений их параметров, соответствующих условиям проведения исходных экспериментов. Описать функционирование рассматриваемой технической системы в широком диапазоне изменений ее параметров может позволить теоретическая (детерминированная) математическая модель, вывод которой был проведен на основе анализа фундаментальных закономерностей, устанавливающих существенные, устойчивые и не случайные взаимосвязи между элементами, входящими в систему.

Движущая сила, обуславливающая процесс циркуляции жидкости, возникает вследствие разности гидростатических напоров в водовоздушном слое над аэратором и в слое перемешиваемой жидкости в объеме аэротенка ΔH , м. Величина разности гидростатических напоров ΔH (см. рисунок «б») может быть вычислена по формуле (6). Величина коэффициента газонаполнения φ в струе водовоздушного потока над аэратором, используемая в формуле (6), может быть определена по формуле (13).

Процесс всплывания водовоздушной смеси в аэрационном объеме аэротенка рассмотрим по аналогии с процессом истечения жидкости из малого отверстия площадью ω , м^2 , в тонкой стенке сосуда при постоянной величине гидростатического напора ΔH_{ω} , м. Величину средней скорости истечения жидкости из отверстия $V_{\text{ж}}$, м/с, найдем по формуле

$$V_{\text{ж}} = \varphi_{\omega} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H_{\omega}}, \quad \frac{\text{М}}{\text{с}}, \quad (16)$$

где φ_{ω} – коэффициент скорости истечения жидкости из отверстия,

$$\varphi_{\omega} = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta}}; \quad (17)$$

здесь ζ – коэффициент сопротивления, учитывающий потери напора при истечении жидкости из отверстия,

тогда

$$V_{\text{ж}} = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} = \frac{H}{H_a} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}, \quad \frac{\text{М}}{\text{с}}, \quad (18)$$

где $\varphi = \frac{H}{H_a}$ – коэффициент скорости движения водовоздушной смеси; H – глубина погружения аэратора, м; H_a – гидростатический напор, обусловленный действием атмосферного давления, м.

В первом приближении принимается величина гидростатического напора, обусловленного действием атмосферного давления, $H_a = 10$ м.

Расчет величины скорости движения жидкости в водовоздушной струе над аэратором $V_{\text{ж}}$ ведется методом последовательных приближений (итераций) с использованием формулы (18).

На первом шаге расчета в формуле (14) скорость движения жидкости принимается равной нулю. Скорость всплывания пузырьков воздуха диаметром $d_{\text{п}} = 4 - 6$ мм в

чистой воде принимается равной $V_{\text{п}} = 0,22$ м/с. Рассчитанное по формуле (14) значение коэффициента газонаполнения ϕ при величине $V_{\text{п}} = 0$ м/с подставляется в формулу (6), по которой определяется величина напора ΔH , м. Найденное значение ΔH , м, подставляется в формулу (18), и полученное значение $V_{\text{ж}}$, м/с, подставляется в формулу (14), затем расчет повторяется заново до тех пор, пока разность значений величин $V_{\text{ж}}$, получаемых на предыдущем и окончательном циклах расчета, не уменьшится до приемлемой величины.

В таблице приведены результаты вычислений скорости движения жидкости в водовоздушной струе над пневматическим аэратором, выполненные по формулам (15) и (18), при глубине погружения аэратора $H = 4,5$ м.

Результаты вычислений скорости движения жидкости в водовоздушной струе над аэратором $V_{\text{ж}}$, м/с, выполненных по формулам (15) и (18), при глубине погружения аэратора $H = 4,5$ м

Интенсивность аэрации в эрлифтной зоне I , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Скорость движения жидкости в водовоздушной струе, рассчитанная по формуле (15), $V_{\text{ж}1}$, м/с	Скорость движения жидкости в водовоздушной струе, рассчитанная по формуле (18), $V_{\text{ж}2}$, м/с	Относительная погрешность вычислений по формулам (15) и (18), Δ , %
0,002	0,274	0,270	1,46
0,004	0,361	0,354	1,94
0,006	0,424	0,413	2,59
0,008	0,476	0,461	3,15

Представленные в таблице данные позволяют сделать вывод о том, что относительная погрешность вычислений скорости движения жидкости в водовоздушной струе, выполненных по общеизвестной эмпирической формуле (15) и теоретической математической зависимости (18), не превышает 3,15 %, что вполне допустимо при инженерных расчетах.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации работы станций биологической очистки сточных вод с использованием перемешивающих эрлифтных устройств / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, И.А. Гарькина, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1. – С.90–98.
2. Андреев, С.Ю. Интенсификация процесса биологической очистки сточных вод за счет использования технологического приема гидравлического секционирования / С.Ю. Андреев, С.М. Салмин, К.В. Лебединский // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1. – С.137–147.
3. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water–Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – 95(1). – P. 230–239.

References

1. Andreev, S.Yu. New technology of intensification of the work of biological wastewater treatment plants using mixing airlift devices / S.Yu. Andreev, B.M. Grishin, I.A. Garkina, A.N. Koshev // Regional architecture and engineering. – 2012. – №1. – P.90–98.

2. Andreev, S.Yu. Intensification of the process of biological wastewater treatment through the use of technological reception of hydraulic partitioning / S.Yu. Andreev, S.M. Salmin, K.V. Lebedinskiy // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – № 1. – P.137–147.

3. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water–Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2022. – 95(1). – P. 230–239.

УДК 621.67:628.25

DOI 10.54734/20722958_2023_4_176

Калининградский государственный
технический университет

Россия, 236022, г. Калининград,
Советский пр., 1

Наумов Владимир Аркадьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Техносферная безопасность
и природообустройство»
E-mail: van-old@mail.ru

АО Институт «Заповодпроект»
Россия, 236010, г. Калининград,
пр. Мира, 136.

Шторк Александра Владимировна,
инженер
E-mail: shtorck.aleks21@yandex.ru

Kaliningrad State Technical University

Russia, 236022, Kaliningrad, 1, Sovetskiy Ave

Naumov Vladimir Arkad'evich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Technosphere Safety and
Environmental Engineering»
E-mail: van-old@mail.ru

Institute Zapvodproekt
Russia, 236010, Kaliningrad, 136, Mira Ave

Shtork Aleksandra Vladimirovna,
Engineer
E-mail: shtorck.aleks21@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ПОЛИЭТИЛЕНОВЫМИ ТРУБАМИ

В.А. Наумов, А.В. Шторк

Метод определения оптимального диаметра трубопровода d , ранее разработанный для локальной системы водоснабжения с учетом затрат на центробежный насос, усовершенствован применительно к полиэтиленовым трубам (ПЭТ). Коэффициент гидравлического сопротивления ПЭТ необходимо рассчитывать по формуле из свода правил с учетом зависимости шероховатости от диаметра. Показано, что производная от стоимости ПЭТ прямо пропорциональна первой степени d и не является константой, как принимается для стальных труб.

Ключевые слова: локальная система водоснабжения, полиэтиленовые трубы, оптимальный диаметр, центробежный секционный насос.

FEATURES OF DETERMINING THE OPTIMAL DIAMETER IN THE DESIGN OF WATER SUPPLY SYSTEMS WITH POLYETHYLENE PIPES

V.A. Naumov, A.V. Shtork

The method of determining the optimal diameter of the pipeline d , previously developed for a local water supply system taking into account the costs of a centrifugal pump, has been improved in relation to polyethylene pipes (PEP). The coefficient of hydraulic resistance of PEP must be calculated according to the formula from the Set of Rules, taking into account the dependence of roughness on diameter. It is shown that the derivative of the PEP cost is directly proportional to the first degree d and is not a constant, as is assumed for steel pipes.

Keywords: local water supply system, polyethylene pipes, optimal diameter, centrifugal sectional pump

Введение

Повышение энергетической и экономической эффективности – одна из актуальных проблем систем водоснабжения регионов России. Одной из таких проблем является определение оптимальных параметров при проектировании систем водоснабжения.

Расчет наиболее экономичного внутреннего диаметра трубопровода d – хорошо известная задача, которую можно найти во многих учебниках и учебных пособиях. Ее решение опирается на ставший уже классическим метод Дженеро.

Методом Дженеро решается задача поиска оптимального диаметра простого трубопровода (без ветвления). Этот метод использует две очевидные тенденции. Первая – увеличение внутреннего диаметра трубопровода d приводит к росту капитальных затрат из-за повышения материалоемкости. Вторая – чем больше значение d , тем меньше гидравлические потери давления в трубопроводе, значит, будут ниже эксплуатационные затраты на электроэнергию насоса.

В ряде современных исследований рассматриваются частные случаи оптимизационной задачи либо принимаются во внимание ранее не учитываемые факторы. Так, в статье [1] показано, что в квадратичной (автомодельной) области гидравлического сопротивления можно упростить уравнение Дженеро и найти его аналитическое решение. В [2] представлено сравнение расчетов оптимального диаметра трубопровода в трех областях гидравлического сопротивления: при ламинарном течении сильновязкой жидкости – линейная область сопротивления, при турбулентном режиме течения – квадратичная и переходная области сопротивления. При этом капитальные затраты на создание трубопровода были явно занижены, поэтому были получены завышенные значения диаметра трубопровода.

Другое важное направление исследований – обобщение метода Дженеро на поиск оптимального диаметра и структуры сложных трубопроводных сетей с ветвлением. Так, в [3] была рассмотрена проблема оптимизации реконструкции сетей и сооружений систем водоснабжения в условиях сокращающегося водопотребления. Авторы утверждают, что предложенная ими методика позволит выявить и вывести из эксплуатации неэффективные участки сети, улучшить скоростной режим оставшихся участков, повысить КПД насосных станций. При этом рассматриваются только эксплуатационные затраты, без учета затрат на реконструкцию.

В [4] был учтен целый ряд параметров трубопровода, влияющих на выбор оптимального процесса. Это одна из немногих работ, где предпринята попытка выразить инвестиции в насосную станцию как функцию гидравлического сопротивления сети. В связи с этим получилась весьма громоздкая постановка задачи, для решения которой автор использовал несколько модифицированное динамическое программирование.

В [1-3] совершенно не учитывается необходимость замены насоса при вариации диаметра трубопровода и изменении требуемой мощности. Эта задача была решена в [5]. Был разработан метод определения оптимального диаметра трубопровода с учетом изменения стоимости потребного насоса. Заметим, что работы [1-5] посвящены решению оптимизационных задач для стального трубопровода. Тогда как большинство современных проектов систем водоснабжения предусматривает использование труб из полимерных материалов, в частности полиэтиленовых труб (ПЭТ).

Цель исследований – усовершенствовать применительно к ПЭТ ранее разработанный метод определения оптимального диаметра трубопровода с учетом затрат на центробежный насос.

Материалы и методы

Как известно, затраты на изготовление и эксплуатацию технологического трубопровода можно представить следующим образом [1-5]:

$$C = C_K + C_E = (C_{B0} + \psi(d)) + (C_{E0} + \varphi(d)), \quad (1)$$

где C_K – капитальные затраты, отнесенные к одному году (тыс. руб.); C_{K0} – часть капитальных затрат, не зависящая от диаметра трубопровода; C_E – годовые эксплуатационные затраты (тыс. руб.); C_{E0} – часть эксплуатационных затрат, не зависящая от диаметра трубопровода.

Чтобы найти оптимальный диаметр трубопровода, производную (1) приравнивают к нулю и получают уравнение

$$\psi'(d) + \varphi''(d) = 0. \quad (2)$$

Эксплуатационные затраты, зависящие от диаметра трубопровода, во всех ранее указанных публикациях рассчитываются по формуле Дженеро:

$$\varphi(d) = z \cdot A_E = z \cdot N_E \cdot T = z \cdot N_U \cdot T / (\eta_E \cdot \eta_P), \quad (3)$$

где z – стоимость электроэнергии (тыс. руб./кВт·ч); A_E – работа (кВт·ч), затраченная электродвигателем насоса за время T (ч); N_E – затраченная мощность электродвигателя (кВт); N_U – полезная (гидравлическая) мощность насоса (кВт); η_E , η_P – КПД электродвигателя и насоса, соответственно.

Гидравлическая мощность насоса рассчитывается по известной формуле:

$$N_U = \rho g Q H_P \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где ρ – плотность воды (кг/м³); g – ускорение свободного падения (м/с²); Q – подача насоса (м³/с); H_P – напор насоса (м).

Вместо напора насоса в формуле (4) используют характеристику трубопровода в рабочей точке установки ($H_T = H_P$). Запишем формулу для $I = H_T/L$:

$$I = f(d, Q) = H_C/L + f_1(d, Q), f_1(d, Q) \approx 8,8 \cdot \lambda \cdot Q^2 / (\pi^2 d^5 g), \quad (5)$$

где H_C – статический напор (м); L – длина трубопровода (м); λ – коэффициент гидравлических потерь на трение по длине трубопровода (КПП) увеличен на 10 %, чтобы приближенно учесть потери напора в местных сопротивлениях.

Одна из особенностей расчета – определение КПП ПЭТ. В российских нормативных документах¹ для расчета КПП по длине пластмассовых труб рекомендована формула, которую после упрощения можно записать следующим образом:

$$\lambda = \left(\frac{0,25 \cdot b}{\lg(3,7/\delta)} + \frac{0,656 \cdot (2-b)}{\lg \text{Re} - 1} \right)^2, \quad b = 1 + \frac{\lg \text{Re}}{\lg \text{Re}_{\text{кв}}}, \quad \text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (6)$$

где b – число подобия режимов течения (при $b > 2$ следует принимать $b = 2$); $\text{Re} = Vd/\nu$ – текущее число Рейнольдса; V – скорость воды (м/с); ν – коэффициент кинематической вязкости воды (м²/с); $\delta = \Delta/d$ – относительная шероховатость ПЭТ; Δ – абсолютная эквивалентная шероховатость ПЭТ (АЭШ); $\text{Re}_{\text{кв}} = 500/\delta$ – число Рейнольдса начала квадратичной области гидравлического сопротивления.

В указанном выше Своде правил для ПЭТ рекомендовано принять $\Delta = 0,014$ мм, но допускается применять другие методики расчета при должном обосновании. Профессор О.А. Продоус обобщил большое количество результатов натурных исследований и установил эмпирическую зависимость между АЭШ и основным высотным параметром физической шероховатости [6]. В [7] были представлены экспериментальные данные, показывающие возрастание АЭШ с увеличением диаметра ПЭТ. Зависимость АЭШ ПЭТ от d по всему диапазону диаметров выпускаемых труб получается нелинейной. В данной статье будем рассматривать ПЭТ с наружным диаметром до 400 мм. По ГОСТ² при максимальном рабочем давлении (МРД) 1,0 МПа (PN10) толщина стенки такой трубы должна быть $29,4 \pm 4,5$, т.е. внутренний диаметр ПЭТ будет примерно 340 мм. По рис. 1 видно, что в указанном диапазоне связь d – Δ хорошо аппроксимируется линейной зависимостью: $\Delta = 8,09 \cdot 10^{-5} \cdot d$. Значит, относительную шероховатость малых и средних ПЭТ можно считать постоянной $\delta \approx 8,09 \cdot 10^{-5}$.

В [5] представлена полученная производная функции $f(d, Q)$ по d в явном виде. Применение для расчета λ формулы (6) не позволяет получить здесь подобное выражение для последующего использования. Поэтому в данной статье производная функции $f(d, Q_0)$ при заданном расходе $Q = Q_0$ находилась численным методом. Заметим, что указанная производная будет отрицательной.

¹ Свод правил СП 399.1325800.2018. Системы наружного водоснабжения и водоотведения из полимерных материалов. Правила проектирования и монтажа. Издание официальное. М.: Стандартинформ, 2019. 90 с.

² ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. Издание официальное. М.: Стандартинформ, 2008. 76 с.

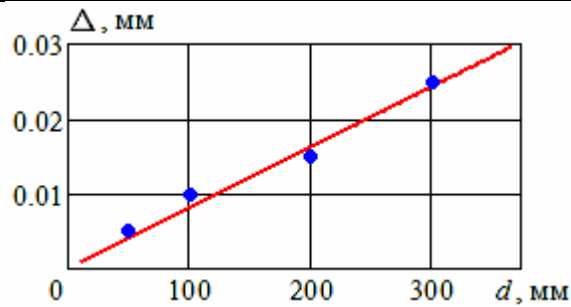


Рис. 1. Связь между АЭШ и диаметром малых и средних ПЭТ.
Точки – экспериментальные данные [7], прямая – линейная аппроксимация

Второе слагаемое в уравнении (2):

$$\varphi'(d) = f'(d, Q_0) \cdot L \cdot z \cdot \rho \cdot g \cdot Q_0 \cdot 10^{-3} \cdot T / (\eta_E \cdot \eta_P). \quad (7)$$

В [5] было показано, что первый член в уравнении (2) включает два слагаемых: первое, традиционное, – зависимость стоимости трубопровода от его внутреннего диаметра; второе, дополнительное, – зависимость стоимости насоса от d .

Зависимость стоимости ПЭТ от их диаметра $cd = \Theta(d)$ – вторая важная особенность расчета. В работах [1-5] для стальных труб зависимость $\Theta(d)$ принималась линейной (производная – константа). Наш анализ прайс-листов нескольких российских компаний показал для ПЭТ иную картину.

Данные прайс-листов приводят стоимость одного кг ПЭТ в зависимости от внешнего диаметра при различных значениях МРД. Для решения задачи оптимизации требуется получить зависимость стоимости ПЭТ от внутреннего диаметра d . По ГОСТ²:

$$d = D - 2s = D - 2D/SDR, \quad (8)$$

где D – номинальный внешний диаметр ПЭТ (мм); s – номинальная толщина стенки ПЭТ (мм); SDR – стандартное размерное отношение, заданное в зависимости от МРД.

Из (8) выразим внешний диаметр ПЭТ:

$$D = d \cdot SDR / (SDR - 2). \quad (9)$$

Масса одного метра ПЭТ

$$m = 0,25 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot \rho, \quad (10)$$

где ρ – плотность материала ПЭТ.

Подставив (10) в (9), получим зависимость стоимости одного метра ПЭТ от внутреннего диаметра:

$$cd = \Theta(d) = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (SDR^2 / (SDR - 2)^2 - 1) \cdot \rho \cdot cm, \quad (11)$$

где cm – стоимость одного кг ПЭТ. Например, у группы компаний «Промбаза»³ для ПЭТ с внешним диаметром более 110 мм $cm = 189$ руб./кг.

На рис. 2 представлена зависимость от внутреннего диаметра стоимости ПЭТ при разных значениях МРД по прайс-листу³ на май 2023 года. Результаты расчета хорошо согласуются с данными прайс-листа. Данные других компаний по сравнению с компанией «Промбаза» несколько отличаются количественно, но формула (11) остается справедливой.

Производная (11) прямо пропорциональна диаметру d :

$$\Theta'(d) = 0,5 \cdot \pi \cdot d \cdot (SDR^2 / (SDR - 2)^2 - 1) \cdot \rho \cdot cm. \quad (12)$$

³ Группа компаний «Промбаза». Прайс-листы. URL: <http://www.prombase.ru/prices> (дата обращения: 30.05.2023).

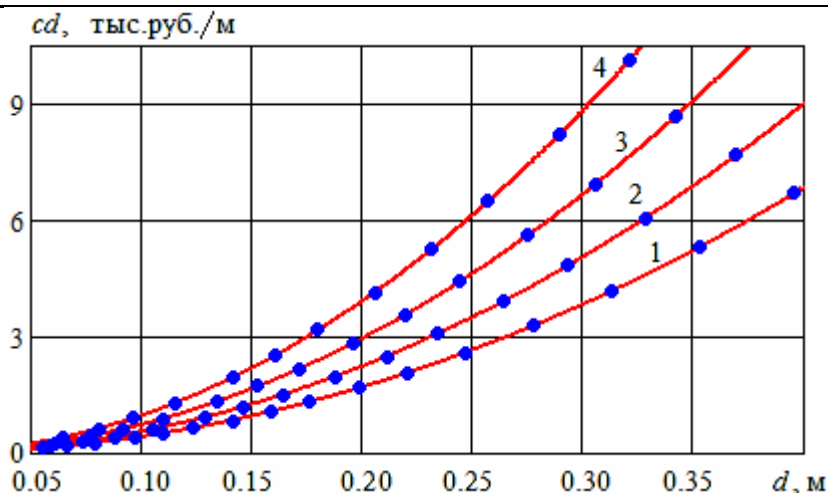


Рис. 2. Зависимость стоимости метра ПЭТ от их внутреннего диаметра при разных значениях МРД:

1 – PN10; 2 – PN12,5; 3 – PN16; 4 – PN20.

Точки – по прайс-листу «Промбазы»³, линии – расчет по формуле (11)

Стоимость насоса C_p при заданной подаче Q_0 будет возрастать с увеличением необходимого напора H_p . Производную от этой стоимости по диаметру d найдем следующим образом:

$$C_p'(d) = C_p'(H_p) \cdot H_p'(d). \quad (13)$$

Заменив в (13) H_p на H_T , получим:

$$C_p'(d) = C_p'(H_p) \cdot f'(d, Q_0) \cdot L. \quad (14)$$

Подставив полученные выражения в (2), запишем уравнение для расчета оптимального диаметра d_x :

$$K_1 \Theta'(d_x) + f'(d_x) (K_2 \cdot C_p'(d_x) + \gamma) = 0, \quad (15)$$

$$\gamma = z \rho g Q_0 \cdot 10^{-3} T / (\eta_E \cdot \eta_P),$$

где K_1 , K_2 – коэффициенты приведения капитальных затрат к одному году. Заметим, что в уравнении (15) каждое слагаемое разделено на L . То есть при такой постановке задачи d_x не зависит от длины трубопровода.

Результаты и обсуждение

Будем искать оптимальный диаметр системы локального водоснабжения, предназначенной для расхода воды $Q_0 = 60 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,0167 \text{ м}^3/\text{с}$. Для этой величины Q_0 и относительной шероховатости ПЭТ $\delta_0 = 8,09 \cdot 10^{-5}$ рассчитаны гидравлический уклон $f_1(d)$ и производная от него (рис. 3). Функция $f_1(d)$ является убывающей, производная от нее – отрицательная.

Для решения задачи оптимизации необходимо конкретизировать зависимость стоимости насосов от напора при фиксированной подаче. В качестве примера рассмотрим линейку центробежных многосекционных насосов ЦНС-60. Эти насосы выпускаются несколькими российскими заводами. Они имеют одинаковую номинальную подачу ($60 \text{ м}^3/\text{ч}$) при максимальном КПД ($\eta_H = 0,7$), но разный номинальный напор H_p , в зависимости от количества секций. На рис. 4 показано, как стоимость насосов этой серии зависит от напора по прайс-листу Китайского насосного завода⁴. Видно, что функцию $C_p(H_p)$ можно считать линейной, причем в рассматриваемом случае $C_p'(H_p) = 1,017 \text{ тыс.руб./м} = \text{const}$.

⁴ Китайский насосный завод. Насосы типа «ЦНС». URL: https://knz.ru/wp-content/uploads/CNS_1.pdf (дата обращения: 23.02.2023).

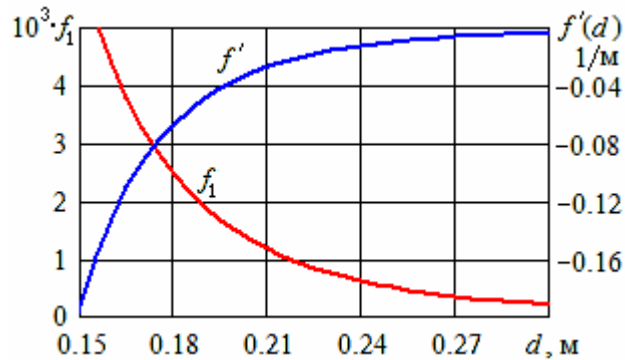


Рис. 3. Зависимость гидравлического уклона и производной от внутреннего диаметра

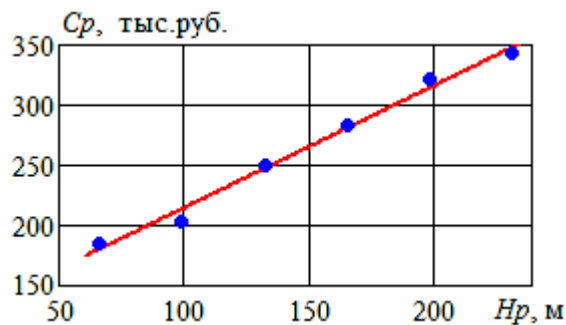


Рис. 4. Зависимость стоимости насосов ЦНС-60 от напора. Точки – по прайс-листу Китайского насосного завода, прямая – линейная аппроксимация

При рассматриваемых условиях для ПЭТ PN10 по формуле (12)

$$\Theta'(d) = 85,444 \cdot d. \quad (16)$$

После подстановки значения $C_p'(H_p)$ и формулы (16) в (15) уравнение может быть решено численным методом относительно d_x . При этом нужно задать значения коэффициентов K_1, K_2 . Так, в статье [4] они были приняты, как в нормативных документах ($K_1 = 0,05; K_2 = 0,09$). Но частный инвестор может назначить иные значения.

Численные исследования показали, что оптимальный диаметр ПЭТ d_x в наибольшей степени зависит от K_1 и тарифа на электроэнергию z . Этот тариф существенно различается по регионам России. По данным компаний⁵, тарифы на электроэнергию для малых предприятий в апреле 2023 года находились в диапазоне от 4,484 (ООО «Иркутскэнерго») до 10,546 руб./(кВт·ч) (ООО «РКС-энерго», Ленинградская область).

По рис. 5 видно, как с увеличением z растет и оптимальный диаметр ПЭТ d_x , так как возрастает вклад эксплуатационных затрат. Увеличение же K_1 приводит к росту значимости капитальных затрат, поэтому оптимальный диаметр уменьшается.

После определения d_x нужно найти ПЭТ, выпускаемые с подходящим внутренним диаметром d_n . Например, для $K_1 = 0,1$ и $z = 4,5$ руб./(кВт·ч) (как в Иркутске) получим $d_x = 0,158$ м. Ближайший внутренний диаметр у выпускаемых в России ПЭТ PN10 с номинальным внешним диаметром $D = 180$ мм составляет: $d_n = 0,159$ м.

После определения D и d_n можно найти, какой потребуется напор насоса. Если статический напор, включая необходимый свободный напор, $H_C = 60$ м, длина трубопровода $L = 1300$ м, то по формуле (5):

$$H_p = H_T = H_C + f_1(d_n, Q_0) \cdot L = 65,6 \text{ м.}$$

⁵ Тарифы на электроэнергию для малых предприятий. URL: <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dla-malih-predpriyatiy-i-ip> (дата обращения: 06.06.2023).

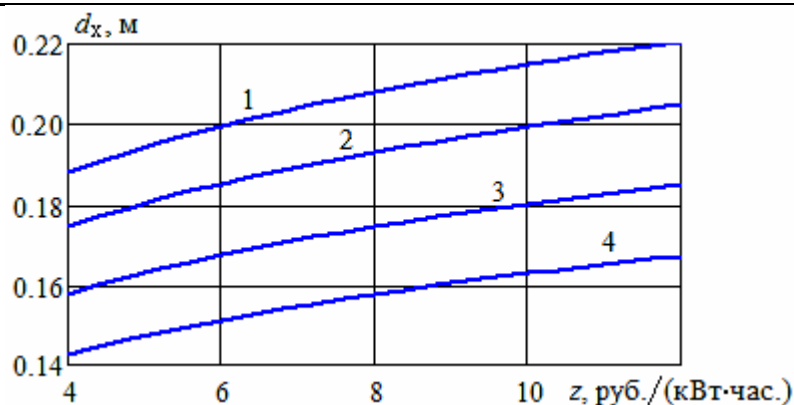


Рис. 5. Результаты расчета оптимального диаметра трубопровода при $K_2=0,09$ и значениях K_1 :
 $1 - K_1 = 0,03$; $2 - K_1 = 0,05$; $3 - K_1 = 0,1$; $4 - K_1 = 0,2$

Откуда из линейки ЦНС-60 следует выбрать насос с номинальным напором $H_N = 66$ м. Если ближайшее значение H_N заметно выше H_p , то производители (как российские, так и зарубежные) предлагают многосекционные насосы с одним или несколькими рабочими колесами уменьшенного диаметра. Так что проблем с подбором насоса с потребным напором не возникнет.

Заключение

Таким образом, ранее разработанный метод определения оптимального диаметра трубопровода для локальной системы водоснабжения с учетом затрат на центробежный насос [4] усовершенствован применительно к ПЭТ. Основные особенности усовершенствованного метода:

1. При формировании характеристики трубопровода коэффициент гидравлического сопротивления ПЭТ рассчитывается по формуле из Свода правил с учетом зависимости АЭШ от диаметра.
2. Стоимость одного метра ПЭТ прямо пропорциональна квадрату внутреннего диаметра. Производная от нее – первой степени d и не является константой, как принимается для стальных труб.
3. Производная стоимости насоса находится как произведение двух производных по формуле (14).
4. В рассматриваемой постановке задачи при учете стоимости насоса оптимальный диаметр не зависит от длины трубопровода.

Численные исследования показали, что оптимальный диаметр ПЭТ в наибольшей степени зависит от K_1 и тарифа на электроэнергию z . Этот тариф для малых предприятий различается по регионам России более чем в 2 раза (данные за апрель 2023 года). Увеличение эксплуатационных расходов из-за роста тарифов на электроэнергию приводит к заметному возрастанию величины оптимального диаметра трубопровода, что необходимо учитывать в проектных расчетах.

Список литературы

1. Genic, S. Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence / S. Genic, B. Jacimovic, V. Genić // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 45. – P. 335–338.
2. Оптимизация технологических параметров и диаметра трубопровода с учетом энерго- и ресурсосбережения / А.Б. Голованчиков, Т.А. Дулькин, Н.А. Прохоренко, Н.А. Меренцов // Вестник ТГТУ. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 91–99.
3. Чупин, В.Р. Оптимальная реконструкция сетей и сооружений систем водоснабжения в условиях сокращающегося водопотребления // В.Р. Чупин, И.В. Майзель // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – № 8(4). – С. 182–192.

4. Chu, F.-X. Optimal diameter selection of products pipeline based on dynamic programming / F.-X. Chu // *Journal of China University of Petroleum*. – 2006. – Vol. 30. – P. 90–96.
5. Наумов, В.А. Определение оптимального диаметра трубопровода локальной системы водоснабжения с учетом нагрузочных характеристик и затрат на центробежный насос / В.А. Наумов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2022. – № 2(47). – С. 153–160.
6. Продоус, О.А. Сравнительная оценка величин потерь напора для обоснования выбора материала труб из разных полимерных материалов / О.А. Продоус, Л.Д. Терехов // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. – 2018. – № 9. – С. 44–48.
7. Швабауэр, В.В. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс / В.В. Швабауэр, И.В. Гвоздев, М.И. Гориловский // *Полимерные трубы*. – 2005. – № 1. – С. 36–40.

References

1. Genic, S. Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence / S. Genic, B. Jacimovic, V. Genić // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 45. – P. 335–338.
2. Optimization of process parameters and the diameter of the pipeline taking into account energy and resource / A.B. Golovanchikov, T.A. Dulkin, N.A. Prokhorenko, N.A. Merentsov // *Vestnik TGTU*. – 2020. – Vol. 26, No. 1. – P. 91–99.
3. Chupin, V.R. Optimal reconstruction of networks and structures of water supply systems in conditions of declining water consumption / V.R. Chupin, I.V. Maisel // *Izvestiya vuzov. Investment. Construction. Realty*. – 2018. – No. 8(4). – P. 182–192.
4. Chu, F.-X. Optimal diameter selection of products pipeline based on dynamic programming / F.-X. Chu // *Journal of China University of Petroleum*. – 2006. – Vol. 30. – P. 90–96.
5. Naumov, V.A. Determination of the optimal diameter of the pipeline of a local water supply system taking into account the load characteristics and costs of a centrifugal pump / V.A. Naumov // *Regional architecture and engineering*. – 2022. – No. 2(47). – P. 153–160.
6. Prodous, O.A. Comparative assessment of pressure loss values to justify the choice of pipe material from different polymer materials / O.A. Prodous, L.D. Terekhov // *Water treatment. Water treatment. Water supply*. – 2018. – No. 9. – P. 44–48.
7. Shvabauer, V.V. Calculation of hydraulic pressure losses in a pipeline made of plastics / V.V. Shvabauer, I.V. Gvozdev, M.I. Gorilovsky // *Polymer pipes*. – 2005. – No. 1. – P. 36–40.

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

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Фильчакина Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: filchakina80@mail.ru

Мишин Андрей Алексеевич,
магистрант
E-mail: an.mishin299@gmail.com

Фильчакин Никита Сергеевич,
магистрант
E-mail: filchakin00@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

Eremkin Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Filchakina Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
Department «Heat, Gas Supply and
Ventilation»
E-mail: filchakina80@mail.ru

Mishin Andrey Alekseevich,
Master Student
E-mail: an.mishin299@gmail.com

Filchakin Nikita Sergeevich,
Master Student
E-mail: filchakin00@gmail.com

НИЗКОСКОРОСТНОЙ ПЛАСТИНЧАТЫЙ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬ ДЛЯ ПОДАЧИ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА В НИЖНЮЮ ЗОНУ ПОМЕЩЕНИЙ С ТЕПЛОИЗБЫТКАМИ

А.И. Еремкин, И.Н. Фильчакина, А.А. Мишин, Н.С. Фильчакин

Предложена конструкция низкоскоростного пластинчатого воздухораспределителя для подачи приточного воздуха с малыми скоростями непосредственно в нижнюю зону помещения с теплоизбытками способом вытесняющей вентиляции на примере зрительного зала. Представлены эпюры поля скоростей результирующего потока динамически неустойчивой приточной струи воздуха. Скорость истечения в нижнюю зону помещения составила 0,2 – 0,5 м/с, что обеспечивает комфортные условия.

Ключевые слова: вытесняющая вентиляция, помещения с теплоизбытками, зрительный зал, эффект соударения встречных струй, статическая камера, воздухораспределитель, термоанемометр, скорость воздушного потока, эпюры поля скоростей

LOW SPEED PLATE AIR DISTRIBUTOR FOR SUPPLYING INCOMING AIR TO THE LOWER ZONE OF ROOMS WITH EXCESS HEAT

A.I. Eremkin, I.N. Filchakina, A.A. Mishin, N.S. Filchakin

A design of a low-speed plate air distributor is proposed for supplying air at low speeds directly to the lower zone of a room with excess heat using the method of displacement ventilation on the example of an auditorium. The diagrams of the velocity field of the resulting flow of a dynamically unstable supply air stream are presented. The outflow velocity into the lower zone of the room was 0,2 – 0,5 m/s, providing comfortable conditions.

Keywords: displacement ventilation, rooms with excess heat, auditorium, effect of collision of oncoming jets, static chamber, air distributor, hot-wire anemometer, air flow velocity, velocity field diagrams

В системах вентиляции и кондиционирования воздуха помещений с теплоизбытками (зрительные, киноконцертные залы; залы театров и опер, дворцов спорта и т. д.) актуальной задачей является применение воздухораспределительных устройств (ВРУ)

равномерной подачи воздуха в нижнюю зону помещения с малыми скоростями (0,2-0,5 м/с), что необходимо для обеспечения комфортных условий микроклимата.

В практике проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха помещений с теплоизбытками чаще применяется общеобменная вентиляция перемешивающего типа и в меньшей степени вытесняющая [1...5].

Для помещений с массовым пребыванием людей характерны высокие требования к микроклимату. Человек, находясь в помещении с теплоизбытками, испытывает дискомфорт, для устранения которого необходимо осуществлять подачу приточного воздуха с требуемыми параметрами температуры и скорости. В помещении киноконцертного зала, зрители находятся в состоянии покоя (отдыха) и выделяют полное (явное) количество тепла в количестве примерно 72 Вт. Требуемый расход приточного воздуха на одного зрителя, согласно рекомендациям [1], рекомендуется принимать равным 30-40 м³/ч.

Вопросом организации воздухообмена вытесняющей вентиляцией занимались многие отечественные и зарубежные ученые, такие, как А.А. Волков, А.Л. Наумов, Х. Скистад и др. [1...5], которые считают, что для организации воздухообмена помещений с теплоизбытками система вытесняющей вентиляции со схемой воздухообмена «снизу вверх» более эффективна в сравнении с общеобменной вентиляцией перемешивающего типа со схемой подачи воздуха «сверху вниз».

Учитывая, что в системе вытесняющей вентиляции приточный воздух подается непосредственно в обслуживаемую зону помещения, необходимо использовать воздухораспределительные устройства, которые смогут обеспечить выход приточной струи с допустимой скоростью [6, 7].

Авторами предложена организация воздухообмена по принципу вытесняющей вентиляции со схемой подачи приточного воздуха «снизу вверх» в зрительном зале существующего здания ККЗ «ПЕНЗА» в г. Пензе. Помещение, расположенное под зрительным залом, предлагается рассматривать как «статическую камеру», откуда приточный воздух через отверстия в полу под креслами поступает в зал (рис. 1, б).

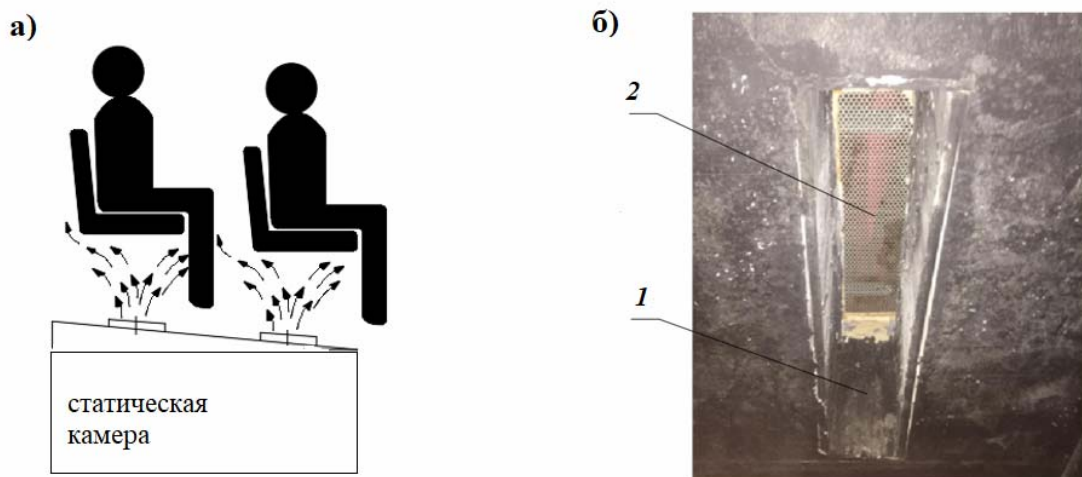


Рис. 1. Подача приточного воздуха в зрительном зале ККЗ «ПЕНЗА»:

а – вид из зала; б – вид из «статической камеры»:

1 – отверстие в полу под воздухораспределитель;

2 – воздухораспределительная решетка под креслом

При разработке воздухораспределительного устройства для подачи больших объемов приточного воздуха с малыми скоростями непосредственно в нижнюю зону помещения применяют эффект соударения встречных приточных струй. В результате достигается значительное гашение скорости и энергии суммарного результирующего потока воздуха [7].

Для обеспечения на выходе допустимой скорости приточной струи авторами предложена конструкция нового низкоскоростного пластинчатого воздухораспределителя, который можно использовать при организации воздухообмена в зрительном зале для подачи приточного воздуха под кресла (рис. 2, а).

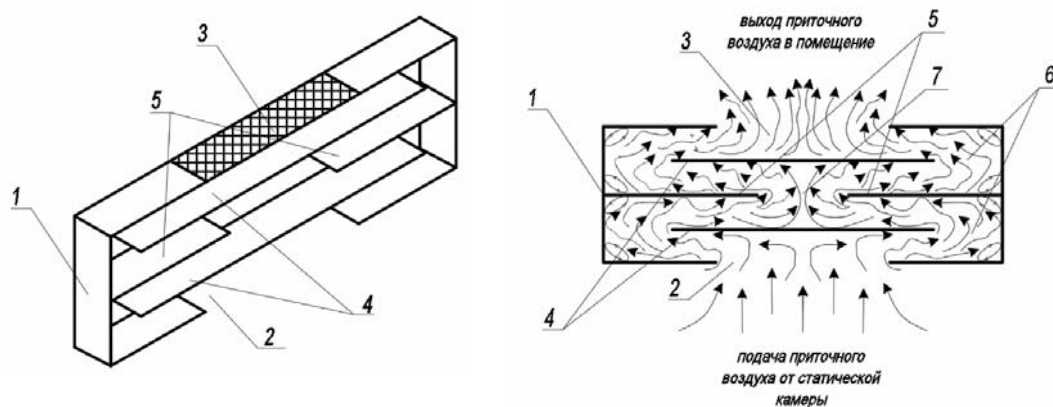


Рис. 2. Низкоскоростной пластинчатый воздухоораспределитель:

1 – корпус воздухоораспределителя; 2 – входное отверстие воздухоораспределителя; 3 – выходное отверстие воздухоораспределителя с защитной сеткой; 4, 5 – пластины; 6, 7 – щели

Предлагаемая авторами конструкция низкоскоростного пластинчатого воздухоораспределителя (рис. 2) состоит из прямоугольного корпуса 1 с отверстиями для входа 2 и выхода 3 воздуха, которые находятся в нижней и верхней частях корпуса соответственно. Воздухоораспределитель содержит три ряда прямоугольных направляющих пластин 4, расположенных параллельно горизонтальной плоскости и смещенных друг относительно друга по высоте, причем верхний и нижний ряды представлены сплошной пластиной 4 симметрично вертикальной центральной оси корпуса. Между верхней и нижней пластинами и стенкой корпуса образуется щель 6. Средний ряд состоит из двух пластин 5, отнесенных от вертикальной оси корпуса в противоположные стороны до упора в боковую стенку корпуса конструкции ВРУ, между которыми имеется щель 7.

Благодаря конструкции предлагаемого воздухоораспределителя достигаются необходимое перемешивание приточного и внутреннего воздуха и гашение скорости за счет многократных соударений воздушных потоков внутри самой конструкции и на выходе из неё. Принцип работы нового воздухоораспределителя основан на физических свойствах соударяющихся струй воздуха, что позволяет обеспечить равномерную подачу приточного воздуха с допустимой по нормативам скоростью (0,2-0,5 м/с) в рабочую зону зрительного зала. Далее под действием конвективных потоков нагретый воздух направляется в верхнюю зону помещения к местам удаления [7].

К достоинствам предлагаемого воздухоораспределителя (см. рис. 2) следует отнести:

- простоту конструкции и удобство монтажа;
- низкую стоимость изготовления и монтажа;
- универсальность применения для помещений с теплоизбытками;
- необходимые акустические показатели.

Конструкция низкоскоростного воздухоораспределителя исследована в лабораторных условиях на экспериментальном стенде в лаборатории кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Пензенского ГУАС (рис. 3).

На стенде проведены экспериментальные исследования разработанного пластинчатого воздухоораспределителя с внутренними конструктивными размерами корпуса: длина $l = 44$ см, ширина $s = 9,3$ см и высота $h = 15$ см (рис. 4, в). Размеры корпуса приняты с учетом размера канала в полу при переходе из «статической камеры» в помещение зрительного зала (рис. 3, б).

Цель экспериментальных исследований – изучение скорости результирующей струи на выходе из пластинчатого воздухоораспределителя по мере удаления от него. Исследования проведены в изотермических условиях ($t_{пр} = t_{в}$). Алгоритм и последовательность выполнения исследований предлагаемого воздухоораспределителя в лабораторных условиях соответствуют методике, изложенной в [7].

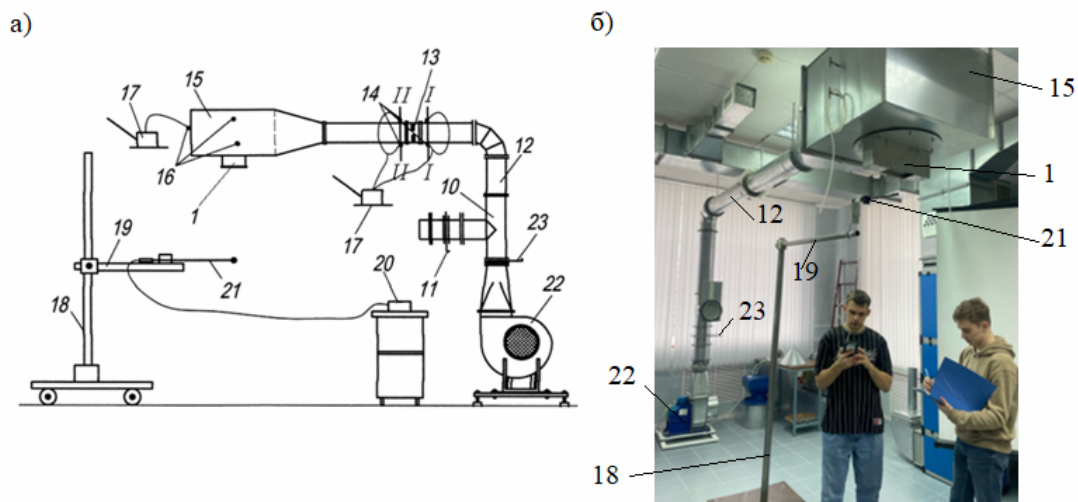


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования аэродинамических характеристик результирующей струи приточного воздуха:

а – схема лабораторного стенда; б – общий вид лабораторного стенда;

- 1 – исследуемый воздухораспределитель; 10 – тройник; 11, 23 – шибберные заслонки;
- 12 – воздуховод; 13 – стандартная диафрагма; 14 – штуцеры для измерения перепада давления;
- 15 – камера статического давления; 16 – штуцер для измерения статического давления в камере;
- 17 – микроманометр ММ-250; 18 – координатник; 19 – держатель координатника;
- 20 – термоанемометр ТКА-ПКМ-60 (ТКА ПКМ 60); 21 – датчик термоанемометра;
- 22 – вентилятор; I-I, II-II – сечения соответственно до и после диафрагмы

В исследуемой конструкции воздухораспределителя меняются положение пластин в горизонтальных рядах и сами пластины 5, различающиеся по длине (рис. 4, б).

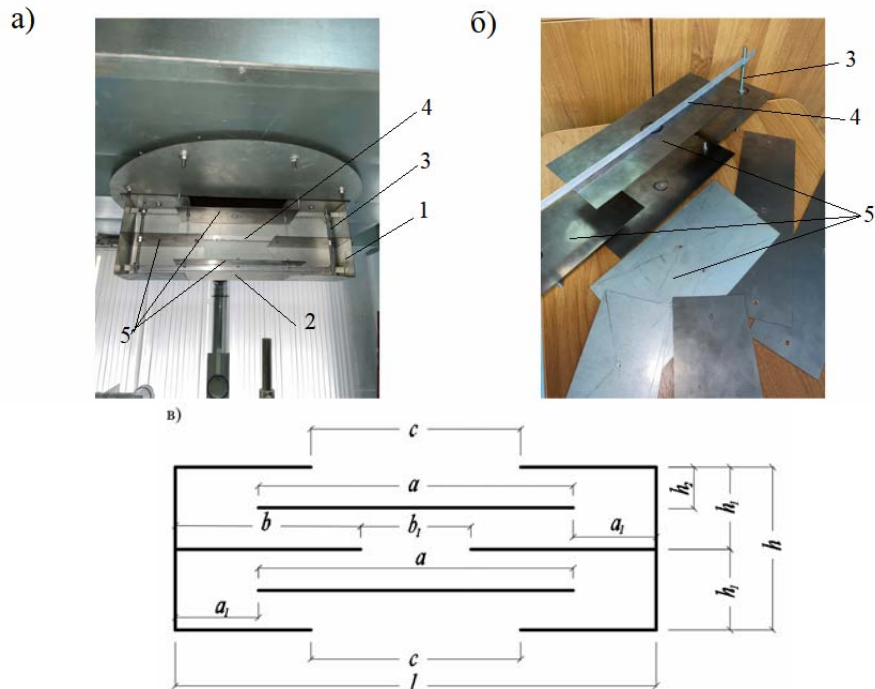


Рис. 4. Экспериментальный пластинчатый воздухораспределитель-конструктор:

а – общий вид; б – конструкция крепления пластин внутри ВР; в – схема ВР

($l, h, c, h_1, h_2 = \text{const}; a, a_1, b, b_1 = \text{var}$);

- 1 – корпус; 2 – выходное приточное отверстие с постоянной площадью сечения; 3 – регулятор фиксации направляющих пластин по вертикали и горизонтали воздухораспределителя;
- 4 – планка для фиксации направляющих пластин; 5 – направляющие пластины

Корпус устройства и размеры входного и выходного отверстий постоянны ($l, s, h, c = \text{const}$). Конструкция воздухораспределителя представлена в четырех типоразмерах (см. таблицу). Задача эксперимента в лабораторных условиях заключалась в исследовании всех типоразмеров конструкции воздухораспределителя с целью определения оптимальной длины пластин в каждом ряду, их взаимного расположения по горизонтали относительно друг друга внутри корпуса устройства.

Типоразмеры воздухораспределителя-конструктора

№ типоразмера ВР	a	a_1	b	b_1	h_1	h_2	h	c
1	24,4	9,8	15	14	7,5	3,75	15	19,5
2	24,4	9,8	17,5	9	7,5	3,75	15	19,5
3	32,5	5,75	15	14	7,5	3,75	15	19,5
4	32,5	5,75	17,5	9	7,5	3,75	15	19,5

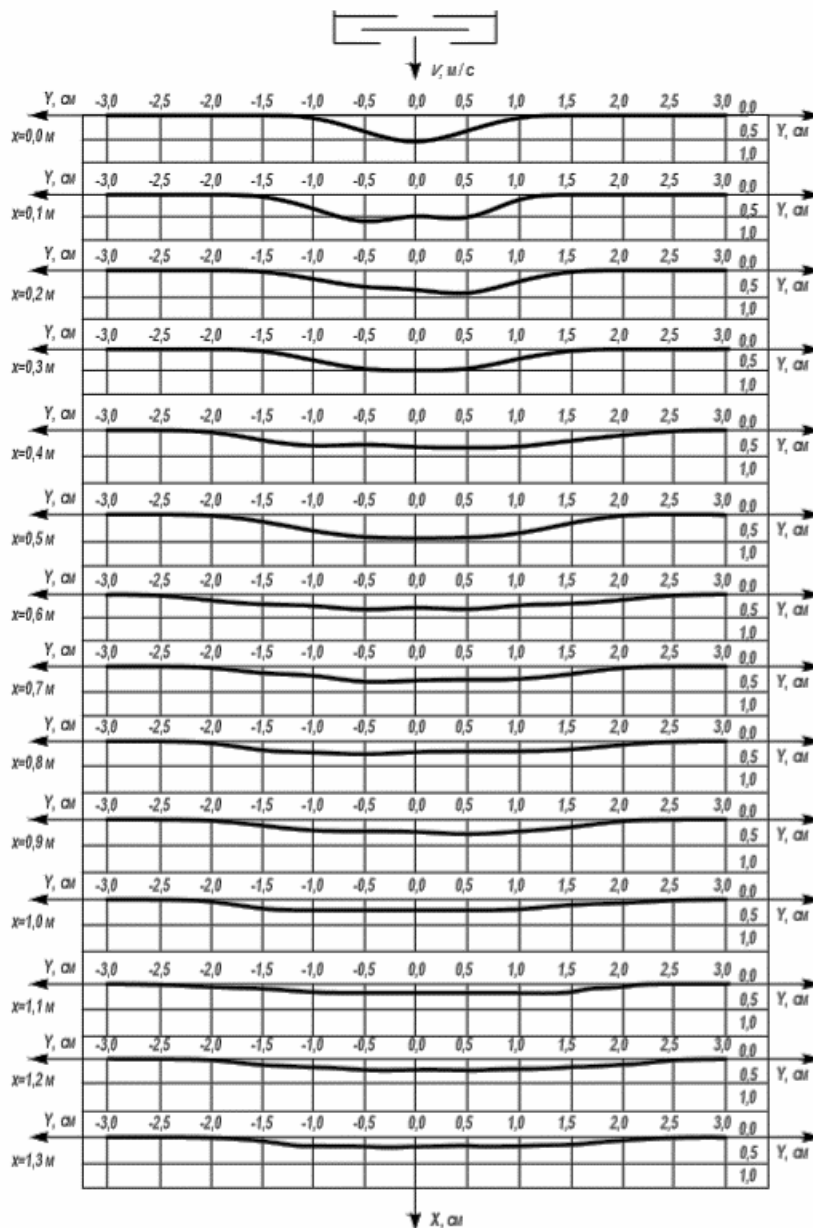


Рис. 5. Эпюры поля абсолютных скоростей воздуха в результирующем потоке в плоскости XOY конструкции ВРУ

Цель эксперимента – выбор оптимального типоразмера конструкции ВРУ, которая отвечает требованиям, предъявляемым к воздухораспределителям вытесняющей вентиляции, по обеспечению подачи приточного воздуха в нижнюю зону помещения с допустимыми параметрами скорости в пределах 0,2–0,5 м/с.

На основе полученных результатов экспериментальных исследований построены эпюры поля скоростей в поперечном сечении результирующего потока для каждого типоразмера конструкции ВРУ. На рис. 5 представлены эпюры поля скоростей результирующего потока, соответствующие типоразмеру №1 (см. таблицу).

В результирующей струе приточного воздуха наблюдаются два резко выраженных максимума скоростей. Это объясняется особенностью разработанной авторами конструкции воздухораспределителя, позволяющей делить воздушный поток внутри корпуса на плоские струи и последовательно соударять их между собой. Максимумы скоростей подтверждают наличие эффекта соударения и формирования динамически неустойчивой результирующей приточной струи и смещаются в разные стороны относительно оси, а на расстоянии 0,8–0,9 м от выходного отверстия ВРУ выравниваются. Конструкция ВРУ с типоразмером №1 позволяет обеспечить скорость приточного воздуха на выходе в нижнюю зону помещения до 0,5 м/с.

Выводы

Предложенная авторами конструкция низкоскоростного пластинчатого воздухо-распределителя с принятым оптимальным типоразмером №1 отвечает всем заявленным требованиям, предъявляемым к воздухораспределителям вытесняющей вентиляции. Скорость истечения в нижнюю зону помещения составила 0,2–0,5 м/с, что обеспечивает комфортные условия.

Предполагаются дальнейшие исследования скоростных полей результирующей струи в натуральных условиях зрительного зала ККЗ «Пенза» и филармонии.

Список литературы

1. Волков, А.А. Особенности распределения воздуха в системах вентиляции зрительных залов / А.А. Волков, И.С. Марголина, А.А. Бородкин // АВОК. – 2010. – №2.
2. Наумов, А.Л. Локальные системы кондиционирования воздуха в офисных зданиях / А.Л. Наумов, Д.В. Капко // АВОК. – 2012. – № 2.
3. Скистад, Х. Вытесняющая вентиляция в непромышленных зданиях: пер. с англ. / Х. Скистад, Э. Мундт, П. Нильен, К. Хагстрем, Й. Райлио. – 2-е изд., испр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006.
4. Наумов, А.Л. Лучшие отечественные и зарубежные энергоэффективные инженерные системы / А.Л. Наумов, Д.В. Капко // АВОК. – 2014. – №5.
5. Вытесняющая вентиляция в непромышленных зданиях // АВОК. – 2003. – №1.
6. Еремкин, А.И. Пластинчатый воздухораспределитель системы вытесняющей вентиляции для помещений культурно-зрелищных залов / А.И. Еремкин, И.Н. Фильчакина, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2 (51). – С. 117–123.
7. Фильчакина, И.Н. Технологическое кондиционирование воздуха локальным способом по типу вытесняющей вентиляции текстильных предприятий: монография / И.Н. Фильчакина, А.И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 203 с.

References

1. Volkov, A.A. Features of air distribution in ventilation systems of auditoriums / A.A. Volkov, I.S. Margolina, A.A. Borodkin // AVOK. – 2010. – No. 2.
2. Naumov, A.L. Local air conditioning systems in office buildings / A.L. Naumov, D.V. Kapko // AVOK. – 2012. – No. 2.

3. Skistad, H. Displacement ventilation in non-industrial buildings: Trans. from English / H. Skistad, E. Mundt, P. Niljen, K. Hagström, J. Railio. – 2nd ed., rev. – M.: AVOK-PRESS, 2006.
4. Naumov, A.L. The best domestic and foreign energy-efficient engineering systems / A.L. Naumov, D.V. Kapko // АВОК. – 2014. – No. 5.
5. Displacement ventilation in non-industrial buildings // АВОК. – 2003. – No. 1.
6. Eremkin, A.I. Plate air distributor of a displacement ventilation system for premises of cultural and entertainment halls / A.I. Eremkin, I.N. Filchakina, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 117–123.
7. Filchakina, I.N. Technological air conditioning using a local method based on the type of displacement ventilation of textile enterprises / I.N. Filchakina, A.I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2012. – 203 p.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 72.011.455

DOI 10.54734/20722958_2023_4_191

*Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры*
Россия, Донецкая Народная Республика,
286123, г.о. Макеевский, г. Макеевка,
ул. Державина, д. 2

Бенаи Хафизулла Аминulloвич,
доктор архитектуры, профессор
E-mail: kh.a.benai@donnasa.ru

Радионо́в Тимур Валерьевич,
кандидат архитектуры, доцент
E-mail: t.v.radionov@donnasa.ru

*Казанский (Приволжский) федеральный
университет*

Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук, доцент,
советник РААСН
E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

*Московский государственный университет
технологий и управления
им. К.Г. Разумовского (Первый казачий
университет)*

Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6

Гарькин Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, кандидат
исторических наук, зав. кафедрой «Защита
в чрезвычайных ситуациях»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

*Donbass National Academy of Civil
Engineering and Architecture*

Russia, Donetsk People's Republic,
286123, city district. Makeevsky,
Makeevka, 2, Derzhavina St.

Benai Hafizulla Aminulloovich,
Doctor of Architecture, Professor
E-mail email: kh.a.benai@donnasa.ru

Radionov Timur Valerievich,
Candidate of Architecture, Associate Professor
E-mail: t.v.radionov@donnasa.ru

Kazan (Volga Region) Federal University

Russia, Kazan, 18, Kremlevskaya St.

Sabitov Linar Salikhzanovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Advisor to RAASNE
E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

*Moscow State University of Technology and
Management named after K.G. Razumovsky
(first Cossack University)*

Russia, Penza, 6, Volodarskogo St.

Garkin Igor Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Candidate of
Historical Sciences, Head of the Department
«Protection in Emergency Situations»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

АРХИТЕКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Х.А. Бенаи, Т.В. Радионо́в, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин

Обозначены цели и задачи формирования комфортной городской среды. Отмечено, что рациональное использование свободных архитектурных пространств и систематическое урегулирование архитектурно-градостроительных систем может привести к упорядочиванию городских территорий, которые ежедневно подвергаются воздействию со стороны человека и природы. Затронуты проблемы оптимизации проектных решений при реконструкции зданий и сооружений городских территорий жилого, общественного и промышленного назначения (метод комплексной интенсификации усилий всех участников процесса, основанный на применении мероприятий; позволяет продлить жизненный цикл рассматриваемых объектов, а также повысить уровень их архитектурной выразительности, привлекательности и эксплуатационной пригодности (безопасности)).

Ключевые слова: архитектура, архитектурно-градостроительное обследование, мониторинг, проектные решения, подходы, совершенствование, оптимизация, реконструкция

ARCHITECTURAL OPTIMIZATION OF DESIGN SOLUTIONS

H.A. Benai, T.V. Radionov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin

The study outlines the goals and objectives of creating a comfortable urban environment. The rational use of free architectural spaces and systematic regulation of architectural and urban planning systems can lead to the ordering of urban areas that are daily exposed to human and natural influence. The problems of optimizing design solutions during the reconstruction of buildings and structures of urban areas for residential, public and industrial purposes are discussed (a method of comprehensive intensification of the efforts of all participants in the process, based on the use of measures; they allow extending the life cycle of the objects, as well as increasing the level of their architectural expressiveness, attractiveness and operational suitability (safety)).

Keywords: architecture, architectural and urban planning survey, monitoring, design solutions, approaches, improvement, optimization, reconstruction

С научной и практической точек зрения архитектурно-градостроительное совершенствование городских территорий, зданий и сооружений в первую очередь следует осуществлять с учетом региональной специфики территориального расположения объекта реконструкции [1]; при разработке проектных решений нормативно-правовая база в области реконструктивных мероприятий практически отсутствует. В качестве компенсационного правового аргумента могут выступать региональные (возможно, временные) акты по регулированию обозначенных процессов в архитектурно-технической сфере деятельности. Решая проблемы архитектуры и ее изменчивости, определяя новейшие способы оптимизации проектных решений, необходимо обобщать наиболее значимый мировой опыт реконструкции зданий и сооружений различного функционального назначения, позволяющий на фундаментальном уровне обозначать научные и практические приоритеты (алгоритмы решения сложнейших и важнейших народно-хозяйственных задач государства в области архитектуры и ее разнообразных проявлениях изменчивости). Это на сегодня может носить теоретико-экспериментальный характер (в будущем – переродиться в новые поисковые архитектурные преобразования зданий, сооружений, городских территорий, участвующих в комплексных реконструктивных мероприятиях).

Рассматривая и анализируя мировые тренды в формировании новейших архитектурных и градостроительных решений, необходимо предметно обращать внимание на востребованность и социальную надобность принятых проектных решений, которые в XXI столетии будут восприниматься современным обществом по-особенному (ценность новейших и уникальных решений может переродиться в обыденную закономерность, что повлияет на неоспоримую авторитетность новаторских тенденций в архитектуре). Мировая практика объективно свидетельствует о том, что процесс преобразования (в первую очередь в области архитектурной среды) развивается достаточно стремительно и используется в различных сферах деятельности, связанных с проектными видами работ.

При оптимизации проектных решений по реконструкции архитектурно-градостроительных объектов целесообразно учитывать принципы современной архитектуры, гибко адаптируемые к динамике социальных перемен [2]. Особого внимания заслуживает термин «гибкая адаптация», который, может быть, непосредственно применим к процессам разработки проектных решений на различных стадиях экспериментального и рабочего проектирования при реконструкции архитектурно-градостроительных объектов и их комплексов.

В процедуре оптимизации проектных решений архитектурно-градостроительных объектов, подлежащих реконструкции, должны учитываться: теоретическая необходимость с возможностью дальнейшего практического использования, методика поиска динамической формы в архитектуре городских территорий [3], обобщение теоретических основ динамического структурного формообразования в архитектуре, подробно изложенных в [4], концептуальные основы формирования устойчивой архитектуры (подходы стратегического развития), освещенные и раскрытые в [5] (через современный контекст архитектурно-градостроительного восприятия объекта реконструкции).

Современные подходы к реконструкции объектов городской застройки должны согласовываться с устоявшимися и общепринятыми алгоритмами (имеют особую значимость как с научной, так и с практической точек зрения).

Авторами статьи определена последовательность оптимизации проектных решений для архитектурно-градостроительных объектов, подлежащих реконструкции. Она включает следующие шаги:

- предварительное обоснование предполагаемых проектных решений, основывающееся на эффективности реконструкции объектов городской застройки с учетом прогнозных элементов дальнейшего развития;

- выработка стратегии на принципиально новых архитектурно-градостроительных решениях с учетом технологического спектра возможностей при реконструкции зданий и сооружений, городских территорий, направленной на формирование системы уникальности зданий и сооружений (изменяются во времени и пространстве); осознание и восприятие архитектурной формы объектов и их художественно-стилистических характеристик;

- определение и согласование степени архитектурно-градостроительных и конструктивно-технологических изменений, вследствие которых произошли архитектурно-эксплуатационные изменения в потенциально подлежащих реконструкции объектах;

- разработка проектных и исследовательских подходов, определяющих механизм единой системы принятия решений (связаны с формированием, обновлением и реконструкцией объектов городской застройки на градостроительном, архитектурном, конструктивном, технологическом, функциональном уровнях, отвечающих за систему непрерывного функционирования объектов городской застройки, а также систему безопасности);

- обобщение новейших проектно-исследовательских решений, связанных с внедрением уникальных технологий и систем (позволяют повысить новый эксплуатационный период зданий и сооружений различного функционального назначения);

- развитие интеграционных приоритетов, направленных на применение новейших технологий и систем (придают существующим объектам городской застройки принципиально новые архитектурно-художественные характеристики, позволяющие сделать процесс реконструкции более выразительным по отношению к зданиям и сооружениям, нуждающимся в динамических архитектурных изменениях [6, 7]);

- формулировка и обоснование способов учета особых архитектурно-технологических условий, определяющих принципы построения алгоритмов поиска оптимального сочетания различных типов объектов городской застройки (преимущественно жилых и общественных) с учетом приоритетов в архитектуре, которые могут видоизменяться [8];

- специфика и характер использования исходно-разрешительной документации для объектов реконструкции (исходно-разрешительная документация должна включать в себя: обоснованный выбор земельного участка, на котором будет размещаться новый объект, архитектурно-планировочное задание на строительство или реконструкцию, комплексное заключение о горно-геологических исследованиях; наличие полезных ископаемых, пределы допустимой концентрации для разработки проекта ОВОС, план земельного участка, где располагается реконструируемый объект с каталогом координат, технические условия на подключение к инженерным коммуникациям, а также заключение о возможности и целесообразности реконструкции объекта городской застройки и прилегающей к нему территории);

- реализация переходного архитектурно-градостроительного механизма – от теоретического анализа проектных решений к конкретным проектно-исследовательским решениям, основывающимся на фундаментальных подходах теории современной архитектуры [9];

- синтез теоретических положений (отражают парадигму новой архитектуры [10]) и их практическая интерпретация в современной архитектурной среде, которая сформирована благодаря функционированию объектов городской застройки;

– достижение высокого уровня информативности архитектурно-градостроительных проектных решений («новое» и «традиционное» в содержательной части признаков новейшей динамической архитектуры на платформе имеющихся архитектурных объектов, участвующих в реконструктивных мероприятиях).

Здесь процесс совершенствования, обновления и восстановления зданий и сооружений, городских территорий, участвующих в реконструктивных мероприятиях, рассматривается как средство динамического изменения архитектурно-градостроительных объектов с присущими им чертами узнаваемости и видоизменяемости с учетом изменения типологической структуры (возможно создание объектов нового поколения). Должны учитываться новейшие параметры информационной модели объекта реконструкции: пространственные данные и виртуальные представления всех объектов, которые участвуют в реконструктивных мероприятиях [13]. Приоритетным условием, регламентирующим особенности динамической изменчивости объектов архитектуры и прилегающих к ним территорий, следует считать процессы гибкости в архитектуре и геометрическое моделирование архитектурных форм, создаваемых с целью комплексного преобразования архитектурного пространства современных городов [11, 12].

Подход к преобразованию объектов городской застройки должен учитывать мероприятия, связанные с устранением ограничений при реконструкции, что позволит своевременно применять методы и способы выявления и кластеризации городских проблем, связанных с преобразованием зданий и сооружений, городских застроек [14].

Для иллюстрации приведем проект «Архитектурно-градостроительная реконструкция существующего жилого квартала в структуре уплотненной городской застройки города Донецка» (автор – Харебина И.Ю., руководитель разработки – к. арх., доц. Радионов Т.В., научные консультанты – д.т.н., доц. Сабитов Л.С., д. арх., проф. Бенаи Х.А.), рис.1–3.

Как видим, новейшие подходы в области архитектурно-градостроительной оптимизации проектных решений при реконструкции объектов городской застройки основываются на экспериментальном проектировании, которое базируется на вариативной системе подбора рационального метода и способа создания проекта с минимальными техническими и временными затратами, что придает исследуемому процессу значимость и востребованность.

Качественным результатом выдаваемой проектно-экспериментальной продукции, определяющим динамику архитектурно-градостроительного преобразования зданий и сооружений, городских территорий на основе оптимальных подходов комплексной реконструкции, является архитектурно-технологическое вариантное поисковое проектирование (раскрывает научный и практический смысл реконструкции – в глобальном и комплексном понимании этого вопроса).

Выводы

Обобщены и исследованы проблемы в архитектуре с учетом ее изменчивости, на фундаментальном уровне обозначены будущие научные и практические приоритеты; впоследствии они могут стать приоритетными алгоритмами решения сложнейших и важнейших народно-хозяйственных задач государства в области архитектуры и ее разнообразных проявлениях.

Разработаны подходы к оптимизации проектных решений в области архитектурно-градостроительного преобразования зданий и сооружений, городских территорий на основе системы комплексной реконструкции (изменение зданий и сооружений, городских территорий, участвующих в реконструктивных мероприятиях, рассматривается как средство динамического изменения архитектурно-градостроительных объектов гибкости).

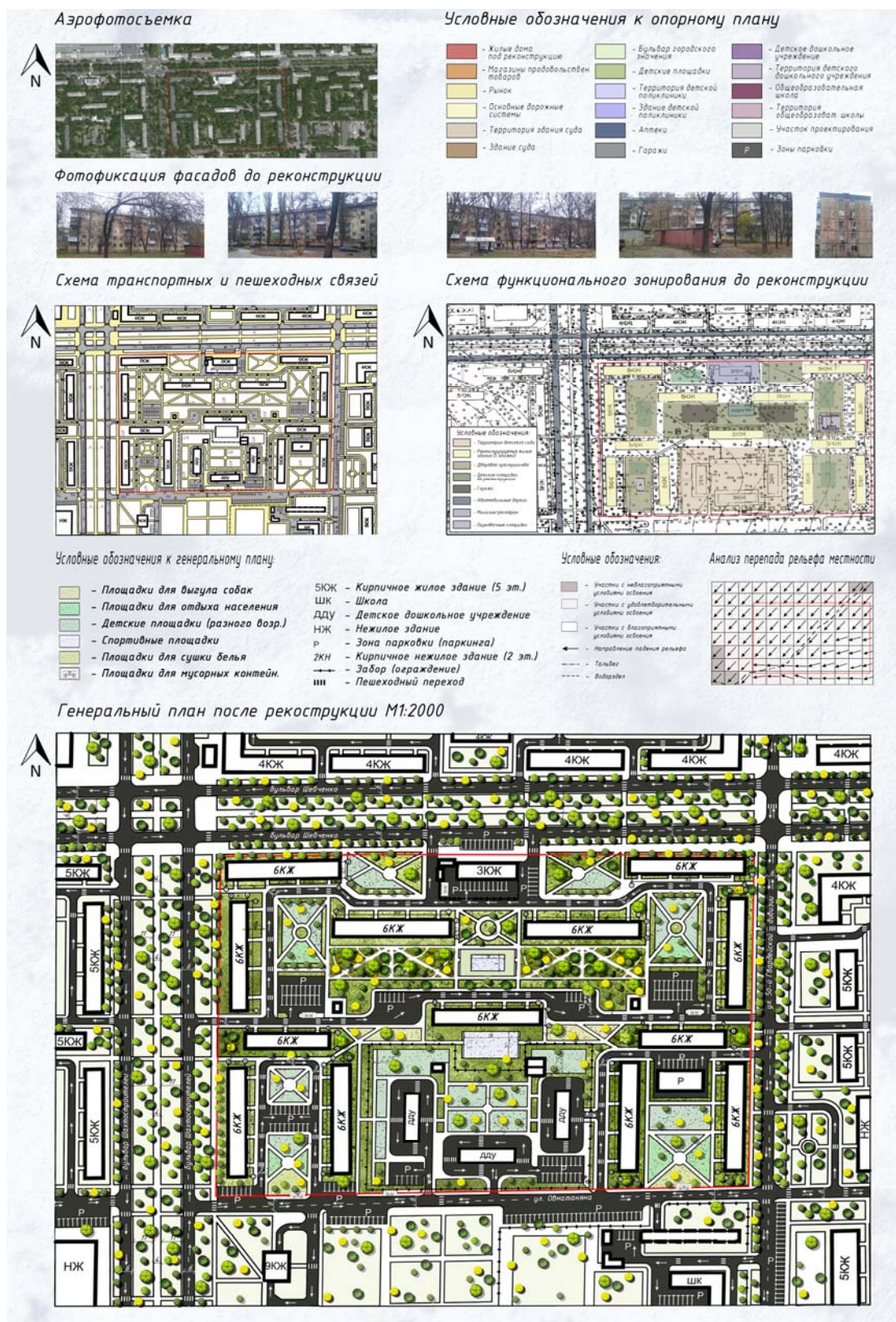


Рис. 1. Экспериментальный проект архитектурно-градостроительной реконструкции жилого квартала в городе Донецке (градостроительное обоснование участка застройки и генеральный план после реконструкции)

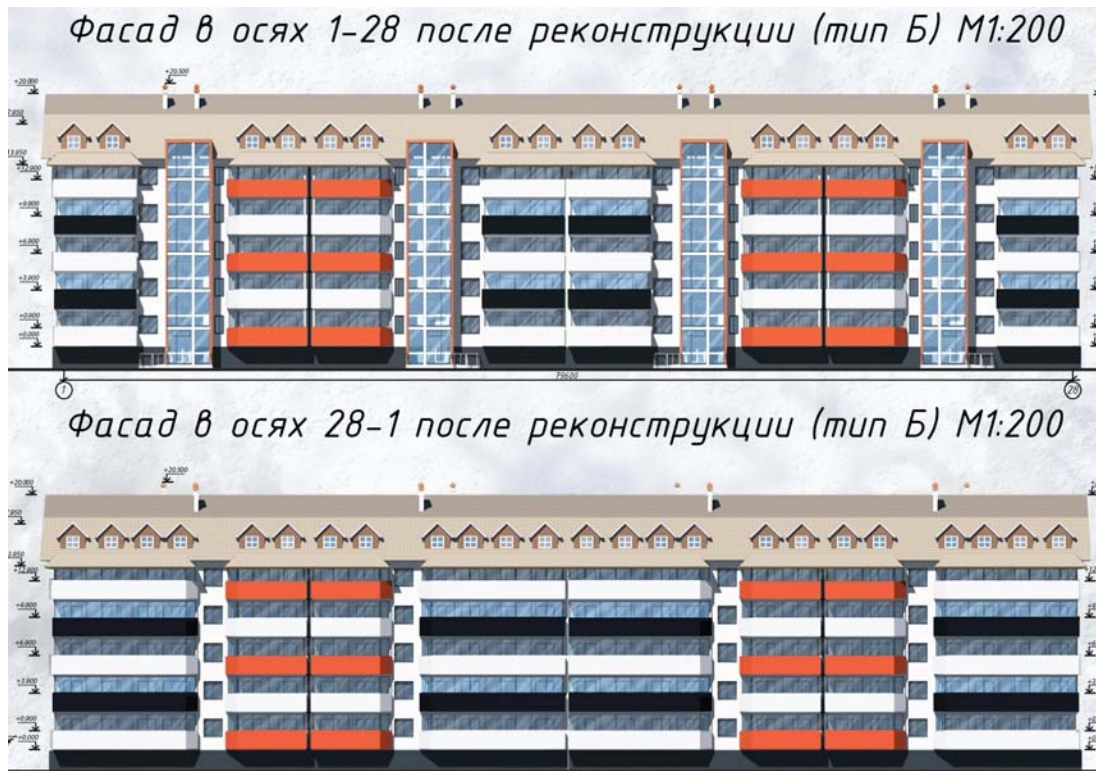


Рис. 2. Экспериментальный проект архитектурно-градостроительной реконструкции жилого квартала в городе Донецке – фасады в осях 1-28 и 28-1 5-этажных жилых зданий (после реконструкции)

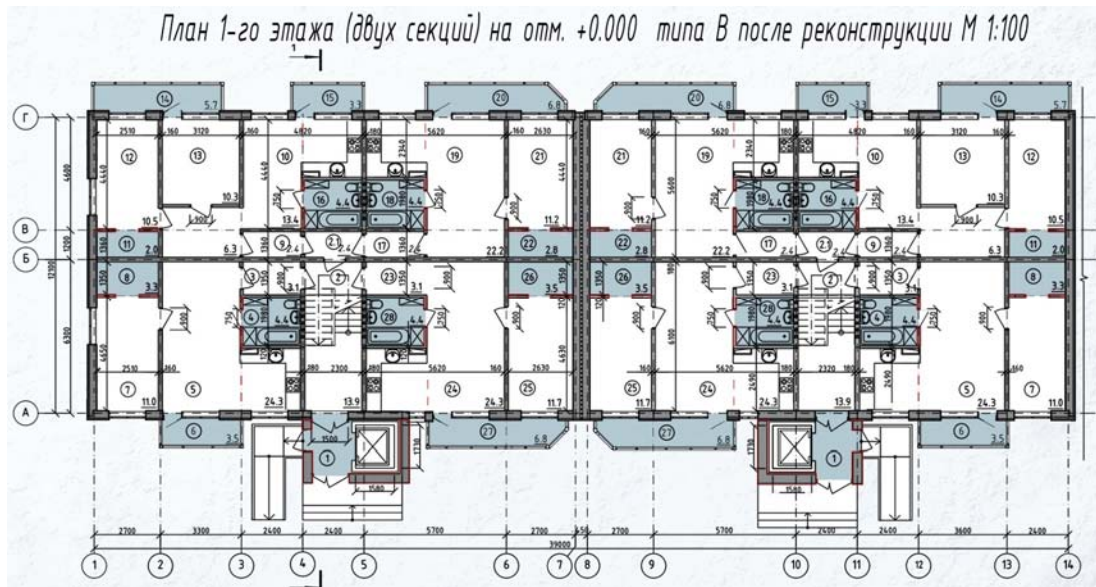


Рис. 3. Экспериментальный проект архитектурно-градостроительной реконструкции жилого квартала в городе Донецке – план 1-го этажа (тип В) (после реконструкции) с устройством пристраиваемых наружных лифтовых шахт и средств для передвижения маломобильных групп населения (пандусов) при входе в подъезд

1. Добрицына, И.А. Глобальное и региональное в системе стратегии современной архитектуры. Утверждение новой эры урбанизма / И.А. Добрицына // Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ: материалы международной научно-практической конференции: сб. статей / редкол. Д.О. Швидковский, Г.В. Есаулов [и др.]. – М., 2012. – С.14–19.
2. Дуйсебай, Е.К. Современные принципы архитектурного проектирования общественных зданий и сооружений (гибко адаптируемое к динамике социальных перемен): монография / Е.К. Дуйсебай. – Алматы: Изд. дом КазГАСА «Строительство и Архитектура», 2002. – 121 с.
3. Мелодинский, Д.Л. Поиски динамической формы в архитектуре советского авангарда / Д.Л. Мелодинский // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – №2(43). – С. 229–251.
4. Вартамян, О.М. Теоретические основы динамического структурного формообразования в архитектуре: автореферат дис. ... доктора архитектуры : 18.00.01 / О.М. Вартамян; Моск. архит. ин-т. – М., 1988. – 48 с.
5. Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития / Г.В. Есаулов // Вестник ТГАСУ «Архитектура и градостроительство». – Томск: ТГАСУ, 2014. – Вып. 2014, № 6. – С. 9–24.
6. Лапшина, Е.Г. Концепция архитектурного пространства городов: динамическая составляющая / Е.Г. Лапшина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 170–176.
7. Мирхасанов, Р.Ф. Композиционная форма в архитектуре конца XIX века: эволюция инженерной мысли / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 157–161.
8. Мирхасанов, Р.Ф. От «чугунной архитектуры» к металлическому каркасу / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 1 (54). – С. 178–185.
9. Холодова, Л.П. Концепты современной теории архитектуры / Л.П. Холодова // Архитектон: известия вузов. – 2010. – №3(31). – URL: http://archvuz.ru/2010_3/1/.
10. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 4–9.
11. Бабич, В.Н. Геометрическое моделирование архитектурных форм и градостроительных структур / В.Н. Бабич, А.Г. Кремлёв // Архитектон: известия вузов. – 2015. – №2(50).
12. Семёнов, В.С. Моделирование гибкой архитектурной среды / В.С. Семёнов, Р.Ш. Акбаралиев. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2015. – 123 с.
13. Chen, Ke. Automatic building information model reconstruction in high-density urban areas: Augmenting multi-source data with architectural knowledge / Ke Chen, Weisheng Lu, Fan Xue, Pingbo Tang, Ling Hin Li // Automation in Construction. – 2018. – P. 22–34.
14. Chandra Bahadur Shrestha. Unravelling constraints of urban housing reconstruction / Chandra Bahadur Shrestha, Bhubaneswori Parajuli, Sneha Malani // Progress in Disaster Science. – 2021. – P. 1–7.
15. Hui En Pang. 3D building reconstruction from single street view images using deep learning / Hui En Pang, Filip Biljecki // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – P. 1–20.

References

1. Dobritsyna, I.A. Global and regional in the system of strategy of modern architecture. Approval of a new era of urbanism / I.A. Dobritsyna // Science, education and experimental design. Proceedings of the Moscow Architectural Institute: materials of the international

scientific and practical conference: collection articles / editorial D.O. Shvidkovsky, G.V. Esaulov [et al.]. – M., 2012. – P.14–19.

2. Duisebay, E.K. Modern principles of architectural design of public buildings and structures (flexibly adaptable to the dynamics of social changes): monograph / E.K. Duisebay. – Almaty: Publishing house of KazGASA «Construction and Architecture», 2002. – 121 p.

3. Melodinsky, D.L. Searches for dynamic form in the architecture of the Soviet avant-garde / D.L. Melodinsky // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2018. – No. 2(43). – P. 229–251.

4. Vartanyan, O.M. Theoretical foundations of dynamic structural formation in architecture: abstract of thesis ... Doctor of Architecture: 18.00.01 / O.M. Vartanyan; Moscow architect int. – M., 1988. – 48 p.

5. Esaulov, G.V. Sustainable architecture – from principles to development strategy / G.V. Esaulov // *Bulletin of TGASU “Architecture and Urban Planning”*. – Tomsk: TGASU, 2014. – Issue 2014, No. 6. – P. 9–24.

6. Lapshina, E.G. The concept of urban architectural space: dynamic component / E.G. Lapshina // *Regional architecture and engineering*. – 2022. – No. 4 (53). – P. 170–176.

7. Mirkhasanov, R.F. Compositional form in the architecture of the late 19th century: the evolution of engineering thought / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – No. 2(55). – P. 157–161.

8. Mirkhasanov, R.F. From “cast iron architecture” to a metal frame / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – No. 1 (54). – P. 178–185.

9. Kholodova, L.P. Concepts of modern theory of architecture / L.P. Kholodova // *Architect: news from universities*. – 2010. – No. 3(31). – URL: http://archvuz.ru/2010_3/1/

10. Skachkov, Yu.P. Modification of the PATTERN method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.

11. Babich, V.N. Geometric modeling of architectural forms and urban structures / V.N. Babich, A.G. Kremlev // *Architect: news of universities*. – 2015. – No. 2(50).

12. Semenov, V.S. Modeling a flexible architectural environment / V.S. Semenov, R.Sh. Akbaraliev. – Bishkek: KRSU Publishing House, 2015. – 123 p.

13. Chen, Ke. Automatic building information model reconstruction in high-density urban areas: Augmenting multi-source data with architectural knowledge / Ke Chen, Weisheng Lu, Fan Xue, Pingbo Tang, Ling Hin Li // *Automation in Construction*. – 2018. – P. 22–34.

14. Chandra Bahadur Shrestha. Unravelling constraints of urban housing reconstruction / Chandra Bahadur Shrestha, Bhubaneswori Parajuli, Sneha Malani // *Progress in Disaster Science*. – 2021. – P. 1–7.

15. Hui En Pang. 3D building reconstruction from single street view images using deep learning / Hui En Pang, Filip Biljecki // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2022. – P. 1–20.

УДК 72:727

DOI 10.54734/20722958_2023_4_199

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Попов Антон Олегович,

кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Конструктивно-
дизайнерское проектирование»

E-mail: a.o.popov@list.ru

Маилян Левон Рафаэлович,

доктор технических наук, профессор,
академик РААСН, главный научный
сотрудник НИЛ «Интеллектуальная
мобильность»

E-mail: LRMailyan@kpfu.ru

Сабитов Линар Салихзанович,

доктор технических наук, профессор
кафедры «Конструктивно-дизайнерское
проектирование», советник РААСН

E-mail: l.sabitov@bk.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

Данилов Александр Максимович,

доктор технических наук,
профессор, советник РААСН

E-mail: fmatem@pguas.ru

*Московский государственный университет
технологий и управления имени
К.Г. Разумовского (Первый казачий
университет)*

Россия, г. Пенза, ул. Володарского, д.6

Гарькин Игорь Николаевич,

кандидат технических наук, кандидат
исторических наук, зав. кафедрой «Защита
в чрезвычайных ситуациях»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

Kazan (Volga Region) Federal University

Russia, Kazan, 18, Kremlin St.

Popov Anton Olegovich,

Candidate of Sciences, Associate Professor,
head Department of "Structural and Design
Engineering"

E-mail: a.o.popov@list.ru

Mailyan Levon Rafaelovich,

Doctor of Sciences, Professor, Academician
of RAASN, Chief Researcher of the Scientific
Research Laboratory «Intelligent Mobility»

E-mail: LRMailyan@kpfu.ru

Sabitov Linar Salikhzanovich,

Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Structural Engineering and
Design», adviser of the Russian academy of
architectural and building science

E-mail: l.sabitov@bk.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

Danilov Aleksander Maksimovich,

Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences

E-mail: fmatem@pguas.ru

*Moscow State University of Technology and
Management named after K.G. Razumovsky
(First Cossack University)*

Russia, Penza, 6, Volodarsky St.

Garkin Igor Nikolaevich,

Candidate of Sciences, Candidate of History
Sciences, Head of the Department «Protection
in emergency situations»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ НА ПРИМЕРЕ КОРПУСА «ОРЕШЕК» ШЛИССЕЛЬБУРГСКОЙ КРЕПОСТИ

А.О. Попов, Л.Р. Маилян, Л.С. Сабитов, А.М. Данилов, И.Н. Гарькин

Показана важность системного подхода к анализу технического состояния зданий и сооружений исторической застройки как объектов культурного наследия на примере обследования корпуса «Орешек» Шлиссельбургской крепости. Приведены результаты

совместных расчетов с использованием современного расчетно-аналитического аппарата на последовательных этапах жизненного цикла зданий.

Ключевые слова: объекты культурного наследия, анализ, реставрация, техническое состояние, системный подход, пример реализации

SYSTEM APPROACH TO ANALYZING TECHNICAL CONDITION OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS ON THE EXAMPLE OF "ORESHEK" BUILDING OF THE SHLISSELBURG FORTRESS

A.O. Popov, L.R. Mailyan, L.S. Sabitov, A.M. Danilov, I.N. Garkin

The importance of a systematic approach to the analysis of technical condition of buildings and structures of historical buildings as objects of cultural heritage is shown using the example of an examination of the Oreshek building of the Shlisselburg Fortress. The results of joint calculations using modern calculation and analytical apparatus at successive stages of the life cycle of buildings are presented.

Keywords: cultural heritage objects, analysis, restoration, technical condition, systematic approach, example of implementation

Прогуливаясь в центральных частях исторически сложившихся городов не только России, но и мира, восхищаешься парадигмой исторической застройки, в которой каждый из созерцателей находит свою собственную красоту и ценность. Так, «лирик» восхитится содержанием и формой, а «физик», в свою очередь, найдет предмет для восхищения в устойчивости, прочности и долговечности уже отреставрированных строений. При этом, рассматривая еще не отреставрированные строения, встает вопрос: «Как же это все еще стоит?» (рис. 1, [1]). Возникает необходимость системного подхода к анализу технического состояния зданий и сооружений исторической застройки как объектов культурного наследия [2...6].



Рис. 1. Фрагмент 4-го тюремного корпуса Шлиссельбургской крепости «Орешек»; построена в 1911 г.

Дефекты и повреждения Шлиссельбургской крепости, в том числе 4-го тюремного корпуса, связаны с обороной Ленинграда в период Великой Отечественной войны и прорывом блокады. Боевые действия привели к аварийному состоянию здания, а долгие годы ненадлежащей эксплуатации его усугубили, но целостность строения по данным инструментального обследования и поверочных расчетов была обеспечена. Четвертый тюремный корпус крепости «Орешек» является гипертрофированным

примером возможного технического состояния объекта культурного наследия, однако же здание стоит и будет стоять; отчасти это связано с тем, что в 2019 году были реализованы противоаварийные и консервационные мероприятия, разработанные коллективом авторов настоящей работы.

Неоспоримый факт: дошедшие до нас объекты культурного наследия, оказались надежными и долговечными. На основании поверочных расчетов несущих и ограждающих конструкций отмечен значительный запас по прочности поперечных сечений; во многих случаях обеспечиваются теплотехнические характеристики ограждающих конструкций. Выявленные запасы по прочности во многом определялись особенностями строительной отрасли прошлого: ограниченной номенклатурой строительных материалов и изделий. Из фундаментальных исследований Л.И. Онищика [7] становится ясным, что толщина наружных стен зависела совсем не от несущей способности, а от теплоизоляционных характеристик. Систематизируя результаты исследований Н.К. Лахтина [8] и В.Р. Бернгарда [9], можно понять также и механизм выбора толщины внутренних стен: она связана с восприятием распора от сводчатых перекрытий, а иногда и с формированием опорной части сводов с распалубками; конструктивные требования к толщине стен определяли ширину обреза и габариты подошвы фундамента. В [10] рассматривалась и надежность сводчатых перекрытий с выявлением значительного запаса по прочности и устойчивости (сводчатые перекрытия, имеющие повреждения в виде трещин, переходят из одного стационарного статически и геометрически неизменяемого положения в другое; возникает эффект самозалечивания трещин). Каменные конструкции, деревянные и металлические стержневые элементы имеют значительный запас (до 50-х годов XX века расчет по несущей способности и деформативности проводился с использованием метода допускаемых напряжений; имел запас до 40 % по сравнению с действующим методом предельных состояний; ранее по нагрузкам на основания фундаментов получали более чем двукратный запас по несущей способности грунтового основания). Ярким примером значительного запаса по несущей способности свай является исследование [11] (1923, 1929 гг.; устройство свайного основания для здания Киевского вокзала); здесь были испытаны 31 деревянная и железобетонная сваи, а также проведено сопоставление опытных данных с расчетными значениями; проводился сравнительный анализ с общепринятыми значениями параметров на момент строительства (см. таблицу).

№ п/п	Выражение для определения несущей способности	Средние отклонения от опытной величины, %
1	формула Брикса	451 %
2	формула Этельнейна	1235 %
3	формула Гулрича	516 %
4	формула Герсеванова	50 %

Сводная таблица результатов испытания свай приведена в [12]. Как видим, наибольшая сходимость достигается по

$$P = -\frac{n}{2}F + \sqrt{\frac{n^2}{4}F^2 + n\frac{F}{e}QH\frac{Q+0.2q}{Q+q}},$$

где P – сопротивление свай; F – площадь поперечного сечения; e – отказ свай; Q – вес бабы; q – вес свай; H – высота подъема бабы; n – коэффициент, зависящий от рода свай и способа погружения; Н.М. Герсеванов, [13].

Профессор Н.М. Герсеванов, зная о значительном запасе, заложенном при введении коэффициента n , отмечал: «...позволю себя выразить пожелание, чтобы величина коэффициента n в формуле, зависящего от материала свай и способа ее забивки и (что весьма важно) отнюдь не зависящего от рода грунта, в который свая вбивается, была подвергнута более тщательному определению» (записано в авторской редакции).

Значительный запас по несущей способности, заложенный при строительстве зданий, имеющих на сегодняшний день статус объектов культурного наследия, связан с несовершенным на момент их возведения расчетно-аналитическим аппаратом. Можно констатировать: чем древнее здание, имеющее статус объекта культурного наследия, тем больший запас по прочности оно имеет.

Далее. Здания и сооружения, расположенные на территории архитектурного ансамбля Шлиссельбургской крепости «Орешек» (объект культурного наследия федерального значения, рис. 2), имеют различные периоды постройки и во многом инкорпорированы; расчетная схема крепости представлена на рис. 3.



Рис. 2. Общий вид Шлиссельбургской крепости «Орешек»

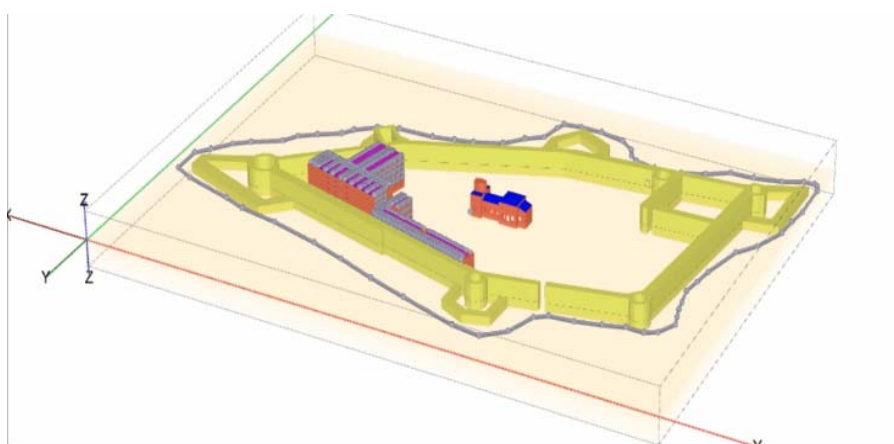


Рис. 3. Расчетная модель

Крепость представляет собой замкнутый контур крепостных стен (прясел), имеющих в плане неправильную форму, обрамленную системой звездчатых бастионов. Конструктивно прясла – массивные конструкции из путиловского плитняка на известковом растворе; их толщина находится в интервале от 3,8 до 4,2 м (зависит от высоты и места расположения).

Общая расчетная схема архитектурного ансамбля включает в себя здания и сооружения различного назначения и периодов возведения, а также конструктивного назначения:

- крепостные стены, конец XV – начало XVI в.;
- солдатская «нумерная» казарма с каналом, 1725-1728 гг.;
- ветличная башня, конец XV – начало XVI в.;
- флажная башня, конец XV – начало XVI в.;
- башня Головина, конец XV – начало XVI в.;
- башня Головкина, конец XV – начало XVI в.;
- безымянная башня;
- 4-й тюремный корпус, 1911 г.;
- здание старой тюрьмы, 1798 г.;

- здание новой тюрьмы, 1884 г.;
- собор Святого Иоанна Предтечи, 1829 г.;
- государев (Зотов) бастион, 1703 г.;
- княжий (Меншиков) бастион, 1715 г.;
- королевский (Нарышкин) бастион, 1703 г.;
- бастион Головина, 1703 г.;
- бастион Головкина, 1703 г.;
- флажный бастион, 1740-1765 гг.;
- куртины, 1740-1765 гг.

Наиболее поврежденное строение – 4-й тюремный корпус – представляет собой 4–5-этажное здание Т-образной в плане формы, которое находится в общем архитектурном ансамбле зданий и сооружений Орехового острова. Наружные и внутренние стены здания выполнены из обыкновенного полнотелого глиняного кирпича (не менее М75) на известковом растворе (не менее М25). Продольные и поперечные стены имеют толщину от 610 до 810 мм. Фундаменты здания – бутовые из рваного камня (не менее М400) на известковом растворе (не менее М25), устроенные с уступом в 100 мм. По конструктивному решению здание относится к бескаркасным строениям с продольными и поперечными несущими стенами. Перекрытия устроены в виде лучковых (бутобетонных) сводов (не менее В12,5) по металлическим двутавровым балкам; параметры близки к стальным балкам №20 и 35 ОСТ 1926.

Приведем результаты расчетов для последовательных этапов жизненного цикла зданий с учетом консолидации грунтов основания (рис. 4–8).

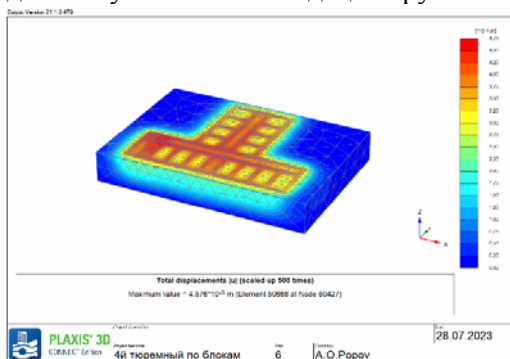


Рис. 4. Изополя общих перемещений 4-го тюремного корпуса Шлиссельбургской крепости «Орешек» на этапе устройства фундамента

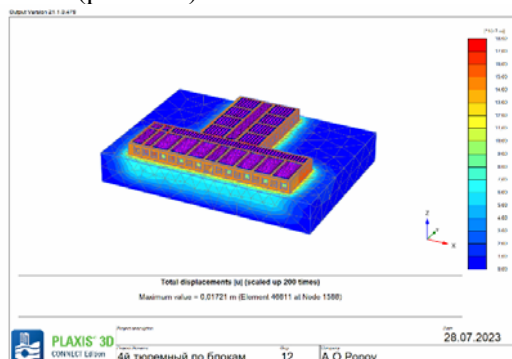


Рис. 5. Изополя общих перемещений 4-го тюремного корпуса Шлиссельбургской крепости «Орешек» на этапе возведения

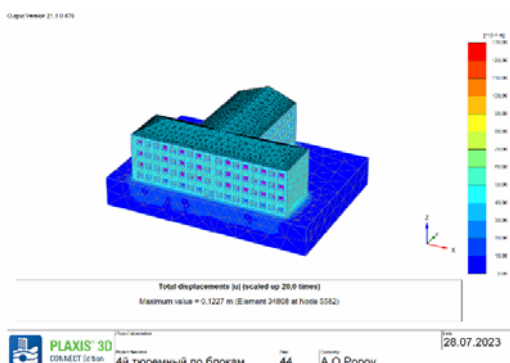


Рис. 6. Изополя общих перемещений 4-го тюремного корпуса Шлиссельбургской крепости «Орешек» на этапе окончания строительства, 1911 г.

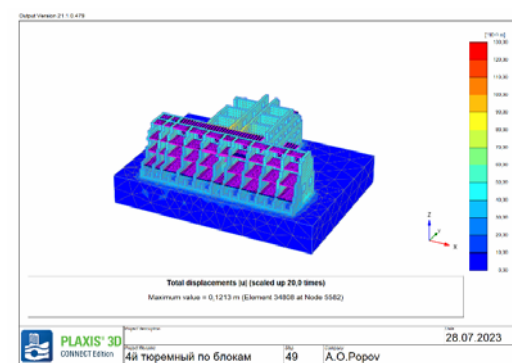


Рис. 7. Изополя общих перемещений 4-го тюремного корпуса Шлиссельбургской крепости «Орешек» на этапе повреждений во время ВОВ (1942–1943)

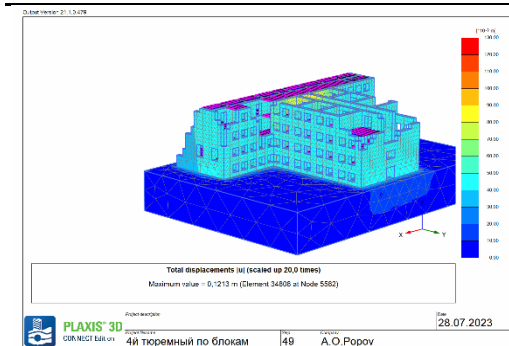


Рис. 8. Изополю общих перемещений 4-го тюремного корпуса Шлиссельбургской крепости «Орешек» на 2018 г.

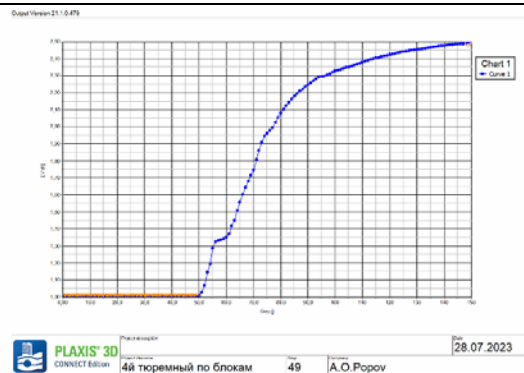


Рис. 9. Зависимость коэффициента устойчивости системы

Выводы:

На основе системного подхода приведены результаты обследования технического состояния строительных конструкций Шлиссельбургской крепости «Орешек» как объекта культурного наследия федерального значения.

Предполагалось:

- устойчивость аварийных конструкций и объектов, обладающих целостностью, не требует верификации;
- визуальные наблюдения целостности конструкции или строения рассматриваются как эмпирическая проверка;
- наличие дефектов и повреждений не снижают физико-механических характеристик материалов (принимаются по фактической геометрии по результатам инструментальных исследований; разрушения и трещины кирпичной кладки и др.).

Список литературы

1. Матвеев, И.Ю. Отчет об обследовании технического состояния строительных конструкций на объекте: «Шлиссельбургская крепость "Орешек"»: комплексные научные исследования / И.Ю. Матвеев, А.О. Попов, Д.К. Бирюлева [и др.]. – Казань: ООО ЦТСС «ЭкспертПроектСтрой», 2018.
2. Будылина, Е.А. Проблемы реализации системного подхода в строительной отрасли / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3 (44). – С. 140–145.
3. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 119–123.
4. Будылина, Е.А. Системный анализ как методология решения проблем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 14–20.
5. Garkin, I. Systems approach to technical expertise construction of buildings and facilities / I. Garkin, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 5–8. – P. 213–217.
6. Сабитов, Л.С. Использование математических моделей для обеспечения безопасной эксплуатации объектов культурного наследия / Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин, И.К. Киямов, М.К. Сайфетдинова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 6. – С. 102–105.
7. Онищик, Л.И. Каменные конструкции / Л.И. Онищик. – М.: Стройиздат, 1939. – 209 с.

8. Лахтин, Н.К. Расчет арок и сводов / Н.К. Лахтин. – М.: Студенческое издательское общество при Императорском Московском Техническом Училище, 1911. – 290 с.
9. Бернгард, В.Р. Арки и своды / В.Р. Бернгард. – СПб.: Институт гражданских инженеров, 1901. – 128 с.
10. Попов, А.О. Прочность по нормальным сечениям и деформативность кирпичных цилиндрических сводов, усиленных углеродными холстами / А.О. Попов, И.Ю. Матвеев, Д.К. Бирюлева // Известия КГАСУ. – 2015. – № 2 (32). – С. 168–175.
11. Гастев, В.А. О формулах для определения сопротивления свай по отказам / В.А. Гастев // Техника и экономика путей сообщения. – 1923. – №6. – С. 128–135.
12. Пузыревский, Н.М. Фундаменты / Н.М. Пузыревский. – М.: Госстройиздат СССР, 1934. – 516 с.
13. Герсеванов, К.М. Об определении сопротивления свай по их отказу / К.М. Герсеванов. – Петроград: Типо-Литография С.К. Пентковского, 1917. – 97 с.

References

1. Matveev, I.Yu. Report on the inspection of the technical condition of building structures at the site: «Shlisselburg Fortress "Oreshok"»: Comprehensive scientific research / I.Yu. Matveev, A.O. Popov, D.K. Biryuleva [etc.]. – Kazan: TsTSS LLC "ExpertProjectStroy", 2018.
2. Budylna, E.A. Problems of implementing a systematic approach in the construction industry / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3 (44). – P. 140–145.
3. Garkina, I.A. Unified concept of system design of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1 (38). – P. 119–123.
4. Budylna, E.A. System analysis as a methodology for solving problems / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 2 (55). – P. 14–20.
5. Garkin, I. Systems approach to technical expertise construction of buildings and facilities / I. Garkin, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, No. 5–8. – P. 213–217.
6. Sabitov, L.S. The use of mathematical models to ensure the safe operation of cultural heritage objects / L.S. Sabitov, I.N. Garkin, I.K. Kiyamov, M.K. Sayfetdinova // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2023. – No. 6. – P. 102–105.
7. Onishchik, L.I. Stone structures / L.I. Onishchik. – М.: Stroyizdat, 1939. – 209 p.
8. Lakhtin, N.K. Calculation of arches and vaults / N.K. Lakhtin. – М.: Student Publishing Society at the Imperial Moscow Technical School, 1911. – 290 p.
9. Bernhard, V.R. Arches and vaults / V.R. Bernhard. – St. Petersburg: Institute of Civil Engineers, 1901. – 128 p.
10. Popov, A.O. Strength along normal sections and deformability of brick cylindrical vaults reinforced with carbon canvases / A.O. Popov, I.Yu. Matveev, D.K. Biryuleva // Izvestia KGASU. – 2015. – No. 2 (32). – P. 168–175.
11. Gastev, V.A. About formulas for determining the resistance of piles based on failures / V.A. Gastev // Technology and economics of communications. – 1923. – No. 6. – P. 128–135.
12. Puzyrevsky, N.M. Foundations / N.M. Puzyrevsky. – М.: Gosstroyizdat USSR, 1934. – 516 p.
13. Gersevanov, K.M. On determining the resistance of piles based on their failure / K.M. Gersevanov. – Petrograd: Typo-Lithography S.K. Pentkovsky, 1917. – 97 p.

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

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник научно-
исследовательского сектора
E-mail: ambereg@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

Beregovoy Aleksandr Markovich,
Doctor of Sciences, Professor, Chief
Researcher of the Research Sector
E-mail: ambereg@rambler.ru

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ЧЕРЕЗ НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ В СТАДИИ УВЛАЖНЕНИЯ И ПРОМЕРЗАНИЯ МАТЕРИАЛА

А.М. Береговой

Дан анализ влияния на тепломассоперенос через наружные ограждения плотного фактурного и теплоизоляционного слоев, расположенных соответственно на наружной и внутренней поверхностях конструкций. Такое размещение слоев может привести к значительному ухудшению температурно-влажностного режима конструкций и промерзанию их материала в период резкого похолодания. Выполнена оценка теплопроводности увлажненных капиллярно-пористых материалов в слое с отрицательной температурой и тепловых потерь через такие конструкции. Установлена величина максимальных тепловых потерь через однослойное наружное ограждение из пенобетона, имеющее разные величины тепловой инерции и зону промерзания в период резкого похолодания.

Ключевые слова: наружные ограждения, пенобетон, тепловые потери, увлажнение, промерзание

HEAT LOSSES THROUGH EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES AT THE STAGE OF HUMIDIFICATION AND FREEZING OF THE MATERIAL

A.M. Beregovoy

The analysis of the effect on heat and mass transfer through the external enclosure structures of dense texture and thermal insulation layers, located respectively on the outer and inner surfaces of structures is given. Such arrangement of layers can lead to a significant deterioration of the temperature-humidity regime of structures and freezing of their material during a sharp cooling period. Thermal conductivity of moistened capillary-porous materials in the layer with negative temperature and thermal losses through a such structures are evaluated. The value of maximum heat losses is established through a single-layer external enclosure structure of foam concrete, having different value of thermal inertia and zone of freezing during the period of sharp cold snap.

Keywords: external fences, foam concrete, heat loss, humidification, freezing

Порядок расположения конструктивных слоев оказывает непосредственное влияние на процесс влагонакопления в наружном ограждении, его воздухопроницаемость и распределение температур по его толщине.

Как отмечено в [1], в ограждающей конструкции с плотным наружным слоем и относительно воздухопроницаемой структурой материала минимизируется величина экономайзерного эффекта, обеспечивающего в условиях инфильтрации холодного воздуха экономию тепловой энергии. К тому же в такой конструкции значительно интенсифицируется процесс увлажнения материала при диффузии водяного пара в

холодный период года. Скапливающийся под плотным слоем водяной пар конденсируется, и влага может перейти в твердую фазу в зоне конструкции с отрицательной температурой. Такой процесс фазового перехода влаги приводит к дополнительным теплотерям. Однако в том случае, когда данный слой располагается в ограждении со стороны помещения, в порах и капиллярах материала конденсируется гораздо меньше водяного пара.

Расположение утеплителя в слоистом ограждении оказывает влияние на распределение температур по его толщине. Благоприятный характер температурного поля формируется в конструкции с наружным теплоизоляционным слоем, или когда этот слой находится внутри трехслойного ограждения. При расположении утеплителя на внутренней поверхности ограждения в его массиве могут происходить сложные процессы влагонакопления, сопровождаемые фазовыми переходами влаги и промерзанием материала конструкции в периоды резкого похолодания.

В отличие от практики проектирования, ошибки в расположении конструктивных слоев встречаются при проведении ремонтных работ наружных стен, когда выполняется дополнительное утепление отдельных квартир с внутренней стороны стены с целью сохранения прежнего облика фасада, а также когда производится его отделка плотным фактурным слоем (рис. 1).

С учетом этого была сформулирована задача исследования, которая заключалась в оценке теплопроводности увлажненных капиллярно-пористых материалов в конструктивном слое ограждения с отрицательной температурой, а также в определении величины теплотер через такие конструкции при наступлении низких наружных температур.

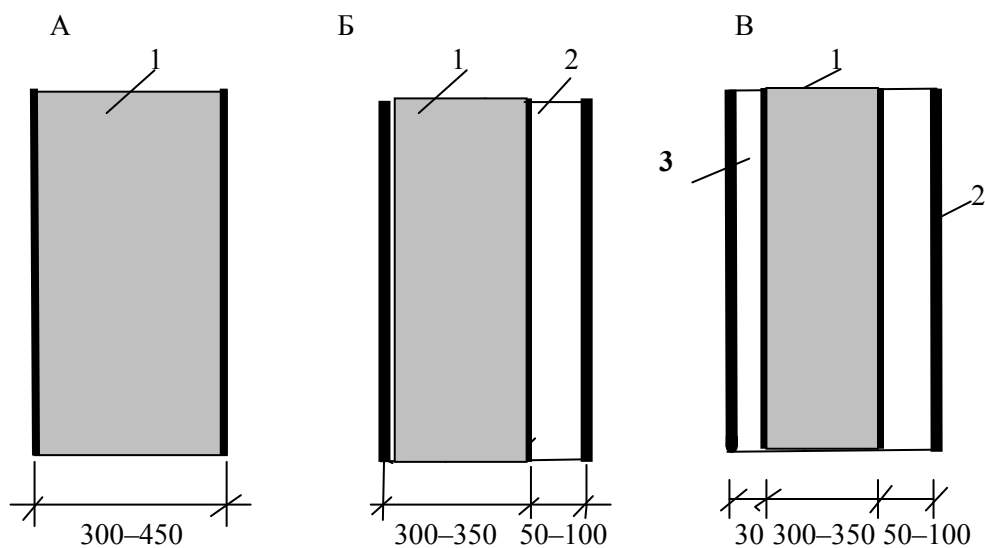


Рис. 1. Ошибочно расположенные дополнительные конструктивные слои (рис.1, Б, В) в однослойной наружной стене при проведении ремонтных работ:

- А – однослойная наружная стена; Б – стена, утепленная с внутренней стороны;
- В – стена с внутренним теплоизоляционным и плотным наружным слоями;
- 1 – ячеистый или легкий бетон; 2 – пенополистирол или минеральная вата;
- 3 – цементно-песчаный раствор с полимерной добавкой

Поставленная задача решалась путем расчетного моделирования с использованием уравнений тепломассопереноса в однослойном наружном ограждении при отрицательной температуре и отсутствии фильтрационного движения:

$$r \cdot i \cdot u_{ж} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{d\delta_3}{dz} = \lambda_3 \cdot \frac{\partial t_3}{\partial x} - \lambda_B \cdot \frac{\partial t_B}{\partial x}; \quad (1)$$

$$\lambda_3 \cdot \frac{t_3 - t_H}{\delta_3} - \lambda_B \cdot \frac{t_B - t_3}{\delta - \delta_3} = 0; \quad (2)$$

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_B (t_B - t_3) \cdot \delta_3}{(t_3 - t_H) \cdot (\delta - \delta_3)}; \quad (3)$$

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + R_3 + R_B + \frac{1}{\alpha_H}; \quad (4)$$

$$R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3}; \quad R_B = \frac{\delta - \delta_3}{\lambda_B}. \quad (5)$$

Для условий стационарной теплопередачи и при рассмотрении мерзлой и влажной зон как отдельных слоев ограждения находились: коэффициент теплопроводности λ_3 материала мерзлой зоны конструкции, ее общее сопротивление теплопередаче R_0 , сопротивление теплопередаче мерзлой R_3 и влажной R_B зон, а также величина тепловых потерь через 1 м^2 такого ограждения при максимальной глубине зоны промерзания.

Расчеты производились для конструкций, имеющих сопротивление теплопередаче $1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ и находящихся в состоянии превышения предельного сорбционного увлажнения материала при температурах воздуха у наружных и внутренних поверхностей соответственно -25 и $+20^\circ\text{C}$.

С целью использования расчётной модели для широкого круга конструктивных материалов было выполнено [2]:

- сравнение найденных значений коэффициента теплопроводности материалов во влажной и мерзлой зонах конструкций с экспериментальными данными, полученными в НИИ строительной физики;

- определение поправочных коэффициентов, которые позволили достигнуть наименьших отклонений от экспериментальных данных при выполнении расчетов. Так, для пенобетона, шлакобетона, керамзитобетона, пеносиликальцита, кирпича глиняного обыкновенного и силикатного они в зависимости от их плотности составили величины соответственно 1,25 и 1,35; 1 и 1,2; 1 и 1,1; 0,8 и 0,8; 0,6 и 0,75.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости коэффициента теплопроводности пенобетона и тепловые потери через наружные ограждения из исследованных капиллярно-пористых материалов.

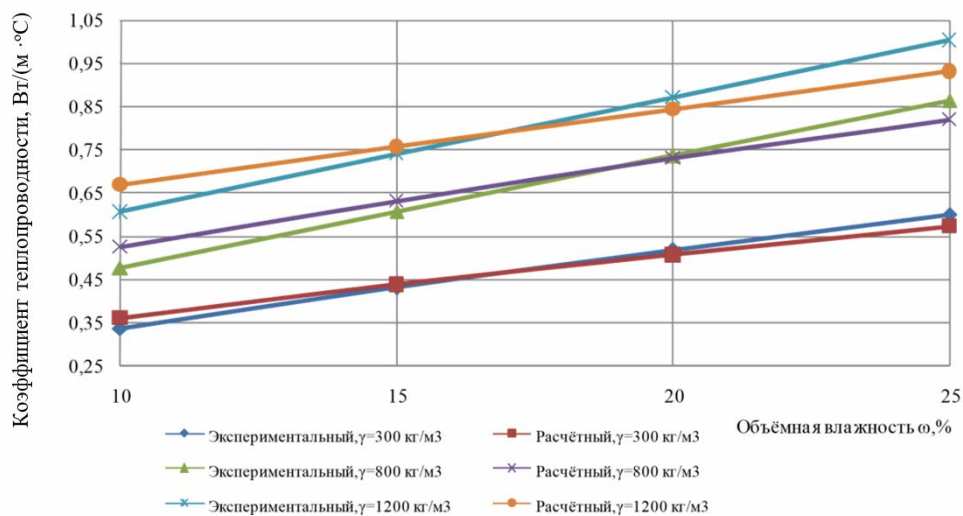


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности и плотности пенобетона с учетом поправочных коэффициентов

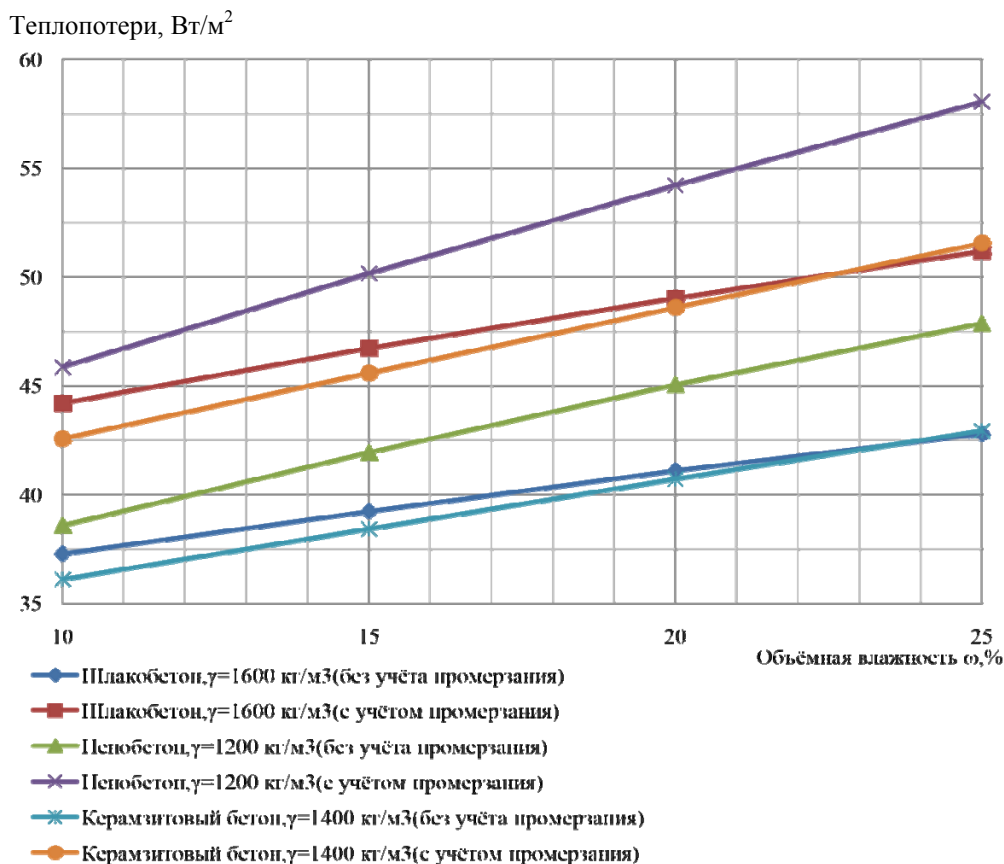


Рис. 3. Зависимость теплопотерь от объёмной влажности и плотности различных видов бетона

В табл. 1 показаны сопротивление теплопередаче R , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, конструкции стены из пенобетона и тепловые потери Q , $\text{Вт}/\text{м}^2$, через нее при введении поправочного коэффициента с учётом и без учёта влияния промерзания материала (соответственно Q_p и Q), имеющего плотность γ и объёмную влажность ω , %.

Т а б л и ц а 1

Значения R и Q для конструкции стены из пенобетона с учетом поправочного коэффициента

γ , $\text{кг}/\text{м}^3$	ω , %	R	R_p	$R_{\text{эк}}$	Q	Q_p	$Q_{\text{эк}}$
300	10	1,277	0,965	0,991	35,24	46,63	45,41
	15	1,128	0,842	0,847	39,89	53,44	53,13
	20	1,018	0,760	0,755	44,20	59,21	59,60
	25	0,937	0,698	0,688	48,03	64,47	65,41
800	10	1,229	0,957	0,991	36,62	47,02	45,41
	15	1,092	0,839	0,851	41,21	53,64	52,88
	20	0,994	0,759	0,757	45,27	59,29	59,45
	25	0,918	0,701	0,690	49,02	64,19	65,22
1200	10	1,166	0,945	0,983	38,59	47,62	45,78
	15	1,073	0,865	0,872	41,94	52,02	51,61

П р и м е ч а н и е. R и Q – сопротивление теплопередаче конструкции стены и теплопотери через нее в обычных условиях эксплуатации; R_p и $R_{\text{эк}}$ – расчетные и экспериментальные значения сопротивлений теплопередаче конструкции стены с учетом промерзания материала; Q_p и $Q_{\text{эк}}$ – расчетные и экспериментальные значения теплопотерь через конструкцию с учетом промерзания материала.

Анализ результатов исследований, представленных на рис. 2, 3 и в табл.1, показал, что при наличии зоны промерзания в наружном ограждении происходит увеличение

тепловых потерь, которое для конструкций с использованием следующих материалов в зависимости от их плотности $\gamma, \text{кг/м}^3$, и влажности $\omega, \%$, достигает следующих значений:

- пенобетон 25,3 % ($\gamma=300$ и $\omega=20$); 19,4 % ($\gamma=1200$ и $\omega=15$);
- шлакобетон 22,3 % ($\gamma=900$ и $\omega=20$); 16,3 % ($\gamma=1600$ и $\omega=20$);
- керамзитобетон 19,1 % ($\gamma=1200$ и $\omega=20$), 16 % ($\gamma=1600$ и $\omega=20$);
- пеносиликальцит 23,4 % ($\gamma=400$ и $\omega=20$); 20,6 % ($\gamma=1200$ и $\omega=20$);
- кирпич глиняный обыкновенный 8,3 % ($\gamma=1700$ и $\omega=15$), 9,7 % ($\gamma=1900$ и $\omega=15$);
- силикатный кирпич 9,2 % ($\gamma=1700$ и $\omega=15$); 4,2 % ($\gamma=2000$ и $\omega=10$).

В [3] рассматривается определение максимальных тепловых потерь Q^{\max} через наружное ограждение в период резкого похолодания в зависимости от тепловой инерции D конструкции. С учетом полученных результатов исследования определено приблизительное увеличение показателя Q^{\max} при наличии зоны промерзания в ограждении из пенобетона в данный период эксплуатации (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Величина $Q^{\max}, \text{Вт/м}^2$, для стен из пенобетона ($R=3,57 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$), имеющих тепловую инерцию D , в обычных условиях эксплуатации Q^{\max} и с учетом промерзания материала $Q_{\text{пр}}^{\max}$

Максимальные тепловые потери	Тепловая инерция D конструкции наружной стены			
	2,39	1,73	1,17	0,70
Q^{\max}	10,95	12,27	13,45	14,44
$Q_{\text{пр}}^{\max}$	13,07...13,72	14,65...15,37	16,06...16,85	17,24...18,09

Таким образом, результаты исследования показали, что при наличии зоны промерзания в наружном ограждении из принятых материалов увеличение тепловых потерь через него по сравнению с обычными условиями эксплуатации в зависимости от плотности материала и его влажности может быть в пределах 5 ...25 %.

В период резкого похолодания происходит еще больший рост тепловых потерь $Q_{\text{пр}}^{\max}$ через конструкции с зоной промерзания, который особенно заметен с уменьшением их тепловой инерции D . Так, для таких ограждений из пенобетона при уменьшении показателя D с 2,4 до 0,7 тепловые потери увеличиваются на 28 %.

Список литературы

1. Береговой, А.М. Ограждающие конструкции с регулируемыми параметрами теплопереноса / В.А. Береговой, А.В. Гречишкин, А.В. Воскресенский // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 1. – С.97–101.
2. Мальцев, А.В. Влияние теплопроводности материала наружных ограждений в стадии увлажнения и промерзания на энергоэффективность зданий / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №1. – С. 57–61.
3. Береговой, А.М. Теплотехнические свойства наружных ограждений в условиях жаркого и холодного климата / В.А. Береговой, Ю.П. Скачков // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4. – С. 123–127.

References

1. Beregovoy, A.M. The enclosure structures with adjustable parameters of heat and mass transfer / V.A. Beregovoy, A.V. Grechishkin, A.V. Voskresenskiy // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 1. – С.97–101.
2. Maltsev A.V. Influence of thermal conductivity of the material of external enclosure structures in the stage of moisture and freezing on energy efficiency in buildings / A.V. Maltsev, A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, M.A. Derina // Regional architecture and engineering. – 2013. – No. 1. – P. 57–61.
3. Beregovoy, A.M. Thermotechnical properties of external enclosure structures in the conditions of hot and cold climate / V.A. Beregovoy, Ju.P. Scachkov // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 4. – P. 123–127.

УДК 728.1

DOI 10.54734/20722958_2023_4_211

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

Смирнова Юлия Олеговна,

кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Экспертиза и управление
недвижимостью»
E-mail: ulaol@mail.ru

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, г. Москва,
ул. Ярославское шоссе, д.26,
тел.: +7 (495) 781-24-86

Кулаков Кирилл Юрьевич,

доктор экономических наук, профессор
кафедры «Организация строительства
и управление недвижимостью»
E-mail: KulakovKYU@mgsu.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

Smirnova Yulia Olegovna,

Candidate of Economic Sciences, Associate
Professor of the Department «Expertise and
Real Estate Management»
E-mail: ulaol@mail.ru

*National Research Moscow State University
of Civil Engineering*

Russia, 129337, Moscow,
26, Yaroslavskoe highway,
tel.: +7 (495) 781-24-86

Kulakov Kirill Yurievich,

Doctor of Economics, Professor of the
Department «Construction Organization and
Real Estate Management»
E-mail: KulakovKYU@mgsu.ru

Публикация выполнена в рамках реализации гранта Российского
Научного Фонда №22-28-20511 «Устойчивое развитие территорий
на основе эколого-ориентированных жизненных циклов объектов капитального
строительства в информационных системах как институциональный инструмент
экономического роста» (<https://rscf.ru/project/22-28-20511/>).

МОДЕРНИЗАЦИЯ И РЕНОВАЦИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ КАЧЕСТВА СРЕДЫ

Ю.О. Смирнова, К.Ю. Кулаков

Предложен теоретико-методический подход к выбору механизма модернизации и реновации жилищного фонда на стадии эксплуатации с целью снижения эксплуатационных затрат. Указаны способы повышения пригодности вторичного жилищного фонда на основе выбора оптимального варианта модернизации и реконструкции. Приведена методика оценки технической возможности реализации реконструктивных мероприятий.

Ключевые слова: жилые здания, качество среды, модернизация, реновация, устойчивое развитие

MODERNIZATION AND RENOVATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS BASED ON MODERN REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENVIRONMENT QUALITY

Yu.O. Smirnova, K.Yu. Kulakov

A theoretical and methodological approach to choosing a mechanism for modernizing and renovating the housing stock at the operation stage is proposed in order to reduce operating costs. Methods for improving the suitability of the secondary housing stock are indicated based on the choice of the optimal option for modernization and reconstruction. The methodology for assessing technical feasibility of reconstructive measures is presented.

Keywords: residential buildings, modernization, renovation, quality of environment, sustainable development

Значительная доля жилищного фонда Российской Федерации сконцентрирована в крупных городах. В силу специфики пространственного, исторического и социально-экономического развития в структуре жилищного фонда преобладает вторичное жилье. Показателем устойчивого развития качества окружающей городской среды является комфортность и энергоэффективность жилищного фонда, которые достигаются следующими основными способами: капитальный ремонт, реконструкция, модернизация и реновация. Эти мероприятия направлены на продление жизненного цикла жилищного фонда и повышение комфортности и пригодности проживания в нем. Проблема концепции устойчивого развития применительно к процессам воспроизводства жилого фонда в системе жилищно-коммунального хозяйства связана с высокой степенью изношенности зданий и сооружений, а также низкой эффективностью управления реновационными процессами. Основная сложность заключается в действии двух взаимоисключающих тенденций: во-первых, это приоритет экономии и сокращения всех затрат, связанных с владением жилой недвижимостью (для субъектов владения), реализацией процессов реновации жилого фонда при текущем и капитальном ремонте, а также потреблением услуг предприятий жилищно-коммунального хозяйства; во-вторых, это приоритет увеличения требований к качеству выполняемых работ в ходе реновации жилья в части применения энергоэффективных решений, экологичности, зелени, комплексности, технологичности и инновационности всех мероприятий по воспроизводству жилой недвижимости, что приводит к увеличению стоимости затрат на реновацию и рост стоимости владения жильем.

Была произведена оценка уровня реализации региональной адресной программы «Переселение граждан из аварийного жилищного фонда на территории Пензенской области в 2019–2025 годах», в рамках которой по состоянию на 01.01.2022 расселено 1372 человека (128,2 % к плану) из 20 тыс. кв. м аварийного жилья (104,2 %). Оценка позволила выявить уровень физического состояния элементов и конструкций жилого фонда г. Пензы с точки зрения устойчивой эксплуатации на примере программ реновации с целью определения способа его устойчивого воспроизводства. Структура возрастного состава жилищного фонда г. Пензы и Пензенской области представлена на рис. 1.

Исследования организации и проведения работ в региональных программах капитального ремонта и реновации, изучение работы региональных фондов и управляющих компаний показали, что одной из существующих проблем реализации энергосберегающих мероприятий является отсутствие объемов целевого финансирования и комплексности проведения работ отдельного жилого фонда. Соответственно, при увеличении степени износа и ветхости жилья увеличиваются и инвестиции в модернизацию и реконструкцию жилищного фонда.

Выяснилось, что для существующего жилищного фонда характерны отклонения от нормальных условий эксплуатации и множественные дефекты: протечка кровель, промерзание стен, разгерметизация стыков, швов, чрезмерные прогибы перекрытий. Вместе с тем массовая реновация вторичного жилищного фонда, имеющего высокую остаточную стоимость, нецелесообразна, так как потребует затрат не только на утилизацию отходов, очистку территории, но и на инвестиции в новое строительство. Наиболее экономически выгодным вариантом сохранения жилого фонда являются плано-предупредительные ремонты в сочетании с реализацией энергосберегающих мероприятий. Расходы на содержание имущества и плано-предупредительные ремонты на примере многоквартирных жилых домов средней этажности сведены в табл. 1.

Также была произведена оценка уровня критериальной устойчивости среды проживания, которая позволила определить ветхость жилищного фонда. Для оценки инвестиционной привлекательности проектов выполнения реконструкции и модернизации жилищного фонда применен метод регрессионного анализа; она производилась на примере ряда ветхих домов г. Пензы, расположенных в разных районах города (табл. 2).

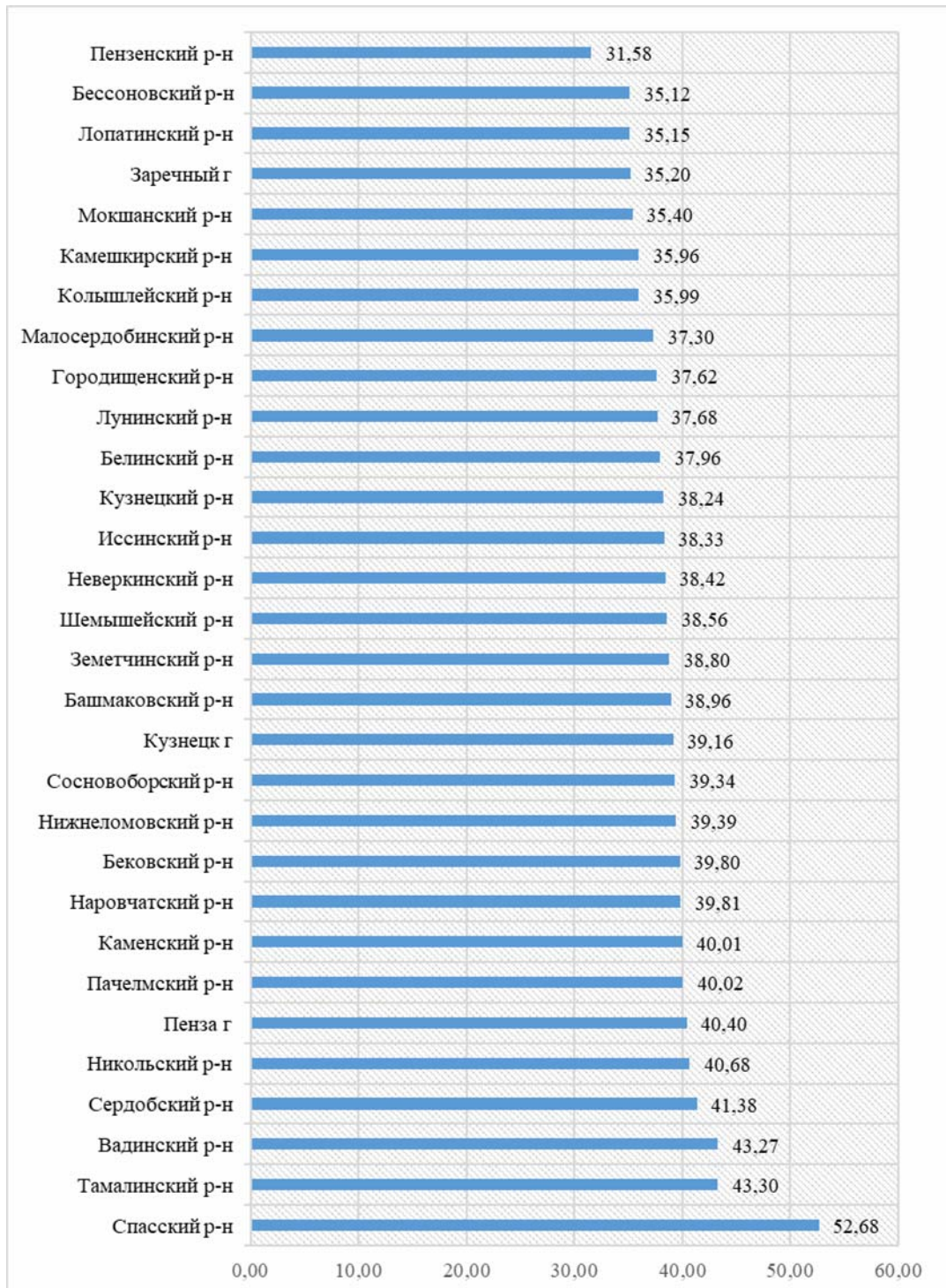


Рис. 1. Структура аварийного жилищного фонда (по годам постройки), %

Т а б л и ц а 1

Расходы на содержание общего имущества в МКД, тыс. руб.

Наименование	Ед. изм.	Значение
Расходы на содержание общего имущества в МКД, тыс. руб. в год, в том числе:	тыс. руб.	1 117,00
содержание конструкций	тыс. руб.	1 117,00
содержание оборудования и систем инженерно-технического обеспечения	тыс. руб.	
содержание иного общего имущества в МКД	тыс. руб.	
сумма за 30 лет (в текущих ценах и без дисконтирования)	тыс. руб.	33 510,00
Среднегодовой темп роста цен (инфляция) за период	%	6 %
Коэффициент роста цен за период		5,7435
Фактор дисконтирования R		11,2578
Сумма расходов на содержание общего имущества с учетом поправок (за 30 лет)		72 224,08

Т а б л и ц а 2

Оценка пригодности для проживания вторичного жилищного фонда г. Пензы с точки зрения показателей качества среды

Наименование опасного фактора	Значение норматива(ПДК)	Замер выше (ПДК)	Замер ниже (ПДК)
<i>Выборка 1: критерий – этажность 3–5 этажей</i>			
Уровень шума	80дБА	49,9 дБА	94,1 дБА
Общая вибрация	115ДБ	128,4 ДБ	89,9 ДБ
Относительная влажность воздушного пространства	15-60 %	38,0 %	38,0 %
Температура окружающей среды, помещения	16-25°C	15,1°C	15,1°C
<i>Выборка 2: критерий – этажность 5–9 этажей</i>			
Уровень шума	80дБА	100,8 дБА	52,3 дБА
Общая вибрация	115ДБ	140,0 ДБ	77,7 ДБ
Относительная влажность воздушного пространства	15-60 %	36,0 %	36,0 %
Температура окружающей среды, помещения	16-25°C	15,7°C	15,7°C

Таким образом, выборку 1 типа рассматриваемого жилого фонда относим к 1-й степени ветхости: дома подлежат модернизации и капитальному ремонту. Здания второго типа относим ко 2-й степени ветхости: они подлежат реконструкции с модернизацией. Расчет выбора оптимального варианта модернизации позволит сократить затраты на переселение жителей из ветхого жилья, снизить долю аварийного жилья за счет своевременных проектных решений, повысить комфортность жилищного фонда, обеспечить экономию энергетических ресурсов за счет изменения класса энергоэффективности и улучшения теплозащитной способности ограждающих конструкций. Результаты прогнозных значений удельных показателей тепловой энергии оптимального варианта энергоэффективных проектов показаны в табл. 3.

Прогнозные значения удельных показателей тепловой энергии оптимального варианта энергоэффективных проектов при применении различных строительных материалов в случаях модернизации и реновации

Наименование характеристики	3-х этажный кирпичный дом (аварийный, типовой)	4-х этажный кирпичный дом (аварийный, типовой)	5-этажный кирпичный дом (аварийный, типовой)	4-этажный панельный дом (аварийный, типовой)	5-этажный панельный дом (аварийный, типовой)	9-этажный панельный дом (аварийный, типовой)
1	2	3	4	5	6	7
Требуемое мероприятие согласно данным теплотехнического и критерияльного расчета	Модернизация и капитальный ремонт	Модернизация и капитальный ремонт	Модернизация и капитальный ремонт	Модернизация и капитальный ремонт	Модернизация и капитальный ремонт	Модернизация и капитальный ремонт
Удельный расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период, кВт·ч/(м ³ ·год)	225,4	162,3	149,8	116,3	143,9	131,7
Расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период, кВт·ч/год	257411	420619	572593	515001	666258	16209645
Общие теплотери здания за отопительный период, кВт·ч/год	305860	498698	719610	667452	811153	1273085
Класс энергетической эффективности до реализации мероприятий	Е (низкий)	D- (пониженный)	D- (пониженный)	Е (низкий)	С- (пониженный)	D- (пониженный)
Удельный расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период после реализации энергосберегающих мероприятий, кВт·ч/(м ³ ·год)	130,2	69,6	82,4	62,5	162,3	93,5
Расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период после реализации энергосберегающих мероприятий, кВт·ч/год	148677	180505	315037	276717	420454	1150958
Общие теплотери здания за отопительный период после реализации энергосберегающих мероприятий, кВт·ч/год	198606	258584	453211	429168	561468	803080
Экономия платы за отопление в 2023 г., тыс.руб.	172,995	232,962	350,370	324,153	453,816	747,779
Экономия платы за отопление в 2023 г., %	42	57	45	46	58	29

1	2	3	4	5	6	7
Класс энергетической эффективности до реализации мероприятий	D (пониженный для существующих зданий)	D (пониженный для существующих зданий)	D (пониженный для существующих зданий)	D (пониженный для существующих зданий)	D (пониженный для существующих зданий)	D (пониженный для существующих зданий)
Класс энергетической эффективности после реализации мероприятий	C- (нормальный для существующих зданий)	A- (повышенный)	B+ (высокий)	B+ (высокий)	B+(высокий)	«B+» (высокий)
Затраты на реализацию, руб.	3183886	3177000	3832907,79	4844645,38	4256128,63	6 293 00

Одной из задач органов государственной власти и местного самоуправления крупных городов является создание условий для своевременной модернизации и реконструкции вторичного жилищного фонда. В настоящее время существуют положительные примеры регионов, которые успешно внедрили механизмы реализации энергосберегающих мероприятий. Опыт реализации проектов реновации и модернизации жилищного фонда в регионах РФ с применением различных строительных материалов представлен на рис. 2.

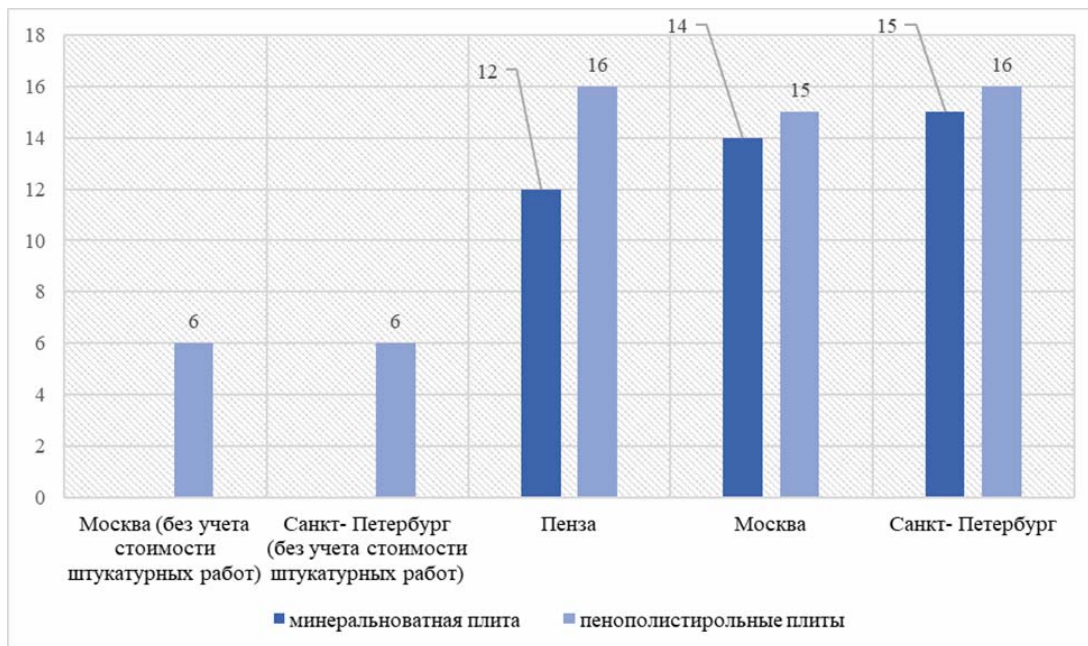


Рис. 2. Прогнозные сроки окупаемости энергоэффективных проектов по модернизации и реновации жилищного фонда с применением различных строительных материалов в разрезе субъектов РФ

Согласно проведенному расчету одним из способов снижения потерь тепловой энергии на отопление является дополнительное утепление наружных ограждающих конструкций (стен, покрытий, чердачных перекрытий, наружных дверей и пр.). Утепление дома может быть осуществлено путем монтажа вентилируемого фасада из металлического сайдинга с теплоизолирующим слоем полиалюмината, а также с использованием системы, представляющей собой минераловатные плиты, наколотые на специальные кронштейны из нержавеющей стали. Поверх плит на тех же кронштейнах фиксируется сварная сетка из оцинкованной стальной проволоки, на которую нано-

сятся грунтовочный и выравнивающий штукатурные слои, а затем отделочная цементно-песчаная штукатурка; также хорошие результаты показывает обшивка и утепление балконов. В том случае, если период окупаемости окажется меньше предполагаемого срока службы или эксплуатации внедренного технического решения, его следует признать еще и экономически целесообразным. Улучшения теплозащитной способности ограждающих конструкций при комплексном их утеплении приводит к уменьшению потребляемой в здании энергии и, следовательно, к сокращению платежей за отопление и затрат на эксплуатацию и модернизацию зданий.

Выводы

1. Предложена методика модернизации и реновации жилых зданий для устойчивого развития качества среды энергоэффективного здания с учетом тепловой защиты и энергетических потребностей жилого здания. Проектное решение позволит повысить теплозащитную способность ограждающих конструкций и сформировать благоприятный микроклимат в жилых помещениях за счет оценки уровня критериальной устойчивости среды.

2. Комплексное планирование мероприятий по реконструкции и модернизации жилищного фонда позволит сократить эксплуатационные затраты за счет выбора варианта проектного решения и повысить комфортность жилищного фонда.

Список литературы

1. Baronin, S. Development of life cycle valuation with priority of national projects and energy efficiency / S. Baronin, K. Kulakov // E3S Web of Conferences, Rostov-on-Don, 20–23 октября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 07006. – DOI 10.1051/e3sconf/202021707006. – EDN DZDAAK.

2. Теличенко, В.И. Экологическая безопасность строительства в России: реальность и перспективы / В.И. Теличенко, А.А. Бенуж, Е.П. Глотова // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук. Том 2. – М.: АСВ, 2022. – С. 441–449. – EDN СВИYVG.

3. Береговой, А.М. Подходы к разработке архитектурно-строительного решения энергоэффективного здания / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 3(52). – С. 213–217. – DOI 10.54734/20722958_2022_3_213. – EDN BERNXC.

4. Будылина, Е.А. Проблемы реализации системного подхода в строительной отрасли / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3(44). – С. 140–145. – EDN VAZQXC.

5. Гарькина, И.А. Системный анализ в управлении свойствами материалов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3(48). – С. 63–68. – EDN CYWACO.

6. Кулаков, К.Ю. Особенности формирования и развития методологии оценки стоимости жизненных циклов в российской экономике / К.Ю. Кулаков // Экономические стратегии. – 2019. – Т. 21, № 3(161). – С. 78–87. – DOI 10.33917/es-3.161.2019.78-87. – EDN ZMNEEI.

7. Кулаков, К.Ю. Влияние изменений параметров микроклимата на самочувствие человека и эксплуатационные характеристики строительных конструкций / К.Ю. Кулаков, Е. М. Егорова // Московский экономический журнал. – 2019. – № 6. – С. 18. – EDN ZLZHJS.

8. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. Серия «Системы и проблемы управления» / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.

9. Стяжкова, Н.М. Концептуальное моделирование земельного рынка устойчивого и гармонического типа развития / Н.М. Стяжкова, С.А. Баронин, К.Ю. Кулаков //

Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. – 2022. – № 11. – С. 176–180. – EDN SWVTTW.

10. Смирнова, Ю.О. Стратегии устойчивой реновации в сфере строительства: механизмы энергосбережения / Ю.О. Смирнова, К.П. Грабовый // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4(53). – С. 181–186. – DOI 10.54734/20722958_2022_4_181. – ЭДН ВНБИПИ.

References

1. Baronin, S. Development of life cycle valuation with priority of national projects and energy efficiency / S. Baronin, K. Kulakov // E3S Web of Conferences, Rostov-on-Don, 20–23 октября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 07006. – DOI 10.1051/e3sconf/202021707006. – EDN DZDAAK.

2. Telichenko, V.I. Environmental safety of construction in Russia: reality and prospects/V.I. Telichenko, A.A. Benuzh, E.P. Glotova // Fundamental, search and applied research RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021: Collection of scientific works RAASN / Russian Academy of Architecture and building sciences. Vol. 2. – М.: DIA Publishing House, 2022. – P. 441–449. – EDN CBIYVG.

3. Beregovoy, A.M. Approaches to the development of an architectural and construction solution for an energy-efficient building / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy // Regional architecture and engineering. – 2022. – № 3(52). – P. 213–217. – DOI 10.54734/20722958_2022_3_213. – EDN BERHXC.

4. Budylna, E.A. Problems of implementing a systematic approach in the construction industry / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2020. – № 3(44). – P. 140–145. – EDN VAZQXC.

5. Garkina, I.A. System analysis in material property management / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 3(48). – P. 63–68. – EDN CYWACO.

6. Kulakov, K.Yu. Features of the formation and development of a methodology for assessing the cost of life cycles in the Russian economy / K.Yu. Kulakov // Economic strategies. – 2019. – Vol. 21, 3 (161). – P. 78–87. – DOI 10.33917/es-3.161.2019.78-87. – EDN ZMNEEI.

7. Kulakov, K.Yu. Influence of changes in microclimate parameters on human well-being and operational characteristics of building structures / K.Yu. Kulakov, E.M. Egorova // Moscow Economic Journal. – 2019. – № 6. – P. 18. – EDN ZLZHJS.

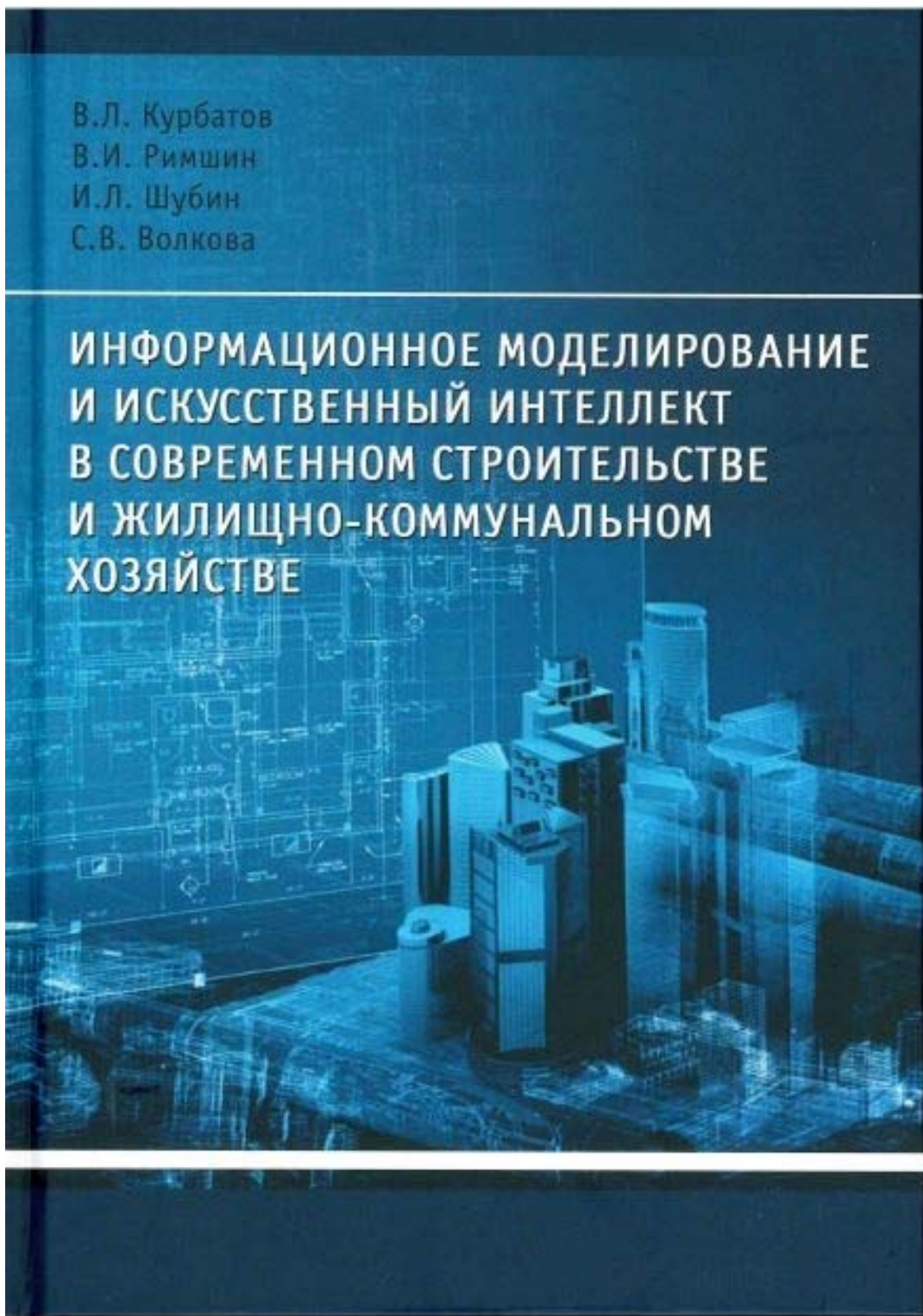
8. Prangishvili, I.V. System approach and system-wide patterns. Series «Control Systems and Problems» / I.V. Prangishvili. – М: SINTEG, 2000. – 528 p.

9. Styazhkova, N.M. Conceptual modeling of the land market of a sustainable and harmonic type of development / N.M. Styazhkova, S.A. Baronin, K.Yu. Kulakov // Competitiveness in the global world: economics, science, technology. – 2022. – № 11. – P. 176–180. – EDN SWVTTW.

10. Smirnova, Yu.O. Strategies for sustainable renovation in the field of construction: energy saving mechanisms / Yu.O. Smirnova, K.P. Grabovy // Regional architecture and engineering. – 2022. – № 4(53). – P. 181–186. – DOI 10.54734/20722958_2022_4_181. – EDN VNBIP.

В.Л. Курбатов
В.И. Римшин
И.Л. Шубин
С.В. Волкова

**ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ
ХОЗЯЙСТВЕ**



Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации
Национальное объединение строителей
Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры
и строительных наук

Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно- коммунальном хозяйстве

Под общей редакцией членов-корреспондентов Российской академии архитектуры и строительных наук,
заслуженных строителей Российской Федерации И.Л. Шубина, В.И. Римшина

Рекомендовано Российской академией архитектуры и строительных наук в качестве учебного пособия
для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлениям
подготовки 08.03.01 «Строительство» (уровень бакалавриата) и 08.04.01 «Строительство» (магистратуры)



Издательство АСВ

Москва

2023

УДК 69:4.008:4.009

ББК
К93

Рецензенты:

В.И. Теличенко – академик РААСН, д.т.н., профессор, первый вице-президент Российской академии
архитектуры и строительных наук;

В.С.Федоров – академик РААСН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой
строительных конструкций, зданий и сооружений
Института пути, строительства и сооружений ФГАОУ ВО
Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ));

С.И. Меркулов – член-корреспондент РААСН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой промышленного и
гражданского строительства Курского государственного университета

Курбатов, В.Л.

К93 Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и
жилищно-коммунальном хозяйств: учебн. пособие / В.Л. Курбатов, В.И. Римшин, И.Л. Шубин,
С.В. Волкова. – Москва: Издательство АСВ, 2023. – с.

Изложены принципы информационного моделирования в строительстве. Освещены современные
технологии информационного моделирования, описана уже действующая и дополнительно необходимая
нормативная правовая база, определяющая порядок разработки и применения информационной модели
на территории Российской Федерации. Рассмотрены основные этапы и состав мероприятий при
разработке проектной документации с применением информационного моделирования.

Предназначено для бакалавров, магистров и преподавателей вузов, обучающихся по Федеральному
государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования, а также для
работников предприятий строительства и жилищно-коммунального комплекса.

Рекомендовано Российской академией архитектуры и строительных наук в качестве учебного пособия
для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлениям
подготовки 08.03.01 «Строительство» (уровень бакалавриата) и 08.04.01 «Строительство» (уровень
магистратуры).

Указатель статей, опубликованных в 2023 году

Index of articles, published in 2023

1. **Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К.** Исследование точности спутникового позиционирования в строительстве. – №2(55). – С.128–133.
2. **Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К.** Сравнительный анализ современных геодезических методов определения координат в реальных условиях на строительной площадке. – №1(54). – С.129–136.
3. **Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Елистраткин М.Ю.** Оптимизация параметров изготовления вяжущего из цитрогипса. – №3(56). – С.29–42.
4. **Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В.** Методика расчета величины удельной окислительной способности мелкопузырчатой пневматической системы аэрации. – №3(56). – С.152–158.
5. **Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В.** Новая методика расчета перемешивающих эрлифтных устройств, работающих в динамическом режиме. – №4(57). – С.169–175.
6. **Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В.** Теоретические основы расчета процесса работы пневматических мелкопузырчатых аэраторов. – №3(56). – С.159–166.
7. **Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В.** Теоретические основы процессов всплывания в чистой воде пузырьков воздуха и тонкостенных сферических тел. – №4(57). – С.159–168.
8. **Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В.** Биологическая очистка сточных вод на основе использования свободноплавающих в аэрационном объеме аэробных микроорганизмов. – №1(54). – С.148–155.
9. **Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Князев В.А.** Принципы вихревой микрофлюидики для интенсификации разделения газовых смесей в высокоградиентном центробежном поле. – №2(55). – С.106–116.
10. **Андреев С.Ю., Салмин С.М., Лебединский К.В.** Интенсификация процесса биологической очистки сточных вод за счет использования технологического приема гидравлического секционирования. – №1(54). – С.137–147.
11. **Антропов Д.В., Рассказова А.А., Акимова М.С., Карбанова Н.Ю.** Планирование социальной инфраструктуры городского землепользования нормативным методом. – №2(55). – С.147–156.
12. **Арискин М.В., Залилов И.В.** Аддитивные технологии в изготовлении шайб соединений деревянных конструкций. – №3(56). – С.144–151.
13. **Артюшин Д.В., Коновалов П.В.** Соппротивление монолитных узлов сопряжения колонн и балок многоэтажных каркасов зданий. – №1(54). – С.99–107.
14. **Баранов А.С.** Поиск решения проблемы производства изделий из гиперпрессованного бетона. – №4(57). – С.12–20.
15. **Бенаи Х.А., Радионов Т.В., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.** Архитектурная оптимизация проектных решений. – №4(57). – С.191–198.
16. **Береговой А.М.** Возобновляемые источники энергии и утилизация теплового потока помещений при регулировании воздухообмена. – №2(55). – С.142–146.

-
17. **Береговой А.М.** Тепловые потери через наружные ограждения в стадии увлажнения и промерзания материала. – №4(57). – с.206–210.
 18. **Бикаева Ю.В., Ибрагимов Р.А.** Состояние и тенденции развития магниезальных вяжущих на основе низкосортного доломитового сырья. – №1(54). – С.52–64.
 19. **Бодяков А.Н., Маркова И.Ю., Логвиненко А.А., Боцман Л.Н., Огурцова Ю.Н.** Свойства металлургического шлака, стабилизированного в промышленных условиях. – №2(55). – С.44–51.
 20. **Бочарова Е.С., Селютин Л.Ф.** Информационное моделирование стропильных систем зданий постройки середины XX века. – №3(56). – С.128–135.
 21. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Аналитико-синтетический подход к разработке материалов. – №1(54). – С.46–51.
 22. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Идентификация и экспертиза сложных систем. – №4(57). – С.21–29.
 23. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Имитационное моделирование сложных систем. – №3(56). – С.43–48.
 24. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Математические задачи системного анализа при синтезе композитов. – №1(54). – С.71–84.
 25. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Системный анализ как методология решения проблем. – №2(55). – С.14–20.
 26. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Системный анализ: математические основы синтеза композиционных материалов. – №2(55). – С.30–43.
 27. **Ветренко Т.Г., Чеснокова Т.В., Логинова С.А.** Биостойкость цементных строительных композитов. – №3(56). – С.85–90.
 28. **Гильдина Т.А.** Архитектура церквей Глазовского уезда Вятской губернии конца XVIII – начала XX века. – №3(56). – С.202–210.
 29. **Глухов В.С., Панкина М.В., Вишнякова Ю.С.** Формирование околосвайного грунтового основания. – №4(57). – С.122–126.
 30. **Гречишкин А.В., Антонов А.И., Леденев В.И., Путинцева А.А.** Отраженный транспортный шум на примыкательной территории с малоэтажной застройкой. – №3(56). – С.194–201.
 31. **Гришин Б.М., Бикунова М.В., Салмин С.М.** Оценка окислительной способности активного ила, обработанного в электрическом поле. – №1(54). – С.121–128.
 32. **Гришина А.Н., Королев Е.В.** Био- и химическая стойкость наномодифицированного композиционного цементного камня, содержащего гидросиликаты металлов. – №1(54). – С.4–14.
 33. **Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Сазонова М.А.** Перепланировка жилых зданий при реконструкции: оптимизация и последовательность проектирования. – №1(54). – С.196–202.
 34. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А.** Результаты экспериментальных исследований профилей температурных и скоростных полей в свободном пространстве вытяжного зонта. – №2(55). – С.117–127.
 35. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А.** Формирование потока воздуха в стокоприемном отверстии и в зоне свободного пространства вытяжного зонта. – №1(54). – С.156–168.
 36. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А.** Методологические основы исследования параметров потока воздуха в зоне всасывания вытяжного зонта. – №3(56). – С.167–179.
 37. **Еремкин А.И., Фильчакина И.Н., Мишин А.А., Фильчакин Н.С.** Низкоскоростной пластинчатый воздухораспределитель для подачи приточного воздуха в нижнюю зону помещений с теплоизбытками. – №4(57). – С.184–190.
 38. **Ермаков А.А., Родин А.И., Ерофеев В.Т.** Влияние химического и минералогического состава пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород на ее химическую стойкость. – №2(55). – С.4–13.

39. **Комаров В.А., Ласьков С.Н.** Сборно-монолитные узлы сопряжения несущих конструкций каркасов многоэтажных зданий: особенности деформирования, трещинообразования и разрушения. – №3(56). – С.136–143.
40. **Корнеев А.А., Ратькова Е.И., Селютина Л.Ф.** Анализ состояния и возможностей сохранения объекта культурного наследия в Повенце. – №1(54). – С.186–195.
41. **Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Егоров А.Ю., Шестернин А.И.** Свойства самоуплотняющегося бетона, изготовленного с применением продуктов переработки бетонного лома. – №4(57). – С.114–121.
42. **Королев Е.В., Беленцов Ю.А.** Применение теории информации в решении задач строительного материаловедения. – №3(56). – С.13–28.
43. **Кочергина М.П., Иващенко Ю.Г., Страхов А.В., Тимохин Д.К.** Электронно-микроскопические исследования модифицированных силикатнатриевых композиций. – №4(57). – С.5–11.
44. **Кочеткова М.В.** Эффективность проектирования ростверков под колонну на основе каркасно-стержневой модели. – №1(54). – С.115–120.
45. **Кузина В.В., Еремкин А.И., Кошев А.Н., Пономарева И.К.** Математическое моделирование диффузионного распределения продуктов горения свечей в храме. – №3(56). – С.180–186.
46. **Кузина В.В., Кошев А.Н., Кошев Н.А., Пономарева И.К.** Математическое моделирование двухмерного диффузионно-конвективного распределения продуктов горения свечей в храме. – №4(57). – С.149–158.
47. **Лавров И.Ю., Береговой В.А.** Лабораторный комплекс для исследования вибродинамических показателей конструкционных бетонов. – №4(57). – С.56–65.
48. **Ласьков С.Н.** Напряженное состояние опорной зоны балок сборно-монолитных узлов со скрытой консолью. – №2(55). – С.96–105.
49. **Логанина В.И.** Вероятностный анализ отслаивания лакокрасочных покрытий цементных бетонов. – №1(54). – С.93–98.
50. **Логанина В.И.** Наноразмерные модификаторы для известковых сухих строительных смесей. – №4(57). – С.101–114.
51. **Логанина В.И.** Статистический анализ вероятности отслаивания лакокрасочных покрытий в зависимости от пористости подложки. – №2(55). – С.59–62.
52. **Логанина В.И., Жегера К.В., Лавров И.Ю., Живаев А.А.** Применение метода цифровой обработки образов для оценки трещинообразования лакокрасочных покрытий. – №3(56). – С.77–84.
53. **Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В.** Влияние шероховатости поверхности лакокрасочного покрытия на его стойкость к отслаиванию и раскрекиванию. – №2(55). – С.52–58.
54. **Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В.** Исследование распространения трещины в лакокрасочном покрытии. – №3(56). – С.61–68.
55. **Логанина В.И., Соколова Ю.А.** Силикатные краски для отделки фасадов зданий. – №4(57). – С.88–100.
56. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Комплексная оценка критериев длительной прочности цементных композитов. – №3(56). – С.49–60.
57. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Элементы структурной механики разрушения материалов и параметры трещиностойкости цементных систем. – №1(54). – С.65–70.
58. **Мартышкин Д.О., Арискин М.В.** Несущая способность соединений деревянных конструкций с клееными стеклопластиковыми шайбами различной толщины. – №1(54). – С.108–114.
59. **Марьёнкин А.В., Окуньков Е.А., Родин А.И.** Архитектура церкви Казанской иконы Божией Матери с. Чеберчино Республики Мордовия. – №3(56). – С.187–193.
60. **Мирсаханов Р.Ф., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.** От «чугунной архитектуры» к металлическому каркасу. – №1(54). – С.178–185.
61. **Мирхасанов Р.Ф., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.** Инженерно-строительная эстетика в постройках Пэна С.С.. – №3(56). – С.211–216.

-
62. **Мирхасанов Р.Ф., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.** Композиционная форма в архитектуре конца XIX века: эволюция инженерной мысли. – №2(55). – С.157–161.
63. **Мирхасанов Р.Ф., Садков В.А., Сабитов Л.С., Бочарова Ю.В.** Анализ тенденций китча в архитектурных объектах. – №1(54). – С.169–177.
64. **Мирхасанов Р.Ф., Садков В.А., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.** Истоки образного решения архитектурных задач в композиции Тео Ван Дусбурга. – №2(55). – С.162–172.
65. **Наумов В.А., Шторк А.В.** Особенности определения оптимального диаметра при проектировании систем водоснабжения с полиэтиленовыми трубами. – №4(57). – С.176–183.
66. **Обухова С.Ю., Королев Е.В., Карпунина А.О.** Состояние и перспективы применения резиносодержащих отходов в дорожном строительстве. – №1(54). – С.15–27.
67. **Окладникова Е.В.** Анализ основных факторов внедрения технологии информационного моделирования в строительную отрасль Дальнего Востока. – №2(55). – С.134–141.
68. **Очкина Н.А., Очкин И.А.** Кинетика набора прочности высокоплотных композитов особого назначения. – №4(57). – С.74–79.
69. **Подгорный Д.С., Бондаренко Д.О., Строкова В.В., Скиба А.А.** Свойства порошков титана, предназначенных для детонационного напыления на бетон. – №4(57). – С.41–48.
70. **Попов А.О., Маилян Л.Р., Сабитов Л.С., Данилов А.М., Гарькин И.Н.** Системный подход к анализу технического состояния объектов культурного наследия на примере корпуса «орешек» Шлиссельбургской крепости. – №4(57). – С.199–205.
71. **Романенко И.И., Фадин А.И.** Строительные материалы на основе активированного сталеплавленного шлака. – №1(54). – С.85–92.
72. **Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н., Еличев К.А.** Бетоны быстрого набора прочности для монолитного строительства. – №4(57). – С.66–73.
73. **Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Арискин М.В.** Научно-техническое сопровождение работ по усилению строительных конструкций монолитного многоэтажного жилого дома. – №3(56). – С.122–127.
74. **Салтыков И.П.** Теоретическое и практическое исследование звукоизоляции лёгких ограждающих конструкций с использованием метода «сосредоточенных параметров». – №2(55). – С.85–95.
75. **Селяев В.П., Безрукова Е.С., Бабушкина Д.Р., Грязнов С.Ю.** Оценка долговечности железобетонных конструкций по прочности наклонных сечений методом статистической линеаризации функций деградации. – №3(56). – С.111–121.
76. **Селяев В.П., Селяев П.В., Алимов М.Ф., Аверкина М.Ю.** Исследование процессов деформирования и разрушения бетона при сжатии. – №1(54). – С.28–36.
77. **Смирнова Ю.О., Кулаков К.Ю.** Модернизация и реновация жилых зданий на основе современных требований устойчивого развития качества среды. – №4(57). – С.210–218.
78. **Снежкина О.В., Корнюхин А.В.** Оценка методов расчета прочности железобетонных балок на действие поперечных сил. – №4(57). – С.127–134.
79. **Соловьев С.А., Инькова Ю.А., Соловьева А.А.** Вероятностная оценка надежности деревянных стропильных конструкций при неполной статистической информации. – №2(55). – С.77–84.
80. **Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г., Ерофеева И.В.** Влияние органоминеральных добавок на формирование микроструктуры и кинетику твердения бетона при отрицательных температурах. – №3(56). – С.91–102.
81. **Тарасеева Н.И., Грачева Ю.В., Махамбетова К.Н.** Геосинтетические вяжущие как альтернативные виды сырья для дорожного строительства. – №4(57). – С.49–55.
82. **Титова Е.И., Акимова И.В.** Многослойные конструкции утепления: программное обеспечение. – №4(57). – С.143–148.

-
83. **Удодов С.А., Маштаков А.Ф., Шиян Д.В., Самандасюк Г.В., Данилов А.М.** Анализ свойств побочного фосфогипса как сырья для получения гипсового вяжущего. – №3(56). – С.103–110.
84. **Фролов М. В., Логанина В.И.** Исследование влажностного режима в стенах зданий из газобетона для условий Северо-Восточной Азии. – №1(54). – С.37–45.
85. **Хмара Н.О., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Духанина У.Н.** Показатели биологического сопротивления цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка. – №4(57). – С.30–40.
86. **Шеин А.И., Зайцев М.Б., Чуманов А.В., Земцова О.Г.** Активные гасители колебаний зданий и сооружений, работающие на принципе реактивной струи. – №2(55). – С.63–68.
87. **Шеин А.И., Чуманов А.В., Земцова О.Г.** Определение параметров ленточно-тросового гасителя с торсионом или гидроцилиндром одностороннего действия. – №2(55). – С.69–76.
88. **Шорстова Е.С., Ключев А.В., Ключев С.В., Гарькина И.А.** Тонкомолотый отсев дробления кварцитопесчаника в фибробетонной смеси для 3D-печати. – №3(56). – С.69–76.
89. **Шорстова Е.С., Ключев С.В., Ключев А.В., Гарькина И.А., Аюбов Н.А.** Исследование влияния добавки тонкомолотого отсева кварцитопесчаника на физико-механические свойства смесей для 3D-печати. – №4(57). – С.80–87.
90. **Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Широкова Е.С.** Анализ динамических и механических характеристик стирольных термоэластопластов (ТЭП). – №4(57). – С.135–142.
91. **Явинский А.В., Чулкова И.Л.** Влияние гидрофобизирующих добавок на свойства золоцементного камня. – №2(55). – С.21–29.