

**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 15.03.2024.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 22.625. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 50.

Дата выхода в свет 29.03.2024.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 1200 руб.

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

1 (58)/2024

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 4

Соколова С.В., Холопов Ю.А.,

Сидоренко Ю.В.

РЕМОНТ ФУТЕРОВОК ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ
ЖАРОСТОЙКИМИ КОМПОЗИТАМИ
С ПОМОЩЬЮ ПРОПИТОЧНО-ОБМАЗОЧНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ 4

Логанина В.И., Федюк Р.С.

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА
ВНЕШНЕГО ВИДА ЛАКОКРАСОЧНЫХ
ПОКРЫТИЙ 12

Аюбов Н.А., Шорстова Е.С.,

Клюев А.В., Клюев С.В.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕАКЦИОННОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФИБРЫ С ЦЕМЕНТНОЙ
МАТРИЦЕЙ 18

Обухова С.Ю., Королев Е.В.,

Будкина А.О.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО
В ПРИСУТСТВИИ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ
ЧАСТЬ 1. СОВМЕСТИМОСТЬ РЕЗИНОВОЙ
КРОШКИ С УГЛЕВОДОРОДНЫМИ
ПЛАСТИФИКАТОРАМИ..... 24

Будылина Е.А., Гарькина И.А.,

Данилов А.М.

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ:
ОТ ЭМПИРИЧЕСКОГО ПОДХОДА
К ФУНДАМЕНТАЛИЗАЦИИ 33

Калатоzi Г.М., Урманова Х.В., Нецвет Д.Д.,

Шахова Л.Д., Строкова В.В.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОДУКТОВ
ГИДРАТАЦИИ АЛЮМИНАТНЫХ ЦЕМЕНТОВ..... 40

Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г.,

Ерофеева И.В.

ВЛИЯНИЕ КАРБОНАТНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ
ДОБАВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ
МИКРОСТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТЬ
МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ 47

© Авторы публикаций, 2024

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2024

© ПГУАС, 2024

Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т. ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИТОВ 59	Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ЗАКОНОМЕРНОСТЬ РАЗВИТИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО, ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО, НАСТИЛАЮЩЕГОСЯ ПОТОКА ВДОЛЬ ВНУТРЕННЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ..... 129
Светалкина М.А., Жегера К.В., Алпатов Е.Г. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ..... 65	Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В. НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, ПРЕДУСМАТРИВАЮЩАЯ ВВЕДЕНИЕ ФЛОТОРЕАГЕНТОВ В ВИДЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ..... 138
Макридин Н.И., Максимова И.Н. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ВАРИАЦИОННО- СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ 72	Романова Т.Н., Белоглазова Т.Н. ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ 146
Левицкая К.М., Алфимова Н.И., Бурьянов А.Ф. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОСФОГИПСА КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ..... 82	Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В., Кадысева А.А., Суглобов Д.А. ПОЛУЧЕНИЕ ХОЛОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ..... 157
Гарькина И.А., Данилов А.М. ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ..... 99	Бенаи Х.А., Радионов Т.В., Харьковская Н.Н., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. АРХИТЕКТУРНАЯ ДИНАМИКА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ..... 166
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 105	АРХИТЕКТУРА..... 166
Викторов В.В., Викторова О.Л. ВНЕЦЕНТРЕННО НАГРУЖЕННЫЕ ФУНДАМЕНТЫ С ЧАСТИЧНЫМ ОТРЫВОМ ПОДОШВЫ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ГРУНТ 105	Селютина Л.Ф., Ратькова Е.И., Корнеев А.А. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ КОНСТРУКЦИЙ ИСТОРИЧЕСКОГО ЗДАНИЯ В ПОВЕНЦЕ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)..... 174
Карпов В.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ ПОЛНОСБОРНОГО КРУПНОПАНЕЛЬНОГО ДЕРЕВЯННОГО ДОМА 115	
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 121	
Кузина В.В., Кошев Н.А., Пономарева И.К., Кошев А.Н. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФфуЗИИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПРИ ГОРЕНИИ СВЕЧЕЙ В ХРАМЕ В УСЛОВИЯХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ВЫТЯЖКИ ВОЗДУХА 121	

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	4
Sokolova S.V., Kholopov Yu.A., Sidorenko Yu.V. REPAIR OF LININGS OF THERMAL UNITS BY HEAT-RESISTANT COMPOSITES USING IMPREGNATING AND COATING TECHNOLOGIES BASED ON INDUSTRIAL WASTE.....	4
Loganina V.I., Fedjuk R.S. FRACTAL ANALYSIS OF THE QUALITY OF PAINT AND VARNISH COATINGS APPEARANCE	12
Ayubov N.A., Shorstova E.S., Klyuev A.V., Klyuev S.V. STUDYING THE PROCESSES OF REACTIONARY INTERACTION OF FIBER WITH A CEMENT MATRIX	18
Obukhova S.Yu., Korolev E.V., Budkina A.O. STRUCTURE FORMATION OF MODIFIED BINDER IN THE PRESENCE OF CRUMB RUBBER PART 1. COMPATIBILITY OF CRUMB RUBBER AND HYDROCARBON PLASTICIZERS	24
Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. FORMATION OF COMPOSITE PROPERTIES: FROM EMPIRICAL APPROACH TO FUNDAMENTALIZATION.....	33
Kalatozy G.M., Urmanova H.V., Netsvet D.D., Shakhova L.D., Strokova V.V. MINERALOGICAL COMPOSITION OF HYDRATION PRODUCTS OF ALUMINATE CEMENTS	40
Tarakanov O.V., Ivashchenko Y.G., Erofeeva I.V. THE EFFECT OF CARBONATE MINERAL ADDITIVES ON THE FORMATION OF MICROSTRUCTURE AND STRENGTH OF MINERAL BINDERS	47
Gavrilov M.A., Erofeev V.T. DURABLE AND DEFORMATIVE PROPERTIES OF EPOXY PROTECTIVE COMPOSITES.....	59
Svetalkina M.A., Zhegera K.V., Alpatov E.G. OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF DRY BUILDING MIXES USING SOFTWARE TOOLS.....	65
Makridin N.I., Maksimova I.N. COMPARATIVE VARIATIONAL AND STATISTICAL ASSESSMENT OF THE QUALITY OF STRENGTH PARAMETERS OF CEMENT COMPOSITES	72
Levickaya K.M., Alfimova N.I., Buryanov A.F. USE OF PHOSPHOGYPSUM AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF ONE-COMPONENT BINDERS	82
Garkina I.A., Danilov A.M. TIME SERIES IN BUILDING MATERIALS SCIENCE.....	99
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	105
Viktorov V.V., Viktorova O.L. OFF-CENTER LOADED FOUNDATIONS WITH PARTIAL SEPARATION OF THE SOLE. DETERMINATION OF THE MAXIMUM PRESSURE ON THE GROUND.....	105
Karpov V.N. STUDYING SPATIAL WORK OF A FULLY PREFABRICATED LARGE PANEL WOODEN HOUSE	115
ENGINEERING SYSTEMS.....	121
Kuzina V.V., Koshev N.A., Ponomareva I.K., Koshev A.N. CALCULATION OF CONVECTIVE DIFFUSION OF CARBON BLACK BY THE BURNING OF CANDLES IN THE TEMPLE IN THE CONDITIONS OF VERTICAL AIR EXTRACTION.....	121
Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Petrova K.A. CONVECTIVE HEAT TRANSFER AND REGULARITY OF DEVELOPMENT OF VERTICAL, SEMI-LIMITED OVERLAYING FLOW ALONG THE INNER VERTICAL SURFACE OF THE OUTER FENCE.....	129
Andreev S.Yu., Belova L.V., Lebedinskiy K.V. A NEW TECHNOLOGY OF FLOTATION WASTEWATER TREATMENT, PROVIDING INTRODUCTION OF FLOTATION REAGENTS IN THE FORM OF FINE AEROSOLS.....	138
Romanova T.N., Beloglazova T.N. ENERGY INFORMATION MODEL OF HEATING SUPPLY MANAGEMENT	146
Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Mironov D.V., Kadyseva A.A., Suglobov D.A. GETTING COLD USING HYDRAULIC ENERGY	157
ARCHITECTURE	166
Benai Kh.A., Radionov T.V., Kharkovskaya N.N., Sabitov L.S., Garkin I.N. ARCHITECTURAL DYNAMICS WITH RECONSTRUCTION OF URBAN DEVELOPMENTS.....	166
Selutina L.F., Ratkova E.I., Korneev A.A. LONG-TERM DURABILITY OF WOOD STRUCTURES OF A HISTORIC BUILDING IN POVENTSE (REPUBLIC OF KARELIA).....	174

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 666.7

DOI 10.54734/20722958_2024_1_4

*Самарский государственный университет
путей сообщения*

Россия, 443066, Самара, ул. Свободы, д. 2В

Соколова Светлана Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Железнодорожный путь
и строительство»

E-mail: sokolova9967@mail.ru

Холопов Юрий Александрович,

кандидат сельскохозяйственных наук,
заведующий кафедрой «Безопасность
жизнедеятельности и экология»

E-mail: kholopov@bk.ru

*Самарский государственный технический
университет*

Россия, 443100, Самара,
ул. Молодогвардейская, д. 244

Сидоренко Юлия Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Производство строительных
материалов, изделий и конструкций»

/E-mail: sm-samgasa@mail.ru

Samara State Transport University

Russia, 443066, Samara, 2B, Svobody St.

Sokolova Svetlana Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Railway track and
construction»

E-mail: sokolova9967@mail.ru

Kholopov Yuriy Aleksandrovich,

Candidate of Agricultural Sciences, Head of
the department «Life Safety and Ecology»

E-mail: kholopov@bk.ru

Samara State Technical University

Russia, 443100, Samara, 244,
Molodogvardeyskaya St.

Sidorenko Yulia Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Production of building
materials, products and structures»

E-mail: sm-samgasa@mail.ru

РЕМОНТ ФУТЕРОВОК ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ ЖАРОСТОЙКИМИ КОМПОЗИТАМИ С ПОМОЩЬЮ ПРОПИТОЧНО-ОБМАЗОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

С.В. Соколова, Ю.А. Холопов, Ю.В. Сидоренко

В связи с истощением запасов природных сырьевых ресурсов (каолинов) для производства штучных огнеупоров предлагается новая технология структурно-химической модификации традиционных шамотных изделий, позволяющая повысить их физико-термические параметры, в том числе термостойкость.

Повышение производительности тепловых агрегатов зависит от той части футеровки, которая в большей степени подвержена химико-термическому воздействию агрессивной среды. Увеличение межремонтного периода, сокращение продолжительности капитального и текущего ремонтов являются существенным резервом повышения производительности промышленных печей и других тепловых агрегатов.

Перспективное направление решения данной проблемы – это применение новых огнеупорных футеровочных материалов: жаростойких бетонов и растворов.

При ремонтах существующих тепловых агрегатов используют огнеупорные покрытия, выполняемые на основе жаростойких растворов в виде защитных обмазок. Это приводит к тому, что в некоторых случаях нецелесообразно изготавливать крупные блоки из жаростойких бетонов. Для повышения срока службы тепловых агрегатов, выполненных из штучных огнеупоров, также возможно нанесение огнеупорных обмазок на существующую футеровку.

Жаростойкая защитная обмазка позволяет резко сократить расходы на дорогостоящие огнеупоры, а ремонт теплового агрегата сводится к очистке старого выработанного слоя обмазки и нанесению нового без разборки основной кладки.

Ключевые слова: огнеупоры, фосфатные растворы, модификация, термостойкость, отходы, жаростойкие бетоны

REPAIR OF LININGS OF THERMAL UNITS BY HEAT-RESISTANT COMPOSITES USING IMPREGNATING AND COATING TECHNOLOGIES BASED ON INDUSTRIAL WASTE

S.V. Sokolova, Yu.A. Kholopov, Yu.V. Sidorenko

Due to the depletion of natural raw materials (kaolin) for the production of piece refractories we propose a new technology of structural and chemical modification of traditional fireclay products, allowing to increase their physical and thermal parameters, including heat resistance.

The increase of thermal units productivity depends on that part of lining which is mostly subjected to chemical and thermal action of aggressive environment. Increase of the inter-repair period, shortening the duration of capital and current repairs are essential in increasing the productivity of ovens and other thermal units.

A perspective direction of solving this problem is the use of new refractory lining materials: heat-resistant concretes and mortars.

Heat-resistant coverings are used in repairing present thermal units the coverings are made on the basis of heat resistant mortars in the form of protective coatings. That is why in some cases it is unreasonable to make big units from heat-resistant concrete. To raise the service life of heating unit made of piece refractories, it is possible to apply heat-resistant coating on the existing lining.

The use of heat-resistant protective coating sharply reduce the expensive refractories and the repair of thermal units is reduced to cleaning the old layer of coating and applying a new one without disassembling of masonry.

Keywords: refractories, phosphate solutions, modification, heat resistance, waste, heat-resistant concrete

Введение. Тепловые аппараты, применяемые в настоящее время, являются объемными инженерными сооружениями и подвергаются эксплуатации в сложных агрессивных и температурно-влажностных условиях, что в итоге приводит к серьезным изменениям в огнеупорных изделиях и деформированию всей конструкции.

В связи с этим дорогостоящие штучные огнеупорные изделия достаточно быстро изнашиваются и требуют проведения ремонтных работ с затратами высококвалифицированной рабочей силы. Для увеличения срока эксплуатации несущих конструкций в условиях агрессивной среды с высокими температурами, воздействием выделяющихся газов и расплавов необходимо решать задачу по наращиванию производства качественных современных жаростойких изделий и материалов [1-3]. Поэтому весьма актуальной и востребованной является реализация ресурсосберегающих технологий по ремонту футеровочных составов на базе отходов различных производств, что позволит сэкономить топливно-сырьевые и энергетические ресурсы [4-7]. Возможность вторичного использования промышленных отходов в технологии изготовления жаростойких бетонов показана в работах [8-10]. Повторное использование утилизированных отходов промышленных предприятий – одно из лучших экономических и экологических направлений.

Теоретический анализ. Так, на примере работающей керамзитообжигательной вращающейся печи рассматриваются коррозионные процессы в штучных шамотных

огнеупорах, в частности влияние силикатного расплава, который возникает при частичном оплавлении гранул керамзита, на футеровочный материал зоны обжига.

Обладая пористой структурой, шамотный кирпич поглощает расплав. В результате получаем материал, разделённый на зоны, каждая из которых имеет своё термическое расширение. Это, в свою очередь, приводит к разрушению, т.к. возникают внутренние напряжения [1;2].

При исследовании микростроения поверхности нескольких слоёв огнеупорного кирпича (ША) после его взаимодействия с расплавом наблюдалось отсутствие расплава в теле шамотного изделия (рис. 1 и 2).

На снимках 1-5 (см. рис.1) можно наблюдать микроструктуру шамота ША; в слоях на снимках 6-8 видна структура с включением кристаллов, образовавшихся при охлаждении расплава, и только наружные слои на снимках 9-10 представляют собой расплав.

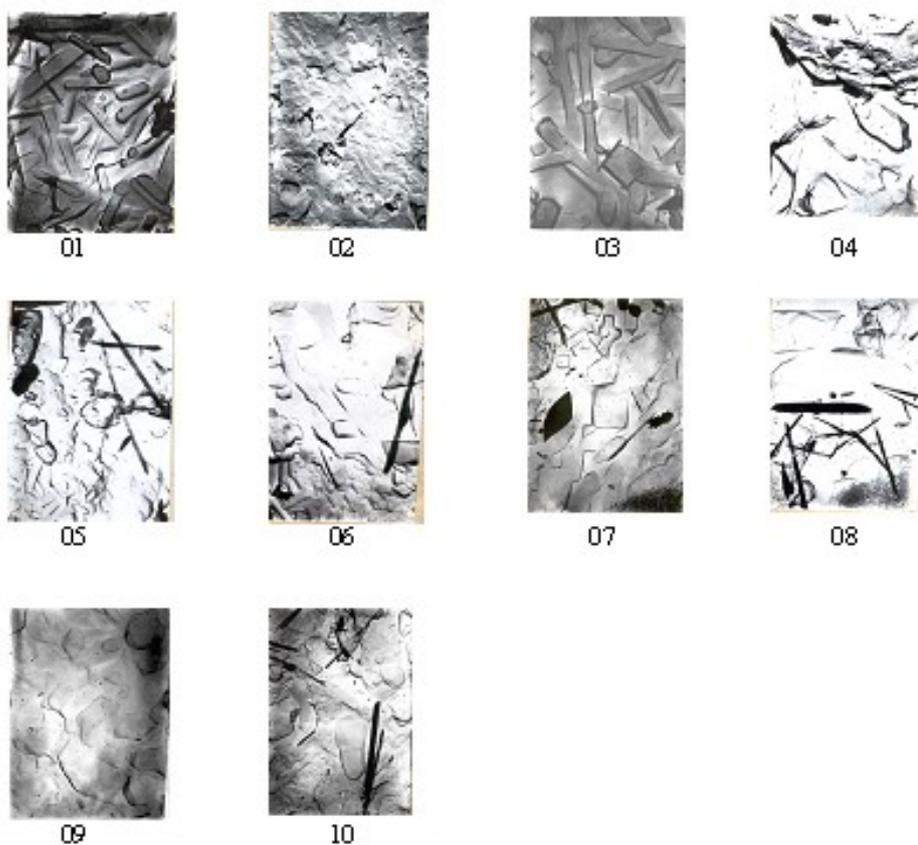


Рис. 1. Микроструктура слоёв ША после воздействия расплава



Рис. 2. Микроструктура шамотного кирпича после пропитки силикатным расплавом (увеличение 150х)

Пограничная зона характеризуется более плотным строением и отсутствием пор и обозначает шамот, в структуру которого продиффундировал силикатный расплав.

Также на растровом электронном микроскопе проводилось изучение микро-структуры всего образца шамотного кирпича, что позволило выявить четкую систему следующих областей: чистого шамота, переходной области и области расплава.

Так как разрушение ША происходит в результате термического расширения, необходимо приблизить коэффициенты термического расширения (КТР) ремонтной массы и огнеупора.

Экспериментальная часть. Были проведены дилатометрические исследования состава ремонтной массы.

В табл. 1 представлены значения КТР огнеупорных составов; более оптимальными являются те, КТР которых отличаются наименьшими практическими данными.

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты термического расширения огнеупорных составов

Состав смеси	Температура, °С	Знач. КТР ср. 10 ⁻⁶ 1/град	Знач. КТР ист. 10 ⁻⁶ 1/град
Ш 12 %+ М 88 %	648	9,07	3,16
	900	6,63	4,11
Ш 18 %+ М 82 %	643	7,42	2,12
Ш 33 %+ М 67 %	900	5,65	3,09
Ш 39 %+ М 61 %	647	4,97	1,08
	900	5,15	1,18
Ш 50 %+ М 50 %	656	5,36	5,15
	715	24,08	6,61
	810	19,37	2,67
	900	10,12	3,49
Ш 59 %+ М 41 %	648	6,15	5,86
	676	20,41	6,387
	722	- 4,876	- 0,83
Ш 72 %+ М 28 %	613	7,37	7,12
	686	47,82	11,56
	707	125,41	4,08
	826	- 75,16	- 8,42
	900	- 27,15	5,54
Ш 79 %+ М 21 %	652	3,62	3,52
	900	9,24	5,09
Ш 87 %+ М 13 %	652	2,55	2,47
	900	14,45	4,64
Ш 100 %	653	2,63	1,55
	900	5,75	2,68
ММЛ-62+Н ₃ РO ₄ -60 %	586	7,64	4,33
	657	7,63	4,704
	782	25,82	3,17
	853	4,85	2,16
Ш +НРO ₄ -60 %	512	7,58	7,28
	705	8,64	7,65
	653	6,52	6,31
	900	7,54	6,63

Примечание. Условные обозначения, принятые в табл. 1: Ш – шамот; М – мертель.

На рис. 3 приведена схема определения прочности на отрыв огнеупорного состава с поверхностью шамотного кирпича.

Температуру деформации под нагрузкой определяли на образцах-цилиндрах (ГОСТ 20910).

Для изучения взаимодействия огнеупорной обмазки с расплавом керамзита в кирпиче делались отверстия, один ряд которых заполнялся разработанным составом (рис. 4).

После температурной обработки образец распиливался (рис. 5), после чего оценивалось состояние поверхности материала с защитным слоем и без него.

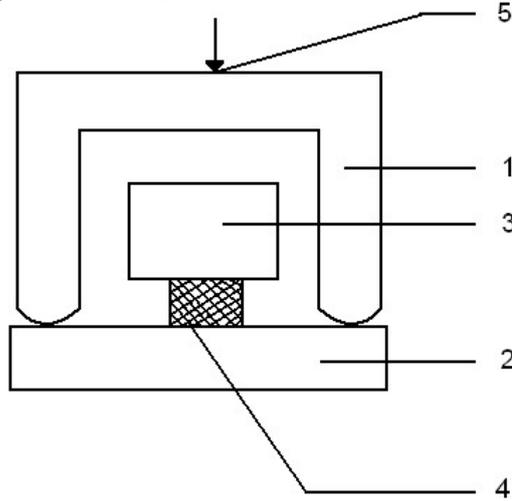


Рис. 3. Схема определения прочности на отрыв огнеупорного состава с поверхностью шамотного кирпича:

1 – скоба; 2 – нижний образец ША; 3 – верхний образец ША (верхний и нижний образцы ША склеены крест на крест); 4 – огнеупорный раствор; 5 – приложенная нагрузка

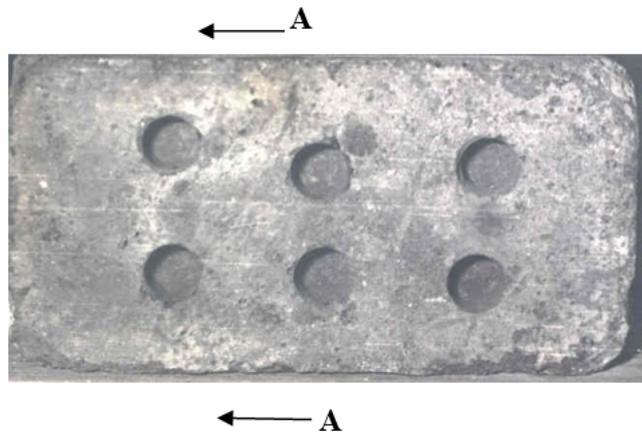


Рис. 4. Образец для испытаний на его реакцию с расплавом глины

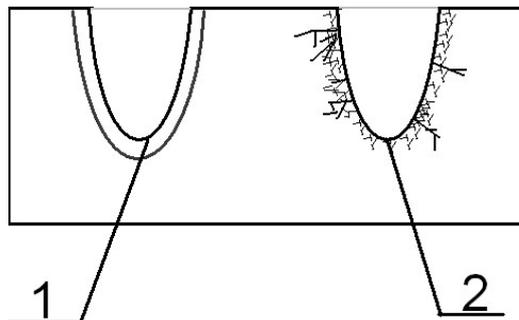


Рис. 5. Разрез А-А образца после испытания:
1 – с защитной обмазкой; 2 – без покрытия

При проведении ремонта футеровки теплового агрегата её поверхность дважды пропитывалась 60 %-м раствором H_3PO_4 (перед нанесением жаростойкой ремонтной смеси и после). Температурная обработка осуществляется при первом пуске печи в рабочем режиме. При этом происходит взаимодействие минералов жаростойкой смеси с H_3PO_4 , образуются стабильные тугоплавкие фосфаты минералов: $AlPO_4$; $FePO_4$; $CrPO_4$ и др.

Для ремонта футеровки подготовительного и обжигового барабанов вращающейся керамзитобжигательной печи были разработаны составы №1 с температурой применения 700-800 °С и № 2 с температурой применения 800-1200 °С (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Составы бетонных смесей

№ состава	Состав смеси	кг/м ³
1	П	155
	К П	155
	ШЩ	755
	Вода	255
2	Отработанный алюмохромистый катализатор, ИМ-2201	310
	ГЦ	110
	ШЩ	655
	ШП	755
	Силикатнатриевое вяжущее (плотн. 1,36 г/см ³)	355

П р и м е ч а н и е . Условные обозначения, принятые в табл. 2:

П – портландцемент, ПЦ-400-Д-20; КП – керамзитовая пыль, фр. 0,14-1,25;

ШЩ – шамотный щебень, фр. 5-10; ГЦ – глиноземистый цемент;

ШП – шамотный песок, фр. 0,14-5.

Химический состав компонентов и физико-термические показатели жаростойких композитов приведены в табл. 3 и 4.

Т а б л и ц а 3

Химический состав шамота (%)

Шамот ША	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O	SO_3
	30-45	45-55	1-3	2-4	0-1	0-1	0-0,6
Отработанный катализатор ИМ-2201	72-76	7-11	0-1,6	Cr_2O_3 14-16	0,4-0,7	0-0,7	0-1,2

Т а б л и ц а 4

Физико-термические характеристики жаростойких композитов

№ п/п	Средняя плотность, кг/м ³ в сухом состоянии	Предел прочности при сжатии / предел прочности сцепления с покрытием, МПа	
		После обжига при рабочей температуре	После пропитки H_3PO_4 с нанесением обмазки и обжига
Состав №1	1223	5,57 (лаб. печь) / 2,97	9,2 (лаб. печь) / 3,06
		5,6 (пром. печь) / 2,76	8,9 (пром. печь) / 2,81
Состав №2	2062	26,6 / 5,7	42,7 / 5,63

Выводы

1. Доказана возможность улучшения физико-термических свойств керамических огнеупоров и жаростойких бетонов с помощью их структурно-химической модификации растворами фосфатных связок.

2. В ходе дилатометрических исследований огнеупорных материалов с целью определения коэффициента термического расширения (КТР) была оценена возможность разрушения огнеупора при взаимодействии его с силикатным расплавом при обжиге керамзита. Применяемое защитное покрытие футеровки с низкой пористостью позволило увеличить сопротивление ее воздействию силикатного расплава.

3. Установлено, что увеличение прочности керамических огнеупоров и жаростойкого бетона, пропитанных ортофосфорной кислотой, объясняется образованием в порах при термообработке прочных минералов $AlPO_4$, $FePO_4$, $SiPO_4$ и др. Появление в структуре огнеупорных композитов тугоплавких фосфатов $AlPO_4$ (кристобалит в шамотном огнеупоре) и $FePO_4$ (фосфат железа в пористой керамике) повышает их физико-термические показатели.

4. Опробована технология структурно-химической модификации при ремонте футеровок тепловых агрегатов, выполненных как из штучных керамических огнеупоров, так и из монолитных жаростойких бетонов, с помощью активных пропиточно-обмазочных составов. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что применение химически активных растворов способствует повышению физико-термических свойств штучных огнеупоров и жаростойких бетонов, что ведет к увеличению долговечности футеровки.

5. Разработана технология ремонта футеровок тепловых агрегатов, выполненных как из штучных огнеупоров, так и с применением жаростойких бетонов. Эта технология отличается простотой, т.к. для приготовления ремонтных масс используется обычное технологическое оборудование, что существенно снижает энергозатраты. Такие производственные участки можно организовать на предприятии потребителя.

6. На основании результатов промышленных испытаний были оборудованы участки по производству ремонтных масс из жаростойкого бетона на ряде предприятий. Применение разработанных пропиточно-обмазочных составов при ремонте футеровок позволяет получить значительный экономический эффект.

7. Применяя описанный способ пропитки, можно повысить температуру до $1700\text{ }^\circ\text{C}$, увеличить эксплуатационную прочность в 1,5 раза, а также использовать в качестве сырьевых материалов техногенное сырьё и промышленные отходы.

8. Переработка и последующее использование промышленных отходов в производстве строительных материалов является актуальной задачей для всех стран мира.

9. Научная новизна заключается в теоретическом обосновании применения химически активных фосфатных связок для структурной модификации огнеупорных футеровочных материалов. При этом выявлено влияние структурно-энергетических параметров фосфатов на их свойства при высоких температурах; установлена возможность применения фосфатных связок для поверхностной модификации огнеупорных футеровочных материалов.

Список литературы

1. Хлыстов, А.И. Структурная модификация керамических огнеупоров / А.И. Хлыстов, С.В. Соколова // Современные инвестиционные процессы и технологии: сборник трудов секции "Строительство". – М.: Изд-во РИА, 2002. – Вып. 3, ч. 2. – С. 110–117.

2. Соколова, С.В. Структурная модификация огнеупоров – основа ремонта футеровок тепловых агрегатов / С.В. Соколова, А.И. Хлыстов // Современные представления об инвестиционных процессах и новые строительные технологии: сборник трудов секции "Строительство". – М.: Изд-во РИА, 2004. – С. 179–184.

3. Соколова, С.В. Определение удельного электросопротивления жаростойких композитов с целью повышения их долговечности путём структурно-химической модификации растворами фосфатов / С.В. Соколова // Строительный вестник Российской инженерной академии: сборник трудов секции "Строительство". – М.: Изд-во РИА, 2007. – С. 73–75.

4. Русина, В.В. Жаростойкие бетоны с использованием техногенного сырья / В.В. Русина // Строительные материалы. – 2013. – № 1. – С. 12–15.

5. Ахтямов, Р.Р. Оптимизированные конструкции футеровок вагонеток для обжига керамического кирпича / Р.Р. Ахтямов // Строительные материалы. – 2013. – № 12. – С. 56–58.

6. Малькова, М.Ю. Особенности гетерогенного фазообразования в жаростойких шлаковых композициях / М.Ю. Малькова, Ш.М. Рахимбаев, Т.И. Брагина // Техника и технология силикатов. – 2006. – Т. 13, № 1. – С. 21–23.

7. Краюхин, В.И. Использование жаростойкого бетона на энергетических объектах в сельской местности / В.И. Краюхин, Б.П. Чесноков, А.В. Овчинников // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2010. – № 2. – С. 33–35.

8. Хлыстов, А.И. Перспективы использования глиноземсодержащих отходов промышленности в производстве жаростойких бетонов / А.И. Хлыстов, С.В. Соколова, М.Н. Баранова [и др.] // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 7. – С. 13-19. – DOI:10.18412/1816-0395-2021-7-13-19.

9. Соколова, С.В. Вторичное использование глиноземсодержащих отходов промышленности для синтеза жаростойких бетонов / С.В. Соколова, М.Н. Баранова, Д.И. Васильева [и др.] // Строительные материалы. – 2023. – № 4. – С. 20–23. – URL: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-20-23>

10. Соколова, С.В. Перспективы применения промышленных отходов для повышения долговечности и огнеупорности жаростойких бетонов / С.В. Соколова, М.Н. Баранова, Д.И. Васильева [и др.] // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 2 (106). – С. 123–133. – DOI: 10.33979/2073-7416-2023-106-2-123-133

References

1. Khlystov, A.I. Structural modification of ceramic refractories / A.I. Khlystov, S.V. Sokolova // Modern investment processes and construction technologies: Proceedings of the section «Construction» of the Russian Engineering Academy. – М., 2002. – P. 110–117.

2. Khlystov, A.I. Structural modification of refractories is the basis for the repair of thermal unit linings / A.I. Khlystov, S.V. Sokolova // Modern ideas about investment processes and new construction technologies: Proceedings of the section «Construction» of the Russian Engineering Academy. – М., 2004. – P. 179–184.

3. Sokolova, S.V. Determination of the electrical resistivity of heat-resistant composites in order to increase their durability by structural and chemical modification with phosphate solutions / S.V. Sokolova // Construction Bulletin of the Russian Engineering Academy: Proceedings of the section «Construction» of the Russian Engineering Academy. – М., 2007. – P. 73–75.

4. Rusina, V.V. Heat-resistant concrete using technogenic raw materials / V.V. Rusina // Building materials. – 2013. – No. 1. – P. 12–15.

5. Akhtyamov, R.R. Optimized designs of lining trolleys for firing ceramic bricks / R.R. Akhtyamov // Building materials. – 2013. – No. 12. – P. 56–58.

6. Malkova, M.Yu. Features of heterogeneous phase formation in heat-resistant slag compositions / M.Yu. Malkova, Sh.M. Rakhimbayev, T.I. Bragina // Technique and technology of silicates. – 2006. – Vol. 13, No. 1. – P. 21–23.

7. Krayukhin, V.I. The use of heat-resistant concrete at power facilities in rural areas / V.I. Krayukhin, B.P. Chesnokov, A.V. Ovchinnikov // Bulletin of Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. – 2010. – No. 2. – P. 33–35.

8. Khlystov, A.I. Prospects for the use of alumina-containing industrial waste in the production of heat-resistant concrete / A.I. Khlystov, S.V. Sokolova, M.N. Baranova [et al.] // Ecology and industry of Russia. – 2021. – Vol. 25, No. 7. – P. 13–19. – DOI:10.18412/1816-0395-2021-7-13-19

9. Sokolova, S.V. Secondary use of alumina-containing industrial waste for the synthesis of heat-resistant concrete / S.V. Sokolova, M.N. Baranova, D.I. Vasilyeva [et al.] // Building materials. – 2023. – No. 4. – P. 20–23. – URL: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-20-23>

10. Sokolova, S.V. Prospects for the use of industrial waste to increase the durability and fire resistance of heat-resistant concrete / S.V. Sokolova, M.N. Baranova, D.I. Vasilyeva [et al.] // Construction and reconstruction. – 2023. – No. 2 (106). – P. 123–133. – DOI: 10.33979/2073-7416-2023-106-2-123-133.

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

Дальневосточный федеральный
университет

Россия, 690950, г. Владивосток,
ул. Суханова, 8

Федюк Роман Сергеевич,
доктор технических наук, профессор
военного учебного центра
E-mail: roman44@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Far Eastern Federal University

Russia, 690950, Vladivostok, 8, Suhanova St.

Fedyuk Roman Sergeevich,
Doctor of Sciences, Professor of military
training center
E-mail: roman44@yandex.ru

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВНЕШНЕГО ВИДА ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Логанина, Р.С. Федюк

Дана методика применения фрактальной размерности для оценки качества внешнего вида лакокрасочных покрытий. Установлена корреляционная зависимость между шероховатостью поверхности покрытия, классом качества внешнего вида и фрактальной размерностью. Выявлено, что с увеличением шероховатости поверхности покрытия наблюдается снижение класса качества внешнего вида и увеличение фрактальной размерности. Получены числовые значения показателя фрактальной размерности профиля поверхности покрытия в зависимости от пористости подложки. Показано влияние способа нанесения красочного состава и подготовки поверхности подложки на качество внешнего вида покрытий.

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, качество внешнего вида, фрактальная размерность, пористость цементной подложки

FRACTAL ANALYSIS OF THE QUALITY OF PAINT AND VARNISH COATINGS APPEARANCE

V.I. Loganina, R.S. Fedyuk

Methodology the use of fractal dimension in assessing the quality of paint and varnish coatings appearance is given. A correlation dependence between the surface roughness of the coating, the quality class of the appearance and the fractal dimension has been established. It is found that with an increase of the surface roughness of the coating, a decrease of the appearance quality class and an increase in the fractal dimension are observed. Numerical values of the index of the fractal dimension of the coating surface profile are obtained depending on the porosity of the substrate. The influence of the method of applying the paint composition and preparation of the substrate surface on the quality of coatings appearance is considered.

Keywords: paint coating, appearance quality, fractal dimension, porosity of the cement substrate

Для отделки фасадов зданий широкое применение нашли декоративные штукатурки, лакокрасочные материалы. Удельный вес красочных составов среди всех видов отделочных материалов составляет свыше 50 % [1–3]. Качество внешнего вида покрытий оценивается классом. В соответствии с ГОСТ 9.032-74** «Единая система защиты с коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и

обозначения» определены семь классов качества внешнего вида лакокрасочных покрытий на металлической подложке. Для цементных бетонов в соответствии с [4–7] качество внешнего вида защитно-декоративных покрытий оценивается IV–VII классами.

Качество внешнего вида поверхности лакокрасочного покрытия можно оценивать в том числе и ее шероховатостью, т.е. профилем поверхности. При оценке профиля поверхности покрытия могут быть применены методы фрактальной физики. Критерием качества внешнего вида покрытий, отражающим наличие включений, потеков, волнистости, может служить фрактальная размерность D . Чем больше шероховатость покрытия, тем более искривлен профиль покрытия и больше величина D . Для профиля поверхности покрытия величина фрактальной размерности D находится в интервале $1 < D < 2$ [8–10].

Нами сделана попытка оценить возможность описания качества внешнего вида покрытий с помощью фрактальной размерности.

В эксперименте применяли эмали алкидную марки ПФ-115, масляную марки МА-15, нитроцеллюлозную марки НЦ-123, краску акрилатную класса «Универсал», акриловую вододисперсионную (фасадную), поливинилацетатцементную (ПВАЦ), полимеризвестковую, известковую краски.

Для приготовления красок на основе минеральных вяжущих (поливинилацетатцементная (ПВАЦ), полимеризвестковая, известковая краски) применяли следующие материалы:

- портландцемент белый (ГОСТ 965-78);
- известь-пушонка (ГОСТ 9179-77);
- поливинилацетатная дисперсия ПВАД марок ДФ 47/70, 48/50 (ГОСТ 18992-80).

Качество подложек оценивали показателем общей пористости P , поверхностной пористости P_p . Поверхностную пористость определяли отношением суммы площади пор к общей площади измеряемой поверхности. Диаметр пор измеряли с помощью измерительной лупы $\times 24$.

Условную вязкость лакокрасочных составов определяли с помощью вискозиметра ВЗ-1 (ГОСТ 8420-74. Материалы лакокрасочные. Методы определения условной вязкости).

Профиль покрытия определяли с помощью прибора профилометра-профилографа типа А1. Длину профиля поверхности покрытия определяли с помощью курвиметра. Оценку фрактальной размерности профиля поверхности покрытий производили геометрическим методом. Для этого изображение кривой, полученное с помощью профилографа-профилометра, покрывалось сеткой, состоящей из квадратов со стороной L_1 . Затем подсчитывали число квадратов N , через которые проходит кривая $N(L_1)$. Изменяя масштаб сетки, каждый раз вновь подсчитывали число квадратов, пересекающих кривую $N(L_2), N(L_3) \dots N(L_n)$. Затем в двойных логарифмических координатах строили зависимость $N(L)$, по углу наклона которой и определяли фрактальную размерность.

В табл.1 приведены результаты оценки качества внешнего вида покрытий, проведенной в соответствии с ГОСТ 9.407–74 и с помощью фрактальной размерности профиля поверхности покрытий.

Т а б л и ц а 1

Оценка качества внешнего вида покрытия

Вид красочного состава	Шероховатость поверхности покрытия, R_a , мкм	Фрактальная размерность, D	Класс качества внешнего вида покрытия
1	2	3	4
Эмаль алкидная	0,22	1,17	У
	0,75	1,35	УІ
Масляная МА-15	0,2	1,075	У
	0,48	1,125	УІ

1	2	3	4
Нитроцеллюлозная краска НЦ-123	0,2	1,1	У
	0,75	1,36	УІ
Акрилатная, класс Универсал	0,75	1,3	УІ
	1,26	1,42	УІІ
Вододисперсионная (фасадная)	0,6	1,25	УІ
	1,24	1,7	УІІ

Установлено, что между шероховатостью поверхности покрытия, классом качества внешнего вида и фрактальной размерностью существует корреляционная зависимость, заключающаяся в том, что с увеличением шероховатости поверхности покрытия наблюдается увеличение фрактальной размерности D и снижение класса качества внешнего вида. Фрактальная размерность профиля поверхности покрытия на основе краски ПФ-115 составляет $D=1,17$ при шероховатости поверхности покрытия и классе качества внешнего вида соответственно 0,2 мкм и У. Увеличение шероховатости поверхности покрытия до 0,75 мкм (класс качества внешнего вида УІ) приводит к повышению числовых значений фрактальной размерности до $D=1,35$. Подобные закономерности наблюдаются и для других видов покрытий.

Результаты проведенных исследований позволяют считать, что при фрактальной размерности D , равной 1–1,09, класс качества внешнего вида покрытий равен У, при $D=1,1–1,2$ класс качества внешнего вида покрытий составляет У, при $D=1,21–1,4$ – УІ, $D=1,41–1,99$ – УІІ. Применение показателя фрактальной размерности позволит в дополнение к существующим показателям проводить более объективную оценку качества лакокрасочных покрытий.

На качество внешнего вида покрытий существенное влияние оказывает пористость цементной подложки. Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что с увеличением пористости подложки показатель шероховатости поверхности покрытий увеличивается. Так, например, шероховатость поверхности известковых покрытий увеличивается до 8,34 мкм (пористость подложки 9,6 %), для полимеризвестковых – до 8,81 мкм (пористость подложки 11,9 %).

Т а б л и ц а 2

Влияние пористости подложки на качество внешнего вида покрытий

Вид покрытия	Пористость подложки, %	Шероховатость покрытия, мкм	Фрактальная размерность	Класс покрытия
Известковое	0	3,39	1,6	У
	5,7	5,05	1,66	У
	9,6	8,34	1,7	УІ
Полимеризвестковое	0	3,35	1,64	У
	4,1	4,13	1,65	У
	11,9	8,81	1,72	УІ
ПВАЦ	0	3,2	1,59	У
	3,1	4,05	1,64	У
	12,6	5,84	1,68	У

Качество внешнего вида покрытий определяется также способом нанесения красочного состава. В табл. 3 приведены сведения о качестве внешнего вида покрытий в зависимости от способа нанесения красочного состава, пористости и вида поверхности подложки.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, свидетельствует, что при равной пористости цементной подложки пневматическое нанесение отделочного состава способствует повышению класса качества внешнего вида покрытия. Таким образом, чтобы получить более высокое качество внешнего вида покрытия, необходимо стремиться к созданию поверхностной пористости цементной подложки, не превышающей 5 %.

Влияние способа подготовки поверхности подложки
на качество внешнего вида покрытий

Вязкость по ВЗ-4,с	Метод нанесения краски	Пористость подложки, %	Подготовка поверхности подложки	Класс качества внешнего вида покрытия по ГОСТ 9.032-74
Поливинилацетатцементная краска				
50	кистью	0	грунтование	VI
30	пневматический	0	грунтование	V
50	кистью	3,2	грунтование	VI
50	кистью	4,3	грунтование	VI
50	кистью	6	грунтование	V
50	кистью	6	шпаклевание	IV
Известковая краска				
50	кистью	0	грунтование	VI
35	пневматический	0	грунтование	V
50	кистью	6	грунтование	VI

Для более достоверной оценки распределения показателей шероховатости по простиранию нами была проведена статистическая обработка показателей. Анализ данных, приведенных в табл. 4, свидетельствует, что независимо от вида красочного состава, пористости подложки существует неоднородность распределения шероховатости по простиранию. Так, при нанесении краски ПФ-115 на подложку с пористостью 24 % размах R составляет 10,94 мкм, а краски МА-15 – 10,12 мкм. Размах между показателями шероховатости R_a поверхности покрытий на основе краски ПФ-115 на зашпаклеванной поверхности значительно ниже (3,68 мкм). Для краски ПФ-115 формируется менее однородное по простиранию покрытие при нанесении краски на подложку с пористостью 32 %. Разброс показателей шероховатости $R_a = 11,21$ мкм. Независимо от вида красочного состава меньший разброс показателей шероховатости R_a характерен для поверхности всех покрытий на зашпатлеванной подложке.

Т а б л и ц а 4

Шероховатость поверхности покрытий и статистические показатели обработки данных выборок

Вид краски	Пористость подложки, %	Шероховатость R_a , мкм	Среднеквадратическое отклонение σ / размах данных R
ПФ-115	24	6.7	2.88/10.94
	28	7.65	1.92/8.61
	32	6.98	3.32/11.61
	Поверхность зашпатлевана	2.6	0.95/3.68
МА-15	24	4.37	2.94/10.12
	28	4.53	2.6/10.31
	32	5.4	5.61/10.1
	Поверхность зашпатлевана	2.8	1.21/4.52

Был рассчитан уровень дефектности покрытий для классов шероховатости поверхности N4 и N5 согласно ИСО 1302 (для класса шероховатости N4 ВГ равняется 8 мкм, для N5 – 16 мкм). Расчет выполнялся при условии, что в поле допуска

параметры шероховатости поверхности покрытий распределяются по нормальному закону; значение уровня дефектности q вычисляли по выражению

$$q = 0.5 - \Phi\left(\frac{ULT - R}{\sigma}\right), \quad (1)$$

где Φ – функция Лапласа; σ – среднеквадратичное отклонение; ВГ – верхняя граница допуска; R – среднее значение шероховатости поверхности.

Результаты расчета приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Уровень дефектности покрытий

Вид краски	Пористость подложки	Уровень дефектности, %, при классе шероховатости	
		N4	N5
ПФ-115	24	32.64	0.069
	28	36.84	0.103
	32	38.21	0.33
	Поверхность зашпатлевана	0.001	0.001
МА-15	24	10.93	0.007
	28	12.34	0.012
	32	32.38	3.01
	Поверхность зашпатлевана	0.006	-0.001

Выявлено, что шпатлевание поверхности перед окраской способствует формированию покрытий с уровнем дефектности, не превышающим 0,001–0,006 %.

Заключение

Установлена корреляционная зависимость между шероховатостью поверхности покрытия, классом качества их внешнего вида и фрактальной размерностью. Предложено оценивать качество поверхности лакокрасочных покрытий показателем фрактальной размерности. Установлена связь числовых значений показателя фрактальной размерности с классом качества внешнего вида покрытий. Выявлено, что с увеличением пористости цементной подложки наблюдается повышение шероховатости поверхности покрытий.

Список литературы

1. Логанина, В.И. Повышение качества лакокрасочных покрытий строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина, Л.П. Орендлихер. – М.: АСВ, 2007.
2. Жигарева, Г.В. Обзор рынка лакокрасочных материалов России: тенденции и перспективы / Г.В. Жигарева. – URL: <https://www.centrlack.ru/doc/zhigareva-280219.pdf>
3. Карякина, М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий / М.И. Карякина. – М.: Химия, 1980. – 216 с.
4. Loganina, V.I. The influence of surface quality of coatings on their deformation properties / V.I. Loganina // Contemporary Engineering Sciences. – 2014. – 7(33-36). – P. 1935–1941. – DOI: 10.12988/ces.2014.411241
5. Loganina, V.I. The method to estimate the surface appearance quality of the paint applied to the cement / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva, P.V. Monastirev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – 11(11). – P. 2409–2410. – DOI: 10.3923/jeasci.2016.2409.2410
6. Loganina, V. Method of assessment quality protective and decorative coating concrete cement / V. Loganina, L. Makarova, R. Tarasov // Case Studies in Construction Materials. – 2016. – 4. – P. 81–84. – DOI: 10.1016/j.cscm.2016.01.003

7. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христолюбов // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 2004. – № 8. – С. 10–12.
8. Wang, L. Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials / L. Wang, M. Jin, Y. Wu, Y. Zhou, S. Tang // *Construction and Building Materials*. – 2021. – 272. – Art. no. 121952. – URL: <https://www.journals.elsevier.com/construction-and-building-materials>. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121952
9. Tang, S. A review on fractal footprint of cement-based materials / S. Tang, J. Huang, L. Duan, P. Yu, E. Chen // *Powder Technology*. – 2020. – 370. – P. 237–250. – URL: www.elsevier.com/locate/powtec. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.05.065
10. Li, Y. Influence of different alkali sulfates on the shrinkage, hydration, pore structure, fractal dimension and microstructure of low-heat portland cement, medium-heat portland cement and ordinary portland cement / Y. Li, H. Zhang, M. Huang, H. Yin, K. Jiang, K. Xiao, S. Tang // *Fractal and Fractional*. – 2021. – 5 (3). – Art. no. 79. – URL: www.mdpi.com/journal/fractalfract. – DOI: 10.3390/fractalfract5030079

References

1. Loganina, V.I. Improving the quality of paint and varnish coatings for building products and structures / V.I. Loganina, L.P. Orentlicher. – M.: DIA, 2007.
2. Zhigareva, G.V. Overview of the market of paints and varnishes in Russia: trends and prospects / G.V. Zhigareva. – URL: <https://www.centrack.ru/doc/zhigareva-280219.pdf>
3. Karyakina, M.I. Physico-chemical foundations of the processes of formation and aging of coatings / M.I. Karyakina. – M.: Chemistry, 1980. – 216 p.
4. Loganina, V.I. The influence of surface quality of coatings on their deformation properties / V.I. Loganina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2014. – 7(33-36). – P. 1935–1941. – DOI: 10.12988/ces.2014.411241
5. Loganina, V.I. The method to estimate the surface appearance quality of the paint applied to the cement / V.I. Loganina, T.V. Uchaeva, P.V. Monastyrnev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – 11(11). – P. 2409–2410. – DOI: 10.3923/jeasci.2016.2409.2410
6. Loganina, V. Method of assessment quality protective and decorative coating concrete cement / V. Loganina, L. Makarova, R. Tarasov // *Case Studies in Construction Materials*. – 2016. – 4. – P. 81–84. – DOI: 10.1016/j.cscm.2016.01.003
7. Loganina, V.I. Evaluation of the decorative properties of paint and varnish coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // *Paints and varnishes and their application*. – 2004. – No. 8. – P. 10–12.
8. Wang, L. Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials / L. Wang, M. Jin, Y. Wu, Y. Zhou, S. Tang // *Construction and Building Materials*. – 2021. – 272. – Art. no. 121952. – URL: <https://www.journals.elsevier.com/construction-and-building-materials>. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121952
9. Tang, S. A review on fractal footprint of cement-based materials / S. Tang, J. Huang, L. Duan, P. Yu, E. Chen // *Powder Technology*. – 2020. – 370. – P. 237–250. – URL: www.elsevier.com/locate/powtec. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.05.065
10. Li, Y. Influence of different alkali sulfates on the shrinkage, hydration, pore structure, fractal dimension and microstructure of low-heat portland cement, medium-heat portland cement and ordinary portland cement / Y. Li, H. Zhang, M. Huang, H. Yin, K. Jiang, K. Xiao, S. Tang // *Fractal and Fractional*. – 2021. – 5 (3). – Art. no. 79. – URL: www.mdpi.com/journal/fractalfract. – DOI: 10.3390/fractalfract5030079

УДК 691

DOI 10.54734/20722958_2024_1_18

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук

Россия, г. Грозный,
Старопромывловское ш., 21А

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

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,
доктор 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

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

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,
Doctor 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

Работа подготовлена при финансовой поддержке в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» новой лаборатории «Ресурсо- и энергосберегающие технологии, оборудование и комплексы» (FZWN-2024-0002) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕАКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФИБРЫ С ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЕЙ

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

Приводятся результаты исследования влияния промышленного базальтового волокна на свойства базальтофибробетона по заданным технологическим требованиям. Экспериментально установлен оптимальный процент армирования фибробетона базальтовой фиброй. Сформулированы теоретические представления комплексного армирования бетонной структуры на макро- и микроуровне, обусловленного «механическим армированием» за счет использования волокнистых структур и «самоармированием» за счет синтеза волокнистых гидратных новообразований, что способствует повышению прочности базальтофибробетона.

Ключевые слова: фибробетон, минеральные добавки, модификаторы, фибра, микроармирование

STUDYING THE PROCESSES OF REACTIONARY INTERACTION OF FIBER WITH A CEMENT MATRIX

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

The results of industrial basalt fiber influence on the properties of basalt fiber concrete according to technological requirements are given. The optimal percentage of reinforcement of fiber concrete with basalt fiber has been experimentally established. Theoretical concepts of complex reinforcement of a concrete structure at macro and micro levels are formulated, due to «mechanical reinforcement» through the use of fibrous structures and «self-reinforcement» through the synthesis of fibrous hydrate neoplasms, which contributes to an increase of basalt fiber concrete strength.

Keywords: fiber concrete, mineral additives, modifiers, fiber, micro reinforcement

Постановка задачи. Анализ возможностей использования фибробетона, армированного базальтовым волокном, включает оценку существующих современных технологических подходов [1]. В литературе ограниченно представлены результаты исследований, рассматривающих вопрос использования оптимального по составу и виду волокон фибробетона, отвечающего требованиям по прочности, долговечности, удобоукладываемости, стойкости к коррозионным процессам и высоким температурам [2...4].

В ходе исследований изучали бетонную смесь с базальтовым волокном, в результате было выявлено, что короткие волокна оптимальны для использования в бетонной смеси [6...9].

Теоретические и натурные исследования. При проведении теоретических исследований первоначально изучали влияние промышленного базальтового волокна на свойства базальтофибробетона в зависимости от степени армирования базальтовым волокном бетонной смеси. Выходными показателями служили предел прочности при сжатии, предел прочности при изгибе бетонных образцов. В работе были заформованы образцы с различным содержанием фибры (1–4 % от массы цемента). В/Ц составило 0,35, соотношение цемент:песок – 1:2,5. В смесях применялся пластификатор «Мигарог Kombi 756». Контрольным принят состав без фибры.

Основные результаты проведенных лабораторных исследований представлены на рис. 1.

Согласно полученным данным, максимальное увеличение прочности при сжатии на 19 % и на 30 % при изгибе по сравнению с контрольным составом достигается через 28 сут твердения в составе с содержанием базальтового волокна в количестве 3 %. Бетон соответствует классу В30.

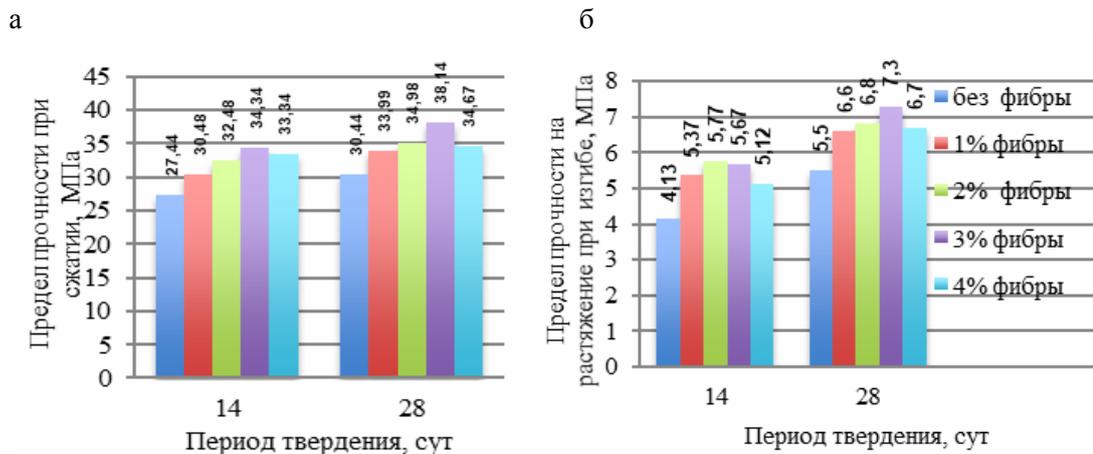


Рис. 1. Изменение прочности образцов бетонной балки с учетом содержания базальтового волокна:
а – при сжатии; б – при изгибе

Процент армирования фиброй позволяет регулировать физико-механические показатели бетона. Введение фибры значительно повышает прочность при изгибе, максимальное увеличение на 44 % наблюдается в случае добавления 2 % фибры. Однако максимальная прочность при сжатии 49 МПа достигается с добавлением 3 % фибры. Таким образом, целесообразность расходования фибры при разработке рецептур и производстве фибробетона должна определяться с учетом решения определенных технологических, экономических и эксплуатационных задач. В рамках поставленных задач оптимальным принято использование 3 % фибры.

С увеличением количества базальтовых волокон свыше 3 % наблюдается снижение показателей прочности за счет «переармирования», и дальнейшее увеличение содержания базальтового волокна не целесообразно. Избыток армированного волокна способствует снижению количества цементной матрицы между волокнами, что повышает расслоение структуры и общую пористость образца. В случае использования переармированной сырьевой смеси в печатных технологиях методом экструзии увеличивается риск засорения сопла и снижения прочности сцепления слоев строительной конструкции.

На основе разработанного вяжущего формовали образцы базальтофибробетона (см. таблицу). Образцы уплотняли вибрированием. За контрольный состав принят состав без микроармирования.

Физико-механические свойства образцов базальтофибробетона

Состав	Плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии		Предел прочности на растяжение при изгибе	
		МПа	прирост, %	МПа	прирост, %
Без армирования	2250	30,4	-	5,5	-
ЦЕМ I 42,5 Н	2160	38,1	25,3	7,1	29,3
КВ-70	2100	36,0	18,3	7,3	32,7
КВ1-70	2260	38,5	26,5	7,7	40

По результатам исследования отмечается, что значения прочности при сжатии образцов на основе цемента с использованием КВ1 достигают близких значений 38,14 и 38,5 МПа, в то же время для состава на КВ этот показатель немного ниже (36 МПа). Этот скачок обусловлен увеличением водопотребности смеси при использовании КВ и недостаточным количеством пластифицирующей добавки для обеспечения хорошей формуемости и уплотняемости смеси, о чем свидетельствует уменьшение значения плотности данного состава.

В то же время прочность бетона на растяжение при изгибе у цементного состава показала наименьший прирост по сравнению с образцами на основе композиционных вяжущих (см. таблицу), что объясняется созданием мелкокристаллической структуры бетона за счет уменьшения количества крупнокристаллических блоков портландита путем его связывания с компонентами наполнителя в составе вяжущих (пуццолановая реакция), а также путем увеличения центров кристаллизации при твердении бетона за счет повышения адгезии гидросиликатных новообразований к базальтовой фибре.

Таким образом, эффективность армирования повышается при учете природы и размера волокон базальтовой фибры. Установлен оптимальный процент армирования бетона базальтовой фиброй длиной 6 мм и диаметром 13 мкм, который составил 3 % от массы цемента. Максимальный прирост прочности по сравнению с контрольным составом показали составы на основе КВ1 (26,5 % – прочность на сжатие, 40 % – прочность на растяжение).

Взаимодействие между волокнами и матрицей – фундаментальное свойство, которое влияет на качество микроармированного цементобетона. Исследование микроструктуры базальтофибробетона показало, что контрольный состав на КВ1 без наполнителей отличается более рыхлой структурой, среди смешанных кристаллических фаз

выделяются шестиугольные пластинки портландита (рис. 2, б). Имеющаяся в структуре производственная фибра с длиной 6 мм и диаметром 13 мкм имеет более слабую степень адгезии к цементной матрице, отмечаются слабые места в виде зазоров на граничной зоне (рис. 2, а). Плохое сцепление на границе раздела «волокно – цементная матрица» повышает риск преждевременного разрушения композита, вырывания волокон из матрицы, и прочностные свойства волокон используются не полностью.

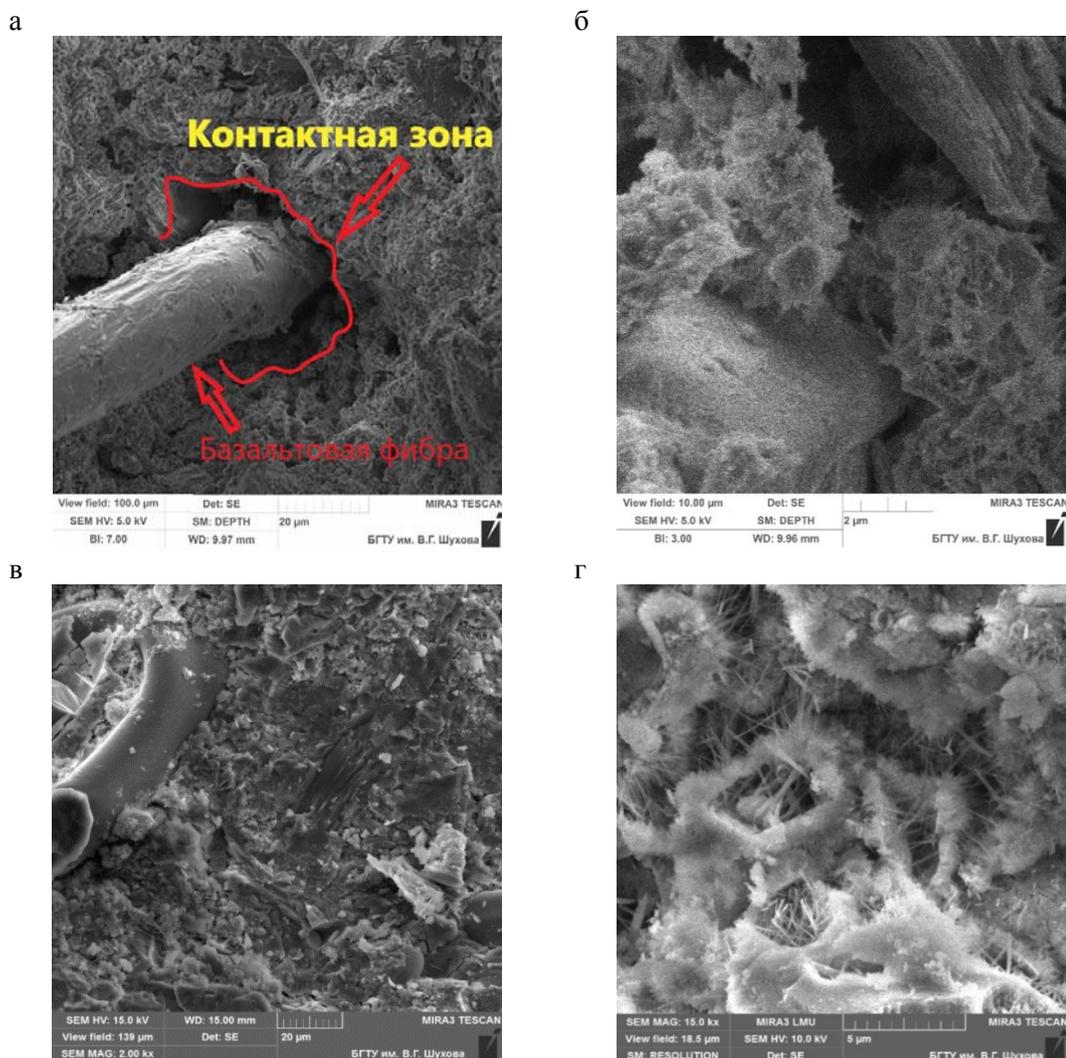


Рис. 2. РЭМ микроstructures базальтофибробетона:

а, б – контрольного состава; в, г – базальтофибробетона с добавкой отсева дробления кварцитопесчаника и гипса

Совместное применение тонкомолотого дробления кварцитопесчаника и КВ1 способствует синтезу большего числа гидратных фаз и уплотнению наиболее слабых мест контактной зоны (рис. 2, в). Дефектная структура поверхности используемых наполнителей служит подложками и центрами кристаллизации гидросиликатов. Наглядно прослеживается увеличение содержания новообразований, плотно покрывающих структуру бетона; их волокнисто-нитевидный габитус может свидетельствовать об образовании низкоосновных гидросиликатов кальция типа тоберморита (рис. 2, г). За счет синтеза кристаллических фаз наблюдается эффект самоармирования структуры на микро- и наноуровне.

Наличие новообразований тоберморитовой группы подтверждается результатами РФА. На рис. 3 выделенная область в интервале углов отражений 2θ 37–40° характерна для низкоосновных минералов типа CSH(I), минералов тоберморитовой группы $C_4S_5H_5$, $C_6S_{10}H_3$.

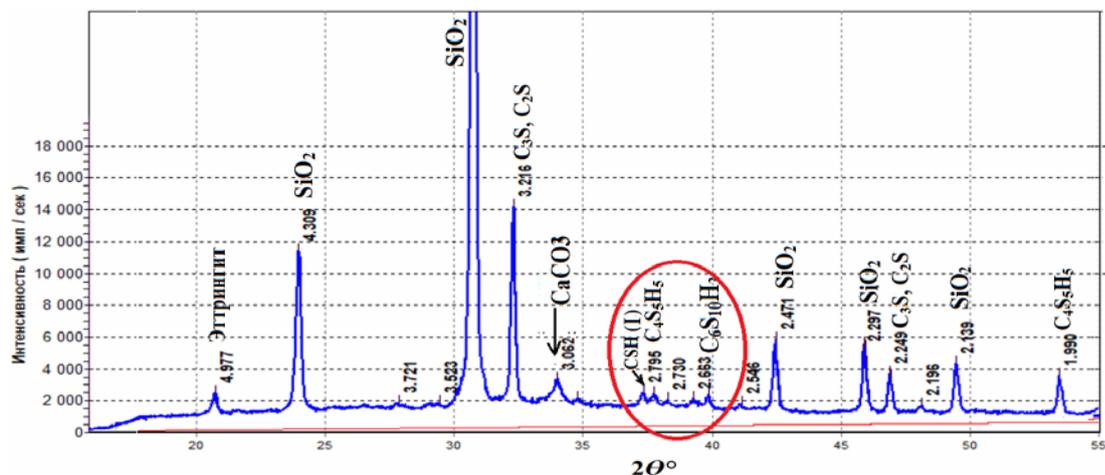


Рис. 3. Рентгенограмма базальтофибробетона:

SiO_2 – α -кварц; CaCO_3 – кальцит; C_3S – алит $\text{Ca}_3[\text{SiO}_4]\text{O}$; C_2S – белит $\text{Ca}_2[\text{SiO}_4]$;
 $\text{C}_4\text{S}_5\text{H}_5$ – тоберморит; $\text{C}_6\text{S}_{10}\text{H}_3$ – трускоттит

Основными составляющими минералами синтезированной структуры являются кварц α - SiO_2 , непрогидратированные клинкерные минералы C_3S и C_2S , карбонат кальция CaCO_3 , присутствует небольшое количество этtringита.

Таким образом, дефектные частицы тонкомолотого отсева КВП обладают повышенной физико-химической адгезией к цементной матрице, служат подложками и центрами кристаллизации гидросиликатных новообразований, плотно встраивающихся в структуру. Оптимизация состава позволила увеличить количество гидросиликатов преимущественно низкоосновного типа волокнисто-нитевидной морфологии, которые способствуют дополнительному самоармированию на микроуровне. В комплексе реализация «механического» армирования за счет волокон способствует повышению прочности при изгибе, а реализация «самоармирования» за счет синтеза новообразований увеличивает прочность базальтофибробетона при сжатии.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Аналитическое конструирование композитов: многомодельность, структура модели, декомпозиция, критерии качества / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – №2. – 2021. – С.22–28.
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. – Т. 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. Klyuev, S.V. Reliability coefficient for fibreconcrete material / S.V. Klyuev, N.F. Kashapov, O.V. Radaykin, L.S. Sabitov, A.V. Klyuev, N.A. Shchekina // Construction Materials and Products. – 2022. – 5 (2). – P. 51–58.
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. – V. 16. – e01099.

7. Klyuev, S.V. Technology of 3D printing of fiber reinforced mixtures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova, N.I. Vatin // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2021. – V. 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. – V. 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. – V. 974. – P. 131–135.

References

1. Garkina, I.A. Analytical design of composites: multi-modeling, model structure, decomposition, quality criteria / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering*. – №2. – 2021. – P.22–28.
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. Klyuev, S.V. Reliability coefficient for fibreconcrete material / S.V. Klyuev, N.F. Kashapov, O.V. Radaykin, L.S. Sabitov, A.V. Klyuev, N.A. Shchekina // *Construction Materials and Products*. – 2022. – 5 (2). – P. 51–58.
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. – V. 16. – e01099.
7. Klyuev, S.V. Technology of 3D printing of fiber reinforced mixtures / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, E.S. Shorstova, N.I. Vatin // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2021. – V. 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. – V. 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. – V. 974. – P. 131–135.

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел.: +7 (499) 183-44-38; +7 (499) 188-04-00

Обухова Светлана Юрьевна,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru

Будкина Ангелина Олеговна,
аспирант
E-mail: Angelina-line@yandex.ru

*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
ул. Вторая Красноармейская, д. 4

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе

*National Research Moscow State University of
Civil Engineering*

Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoe shosse,
tel.: +7 (499) 183-44-38; +7 (499) 188-04-00

Obukhova Svetlana Yurievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru

Budkina Angelina Olegovna,
Postgraduate
E-mail: Angelina-line@yandex.ru

*St. Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering*
Russia, 190005, St. Petersburg, 4,
Second Krasnoarmeyskaya St.

Korolev Evgeny Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector for
Scientific Work

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО В ПРИСУТСТВИИ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ ЧАСТЬ 1. СОВМЕСТИМОСТЬ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ С УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ПЛАСТИФИКАТОРАМИ

С.Ю. Обухова, Е.В. Королев, А.О. Будкина

Представлен процесс разработки научно-обоснованного технологического решения по получению стабильного резино-битумного вяжущего (РБВ). Технологическое решение предусматривает предварительный процесс девулканизации резиновой крошки в углеводородном пластификаторе в присутствии стабилизирующего агента и последующее приготовление РБВ. Приведены физико-химические свойства исследуемых материалов, определен групповой углеводородный состав пластификаторов, рассчитаны различные полуэмпирические параметры совместимости резиновой крошки и углеводородных пластификаторов. Установлены температура деструкции резиновой крошки (от 190 до 442 °С) и температура приготовления резиносодержащего модифицированного компонента (210 °С).

Ключевые слова: резиновая крошка, битум, пластификатор, совместимость

STRUCTURE FORMATION OF MODIFIED BINDER IN THE PRESENCE OF CRUMB RUBBER PART 1. COMPATIBILITY OF CRUMB RUBBER AND HYDROCARBON PLASTICIZERS

S.Yu. Obukhova, E.V. Korolev, A.O. Budkina

The article is devoted to developing science-based technological solution for obtaining crumb rubber modified bitumen (CRMB) with stable properties. The technological solution provides a preliminary process of devulcanization of crumb rubber in hydrocarbon plasticizer in the presence of stabilizing agent and subsequent preparation of CRMB. In the first part of the work the

physicochemical properties of the investigated materials are given, the hydrocarbon group composition of plasticizers is determined, various semi-empirical parameters of compatibility of crumb rubber and hydrocarbon plasticizers are calculated. The destruction temperature of crumb rubber (from 190 to 442 °C) and the temperature of rubber-containing modifying component preparation (210 °C) were determined.

Keywords: crumb rubber, bitumen, plasticizer, compatibility

Введение

Задача создания долговечных покрытий автомобильных дорог как фактора обеспечения безопасности дорожного движения и экономической эффективности перевозки грузов и пассажиров сохраняет научную актуальность и практическую значимость. Известным самостоятельным способом модифицирования нефтяных битумов является введение измельченной резины, полученной от комплексной переработки изношенных автомобильных покрышек и других резинотехнических изделий. Данный способ имеет очевидные преимущества [1, 2], но есть и негативный опыт эксплуатации асфальтобетонных, модифицированных резиновой крошкой [3, 4]. Для устранения недостатков технологии модифицирования битумов резиновой крошкой разработано несколько перспективных способов, которые, как правило, заключаются в деструкции поверхности резины с помощью сильных сдвиговых воздействий [5], ионизирующего излучения [6] или обработки девулканизатором [7–9]. Однако для этих способов сохраняется проблема диспергирования в расплаве битума вследствие значительного возрастания площади поверхности резинового модификатора и/или изменения смачиваемости поверхности. Это приводит к отсутствию однородного распределения резиновой крошки и формированию агрегатов, состоящих из несмоченных частиц, – упругое последствие, вызывающее интенсивное трещинообразование, особенно в низкотемпературный период эксплуатации [10]. В связи с этим мировым сообществом разрабатываются другие способы модифицирования битумов резиновой крошкой.

Анализ результатов исследований и гипотез, представленных авторами различных публикаций [5, 11–13], показывает, что в настоящее время отсутствует единое научное представление о формировании параметров структуры резино-битумных вяжущих, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. При этом очевидно, что резино-битумные вяжущие обладают признаками дисперсно-наполненных композиционных материалов, особенностью которых является формирование не только каркаса из частиц резины, но и плёночной фазы битума относительно высокой концентрации.

В большинстве случаев процесс термомеханической пластификации резины исследователи описывают следующим образом: при совместной термомеханической обработке измельченная резина набухает в масляных фракциях битума, что ослабляет межмолекулярные связи в ней. В результате продолжающихся подвода тепла и механических воздействий происходит разрыв по этим ослабленным связям, то есть осуществляется деструкция/девулканизация резины с образованием каучукового вещества, которое диффундирует в битум и структурирует его [14, 15].

Нами были изучены параметры совместимости резиновой крошки с углеводородными пластификаторами для возможности получения стабильного резино-битумного вяжущего.

Полуэмпирические параметры совместимости

Химические составы резиновой крошки и углеводородных пластификаторов сложны, и молекулы в разных физических условиях демонстрируют различное поведение при смешивании. По этой причине существуют различные полуэмпирические параметры совместимости:

1) *Коэффициент дисперсности Траклера* [16], который учитывает соотношение между суммой смол и ароматических углеводородов и суммой асфальтенов и парафинафтеновых углеводородов:

$$K_d = \frac{A_p + C}{ПН + A_c}, \quad (1)$$

где K_d – коэффициент дисперсности Тракслера; A_p – количество ароматических углеводородов; C – количество смол; $ПН$ – количество парафинафтеновых углеводородов; A_c – количество асфальтенов.

Из формулы (1) следует, что с увеличением величины *коэффициента дисперсности Тракслера* возрастает содержание ароматических фракций и смол в пластификаторе, имеющих высокое сродство к резиновой крошке и способных растворять полимерные молекулы резины [17].

2) *Массовое соотношение «парафино-нафтеновые соединения:асфальтены»* (ПН:АС), косвенно характеризующее вязкость системы, влияющую на скорость процессов набухания и диспергирования молекул каучука. Чем выше соотношение ПН:АС, тем лучше растворяющая способность и ниже вязкость пластификатора, тем быстрее протекают процессы набухания и диспергирования молекул каучука.

3) *Параметр растворимости Гильдебранда* [18] используется для предсказания растворимости полимера (модификатора) в различных органических растворителях. Данный параметр характеризует интенсивность межмолекулярных взаимодействий в веществе и численно равен энергии, затрачиваемой на удаление молекул на бесконечно большое расстояние (на котором силами притяжения можно пренебречь). Параметр растворимости рассчитывается по следующей формуле:

$$\delta\Pi = \sqrt{\frac{E}{V}}, \quad (2)$$

где $\delta\Pi$ – параметр растворимости пластификатора; E – энергия испарения; V – объем вещества.

Для определения энергии испарения органических веществ применимо уравнение Трoutона:

$$E = kT_K, \quad (3)$$

где k – константа, равная 89,2 Дж/(моль·К); T_K – температура кипения.

С известной точностью с учетом особенности контактирующих веществ можно предположить, что для пластификатора и модификатора температуру кипения в формуле (3) можно заменить: для пластификатора – на температуру вспышки пластификатора, а для модификатора – на температуру выгорания модификатора. Отсюда параметры растворимости пластификатора и модификатора соответственно примут вид:

$$\delta\Pi = \sqrt{\frac{kT_{\text{всп}}}{V}} \text{ и } \delta M = \sqrt{\frac{kT_{\text{в}}}{V}}, \quad (4)$$

где $\delta\Pi$, δM – параметры растворимости пластификатора и модификатора соответственно; E – энергия испарения; V – объем вещества; k – константа, равная 89,2 Дж/(моль·К); T_K – температура кипения; $T_{\text{всп}}$ – температура вспышки пластификатора; $T_{\text{в}}$ – температура выгорания модификатора.

Условие образования однородной дисперсной системы остаётся неизменным: $\Delta G < 0$, где ΔG – изобарно-изотермический потенциал (свободная энергия Гиббса).

Для выполнения указанного условия достаточно достижение величины энтальпии процесса, равной нулю. Это возможно при равенстве параметров растворимости пластификатора и модификатора:

$$\Delta\delta^2 = (\delta\Pi - \delta M)^2 = 0. \quad (5)$$

Материалы и методы исследований

Использовалась резиновая крошка (РК ЧРЗ 0,5), полученная методом дробления и измельчения отходов резинотехнических изделий – пневматических шин легковых

транспортных средств, производства ООО «Чеховский регенератный завод», Россия. Показатели физических свойств исследуемой резиновой крошки представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Основные свойства резиновой крошки РК ЧРЗ 0,5

Наименование показателя	Фактические значения
Массовая доля резины, просеянной через сито, % с сеткой № 0,5	98,18
с сеткой № 0,63	100
Массовая доля остатков кордного волокна, %	0,77
Потеря массы при сушке, %	0,34
Массовая доля частиц черных металлов, %	следы
Массовая доля механических примесей в виде цветного металла, камней, стекла и др.	отсутствует
Присутствие комков распушенного кордного волокна	отсутствует

В качестве жидких сред-носителей рассматривались углеводородные пластификаторы: экстракт нефтяной остаточный средневязкий производства ООО «ЛУКОЙЛ-Волгограднефтепереработка» и отработанное масло индустриальное после использования в агрегате цеха производства аммиака. Масло отработанное индустриальное предоставлено филиалом «Азот» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в г. Березники, Пермский край, Россия. Физические свойства пластификаторов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Физические свойства углеводородных пластификаторов

Наименование показателя	Фактические показатели свойств	
	экстракта остаточного средневязкого	отработанного масла индустриального
Кинематическая вязкость при 50 °С, мм ² /с	905,01	21,88
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	47,69	5,33
Температура вспышки, °С	284,3	220,5

В качестве девулканизирующих компонентов рассматривались: транс-полиоктеномерный каучук, произведенный на основе циклооктена в Германии, и синтетический воск, полученный синтезом Фишера – Тропша из природного газа в специальных реакторах, произведенный в России.

Для приготовления резино-битумного вяжущего использовался нефтяной дорожный битум марки БНД 50/70 производства ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез». Битум был исследован на соответствие требованиям ГОСТ 33133-14. Результаты лабораторных испытаний свойств битума представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Физико-механические свойства битума БНД 50/70

Наименование показателей	Требование ГОСТ 33133	Фактические показатели
Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при температуре 25°С	51-70	55
Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при температуре 0°С	не менее 18	23
Температура размягчения по кольцу и шару, °С	не ниже 51	53
Растяжимость, см при 0°С	не менее 3,5	3,5
Температура хрупкости, °С	не выше -16	-22
Температура вспышки, °С	не ниже 230	248
Изменение массы образца после старения, %	не более 0,6	0,27
Изменение температуры размягчения образца после старения, %	не более 7	5,2

Для расчета полуэмпирических параметров был определен групповой углеводородный состав пластификаторов методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением на лабораторной установке «Градиент-М» по методике ГУП ИНХП РБ.

Определение температуры приготовления дисперсной системы «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» осуществлялось с помощью метода термического анализа на высокотемпературном дифференциальном сканирующем калориметре LINSEIS DSC PT-1600.

Результаты и обсуждение

По результатам анализа хроматограмм и полученных пиков были определены групповые составы углеводородных пластификаторов (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Групповой углеводородный состав исследуемых пластификаторов

Наименование групп углеводородов	Экстракт остаточный средневязкий	Отработанное масло промышленное
	Содержание групп углеводородов, мас. %:	
– Масла:	75,7	82,8
парафино-нафтеновые	22,6	62,7
ароматические:	53,1	20,1
легкая ароматика	14,6	12,9
средняя ароматика	13,9	4,0
тяжелая ароматика	24,6	3,2
– Смолы:	16,0	10,2
смолы I	5,4	3,2
смолы II	10,6	7,0
– Асфальтены	8,4	7,0

На основе данных по групповому углеводородному составу пластификаторов были рассчитаны полуэмпирические параметры совместимости для пластификаторов (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Полуэмпирические параметры совместимости пластификаторов

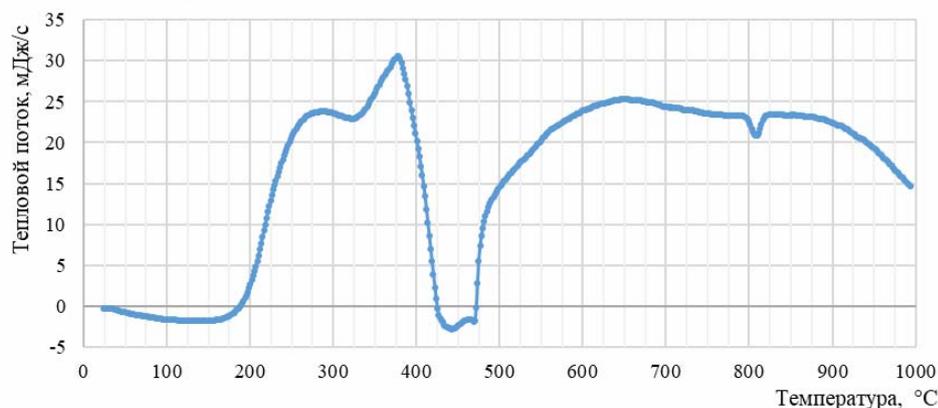
№ п/п	Расчетные полуэмпирические параметры для пластификаторов	Экстракт остаточный средневязкий	Отработанное масло промышленное
1	Коэффициент дисперсности Тракслера	2,2	0,4
2	Массовое соотношение ПН:АС	2,7	9,0
3	Параметр растворимости Гильдебранда для пластификатора, $(Дж/см^3)^{0,5}$	25,7	24,2
	Параметр растворимости Гильдебранда для модификатора (резиновой крошки)*, $(Дж/см^3)^{0,5}$	16,8	
	$\Delta\delta, (Дж/см^3)^{0,5}$	8,9	7,4

*согласно данным производителя резиновой крошки более 60 % ее состава представлено изопреновым каучуком, поэтому параметр растворимости для модификатора «резиновая крошка» рассчитывался как для изопренового каучука.

Анализ совместимости пластификаторов (см. табл. 5) демонстрирует некоторую противоречивость в данных, что затрудняет определение оптимального пластификатора на основании расчётных значений. Так, в соответствии с коэффициентом дисперсности Тракслера наиболее совместимым с резиновой крошкой является экстракт остаточный средневязкий, тогда как в соответствии с параметром, демонстрирующим массовое соотношение ПН:АС, наиболее совместимым является отработанное масло промышленное. При этом по параметру Гильдебранда оба пластификатора

имеют примерно одинаковую предрасположенность к совместимости с резиновой крошкой. Таким образом, рассматриваемые полуэмпирические параметры требуют уточнения и, соответственно, проведения дополнительных экспериментальных исследований, которые будут подробно описаны во второй части статьи.

Для определения *температуры приготовления дисперсной системы «углеводородный пластификатор – резиновая крошка»* был проведен термический анализ. Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) резиновой крошки представлены на рисунке.



Кривая ДСК для резиновой крошки РК ЧР3 0,5

Данные ДСК показывают, что термоокисление исследуемой резиновой крошки происходит в четыре стадии:

1) эндотермическая стадия (с поглощением тепла) при 24–190 °С, связанная с испарением воды и других низкомолекулярных продуктов;

2) экзотермическая стадия (с выделением тепла) при 190–425 °С, отождествляемая с основным периодом термоокисления материала (протекет до 378 °С) и связанным с этим испарением образовавшихся продуктов окисления, что свидетельствует о начале деструктивного процесса резиновой крошки;

3) эндотермическая стадия при 425–470 °С с пиком при 442 °С, характеризующая процесс разложения и деструкции резиновой крошки;

4) экзотермическая стадия при температуре выше 470 °С, характеризующаяся процессом термоокисления продуктов деструкции резиновой крошки и фазовыми изменениями технического углерода.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что деструкция резиновой крошки инициируется при температуре 190 °С и протекает до температуры 442 °С. Учитывая данные по ДСК для резиновой крошки и по температуре вспышки для пластификаторов, была выбрана оптимальная температура приготовления дисперсных систем на их основе – 210 °С.

Полученные результаты легли в основу разработки методики приготовления дисперсной системы «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» (резиносодержащего модифицированного компонента) и резино-битумного вяжущего.

Выводы

По результатам определения группового углеводородного состава пластификаторов рассчитаны полуэмпирические параметры совместимости резиновой крошки и углеводородных пластификаторов. Установлена противоречивость параметров совместимости, затрудняющая определение совместимого углеводородного пластификатора на основании расчётных значений для исследуемых систем.

Установлены температура деструкции резиновой крошки (от 190 до 442 °С) и оптимальная температура приготовления резиносодержащего модифицированного компонента (210 °С).

На основе результатов проведенных исследований во второй части работы будут приведены методики приготовления дисперсной системы «углеводородный пластификатор – резиновая крошка» (резиносодержащего модифицированного компонента) и

резино-битумного вяжущего, а также установлены зависимости влияния рецептурно-технологических факторов резинового модификатора на параметры структуры и свойств резино-битумного вяжущего.

Список литературы

1. Yu, J. Modification of Asphalt Rubber with Nanoclay towards Enhanced Storage Stability / J. Yu, Zh. Ren, H. Yu, D. Wang, S. Shekhovtsova, E. Korolev, Zh. Gao // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – 2093.
2. Yu, H. Decision support for selecting optimal method of recycling waste tire rubber into wax-based warm mix asphalt based on fuzzy comprehensive evaluation / H. Yu, Y. Chen, Q. Wu, L. Zhang, Z. Zhang, J. Zhang // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 265. – 121781.
3. Duan, H. Effect of crumb rubber percentages and bitumen sources on high-temperature rheological properties of less smell crumb rubber modified bitumen / H. Duan, C. Zhu, Y. Li, H. Zhang, S. Zhang, F. Xiao, S. Amirkhanian // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 277. 122248.
4. Xiao, M. Progress in combined modification of rubberized asphalt / M. Xiao, Y. Jitao, L. Chen // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 634. – 012104.
5. Wang, H. The role of thermodynamics and kinetics in rubber-bitumen systems: A theoretical overview / H. Wang, P. Apostolidis, J. Zhu, X. Liua, A. Skarpas, S. Erkens // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2020. – Vol. 22. – P. 1785–1800.
6. Makoundou, C. Functionalization of Crumb Rubber Surface for the Incorporation into Asphalt Layers of Reduced Stiffness: An Overview of Existing Treatment Approaches / C. Makoundou, K. Johansson, V. Wallqvist, C. Sangiorgi // *Recycling*. – 2021. – Vol. 6. – 19.
7. Li, H. Physical, Rheological and Stability Properties of Desulfurized Rubber Asphalt and Crumb Rubber Asphalt / H. Li, B. Dong, D. Zhao // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 44. – P. 5043–5056.
8. Li, X. Cryogenic grinding performance of scrap tire rubber by devulcanization treatment with ScCO₂ / X. Li, X. Xu, Z. Liu // *Powder Technology*. – 2020. – Vol. 374. – P. 609–617.
9. Zheng, W. A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder / W. Zheng, H. Wang, Y. Chen, J. Ji, Z. You, Y. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 297. – 123820.
10. Radeef, H.R. Effect of aging and moisture damage on the cracking resistance of rubberized asphalt mixture / H.R. Radeef, N.A. Hassan, A.R.Z. Abidin, M.Z.H. Mahmud, H. Yaacob, N. Mashros, A. Mohamed // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 42. – P. 2853–2858.
11. Xu, X. Rubber-Bitumen Interaction of Plant-Blended Rubberized Bitumen Prepared Under Various Blending Conditions / X. Xu, Z. Leng, J. Lan, R. Li, Z. Tan, A. Sreeram // In: Di Benedetto, H., Baaj, H., Chailleux, E., Tebaldi, G., Sauzéat, C., Mangiafico, S. (eds) *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials*. ISBM 2020. RILEM Bookseries. Springer, Cham. – 2022. – Vol 27.
12. Lv, Q. Understanding the particle effects and interaction effects of crumb rubber modified asphalt regarding bonding properties / Q. Lv, W. Huang, M. Zheng, Y. Hu, C. Yan, J. Wang // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 348. – 128716.
13. Mahmoudi, Y. Experimental Evaluation of Swelling and Absorption of Crumb Rubber Aggregates / Y. Mahmoudi [et al.] // In: Di Benedetto, H., Baaj, H., Chailleux, E., Tebaldi, G., Sauzéat, C., Mangiafico, S. (eds) *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials*. ISBM 2020. RILEM Bookseries. Springer, Cham. – 2022. – Vol 27.

14. Lanotte, M. Soft Computing Approach for Predicting the Effects of Waste Rubber–Bitumen Interaction Phenomena on the Viscosity of Rubberized Bitumen / M. Lanotte // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – 13798.
15. Rochlani, M. Investigating the performance-related properties of crumb rubber modified bitumen using rheology-based tests / M. Rochlani, S. Leischner, D. Wareham, S. Caro, G. Canon Falla, F. Wellner // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2022. – Vol. 23, no. 3. – P. 877–887.
16. Claine Petersen, J. Chapter 14 Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability / J. Claine Petersen // Editor(s): Teh Fu Yen, George V. Chilingarian. *Developments in Petroleum Science*. Elsevier. – 2000. – Vol. 40. – Part B. – P. – 363–399.
17. Wang, C. Performance of bio-oil modified paving asphalt: chemical and rheological characterization / C. Wang, T. Xie, W. Cao // *Materials and Structures*. – 2019. – Vol. 52. – 98.
18. Gallu, R. On the use of solubility parameters to investigate phase separation-morphology-mechanical behavior relationships of TPU / R. Gallu, F. Mechin, F. Dalmas, J.-F. Gerard, R. Perrin, F. Loup // *Polymer*. – 2020. – Vol. 207. – 122882.

References

1. Yu, J. Modification of Asphalt Rubber with Nanoclay towards Enhanced Storage Stability / J. Yu, Zh. Ren, H. Yu, D. Wang, S. Shekhovtsova, E. Korolev, Zh. Gao // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – 2093.
2. Yu, H. Decision support for selecting optimal method of recycling waste tire rubber into wax-based warm mix asphalt based on fuzzy comprehensive evaluation / H. Yu, Y. Chen, Q. Wu, L. Zhang, Z. Zhang, J. Zhang // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 265. – 121781.
3. Duan, H. Effect of crumb rubber percentages and bitumen sources on high-temperature rheological properties of less smell crumb rubber modified bitumen / H. Duan, C. Zhu, Y. Li, H. Zhang, S. Zhang, F. Xiao, S. Amirkhanian // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 277. 122248.
4. Xiao, M. Progress in combined modification of rubberized asphalt / M. Xiao, Y. Jitao, L. Chen // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 634. – 012104.
5. Wang, H. The role of thermodynamics and kinetics in rubber–bitumen systems: A theoretical overview / H. Wang, P. Apostolidis, J. Zhu, X. Liua, A. Sarpas, S. Erkens // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2020. – Vol. 22. – P. 1785–1800.
6. Makoundou, C. Functionalization of Crumb Rubber Surface for the Incorporation into Asphalt Layers of Reduced Stiffness: An Overview of Existing Treatment Approaches / C. Makoundou, K. Johansson, V. Wallqvist, C. Sangiorgi // *Recycling*. – 2021. – Vol. 6. – 19.
7. Li, H. Physical, Rheological and Stability Properties of Desulfurized Rubber Asphalt and Crumb Rubber Asphalt / H. Li, B. Dong, D. Zhao // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 44. – P. 5043–5056.
8. Li, X. Cryogenic grinding performance of scrap tire rubber by devulcanization treatment with ScCO₂ / X. Li, X. Xu, Z. Liu // *Powder Technology*. – 2020. – Vol. 374. – P. 609–617.
9. Zheng, W. A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder / W. Zheng, H. Wang, Y. Chen, J. Ji, Z. You, Y. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 297. – 123820.
10. Radeef, H.R. Effect of aging and moisture damage on the cracking resistance of rubberized asphalt mixture / H.R. Radeef, N.A. Hassan, A.R.Z. Abidin, M.Z.H. Mahmud, H. Yaacob, N. Mashros, A. Mohamed // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 42. – P. 2853–2858.
11. Xu, X. Rubber-Bitumen Interaction of Plant-Blended Rubberized Bitumen Prepared Under Various Blending Conditions / X. Xu, Z. Leng, J. Lan, R. Li, Z. Tan,

A. Sreeram // In: Di Benedetto, H., Baaj, H., Chailleux, E., Tebaldi, G., Sauzéat, C., Mangiafico, S. (eds) Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. ISBM 2020. RILEM Bookseries. Springer, Cham. – 2022. – Vol 27.

12. Lv, Q. Understanding the particle effects and interaction effects of crumb rubber modified asphalt regarding bonding properties / Q. Lv, W. Huang, M. Zheng, Y. Hu, C. Yan, J. Wang // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 348. – 128716.

13. Mahmoudi, Y. Experimental Evaluation of Swelling and Absorption of Crumb Rubber Aggregates / Y. Mahmoudi [et al.] // In: Di Benedetto, H., Baaj, H., Chailleux, E., Tebaldi, G., Sauzéat, C., Mangiafico, S. (eds) Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. ISBM 2020. RILEM Bookseries. Springer, Cham. – 2022. – Vol 27.

14. Lanotte, M. Soft Computing Approach for Predicting the Effects of Waste Rubber–Bitumen Interaction Phenomena on the Viscosity of Rubberized Bitumen / M. Lanotte // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – 13798.

15. Rochlani, M. Investigating the performance-related properties of crumb rubber modified bitumen using rheology-based tests / M. Rochlani, S. Leischner, D. Wareham, S. Caro, G. Canon Falla, F. Wellner // International Journal of Pavement Engineering. – 2022. – Vol. 23, no. 3. – P. 877–887.

16. Claine Petersen, J. Chapter 14 Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability / J. Claine Petersen // Editor(s): Teh Fu Yen, George V. Chilingarian. Developments in Petroleum Science. Elsevier. – 2000. – Vol. 40. – Part B. – P. 363–399.

17. Wang, C. Performance of bio-oil modified paving asphalt: chemical and rheological characterization / C. Wang, T. Xie, W. Cao // Materials and Structures. – 2019. – Vol. 52. – 98.

18. Gallu, R. On the use of solubility parameters to investigate phase separation-morphology-mechanical behavior relationships of TPU / R. Gallu, F. Mechin, F. Dalmas, J.-F. Gerard, R. Perrin, F. Loup // Polymer. – 2020. – Vol. 207. – 122882.

УДК 69:519.7

DOI 10.54734/20722958_2024_1_33

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

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ: ОТ ЭМПИРИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ФУНДАМЕНТАЛИЗАЦИИ

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

Реализован подход к созданию композиционных материалов с использованием методов системного анализа. Композит рассматривается как совокупность элементов, связанных отношениями, порождающими интегративное качество. Реализуются синергетический, информационный и гомеостатический подходы; учтены парадоксы целостности и иерархичности. Затрагиваются вопросы смены парадигмы. Предполагается возможность формирования иной системы взглядов на основе принципиально новых базовых моделей и изменения принципа управления формированием исходной структуры. Используется принцип имитации сложной системы и целенаправленности (сопоставление сложной системы с множеством частных критериев и специально разработанных глобальных критериев, описывающих ее сущность). Указываются примеры синтеза композитов на основе выявления кинетических процессов формирования их физико-механических характеристик.

Ключевые слова: композиты, сложные системы, имитационные модели, оценка качества, управление свойствами

FORMATION OF COMPOSITE PROPERTIES: FROM EMPIRICAL APPROACH TO FUNDAMENTALIZATION

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

An approach to the creation of composite materials using the methods of system analysis has been implemented. The composite is considered as a set of elements connected by relationships that generate an integrative quality. Synergetic, informational and homeostatic approaches are being implemented. the paradoxes of integrity and hierarchy are taken into account. Issues of paradigm shift are touched upon. It is supposed to form a different system of views on the basis of fundamentally new basic models and change the principle of managing the formation of the initial structure. The

principle of imitation of a complex system and purposefulness is used (comparison of a complex system with a set of particular criteria and specially developed global criteria that describe its essence). Examples of the synthesis of composites based on the identification of kinetic processes for the formation of their physical and mechanical characteristics are given.

Keywords: composites, complex systems, simulation models, quality assessment, property control

Разработка новых строительных материалов требует перехода от эмпирического подхода к созданию единой теории, позволяющей систематизировать эмпирические результаты (часто противоречивые) изучения свойств материалов. Количественное описание процессов структурообразования здесь рассматривается как необходимое условие для решения задач управления и оптимизации производства. Здесь многостадийную, многопараметрическую сложную химико-технологическую систему предлагается рассматривать как совокупность отдельных самостоятельных простых блоков подсистем с определенными их входами, выходами, возмущениями и управляющими воздействиями. Описание системы не может вестись по принципу простого сложения выделенных блоков. Необходимо представление системы как целостного образования из иерархически организованного множества взаимосвязанных элементов с определенными соотношениями, связями между ними (создают качественно новые совокупные синергетические эффекты). Управление структурообразованием рассматривается как технологическое средство управления качеством.

Эволюция взглядов на разработку композиционных материалов проанализирована в [1...3] с точки зрения смены парадигм, основанных на базовых моделях непрерывной саморазвивающейся среды, в сторону парадигм, основанных на моделях структурированной саморазвивающейся среды, на идеях и методах системного подхода и синергетики. Одним из перспективных направлений является представление композиционных материалов как многоцелевых систем (объемные соединения химически или физически различных компонентов, имеющих четкую границу раздела фаз). Им свойственны также свойства, которыми не обладает ни один из компонентов, взятых в отдельности.

При формировании межэлементных связей формируется определенная структура системы: в зависимости от типа организации можно формировать различные структуры сочетания элементов и их связей. Структура системы (выделение в системе различных уровней и типов взаимосвязей между ними; последовательное включение систем более низкого уровня в системы более высокого уровня) модульно-иерархическая. Результаты автономных исследований модулей могут быть использованы для определения интегративных свойств (определяются связями между модулями, уровнями и на каждом из уровней; в основном только на качественном уровне). Системный подход может уменьшить или даже устранить неопределенность, присутствующую решаемой задаче; реконструировать его в моделях, отвечающих задачам исследования; выявлять объекты, свойства и отношения исследуемой системы с учетом взаимного влияния внешней среды. Структурная организация материала определяет конструктивное исполнение изделия или конструкции и во многом – функциональные свойства всей системы.

Условия переноса результатов автономных исследований на систему в целом определяются полнотой понимания процессов формирования структуры и свойств системы. Учитывая сложность объекта исследования (многомерность, многосвязность, неполнота диагностической информации), диагностической интерпретации анализируемых факторов, вероятностный характер диагностической информации возникает необходимость использования методов как конкретного, так и абстрактно-логического познания. Каждый новый логический этап продолжает предыдущий и служит исходной предпосылкой для предыдущего.

Добиться оптимизации всех критериев q_i одновременно невозможно в принципе; можно лишь достичь только некоторого компромисса (сочетания требуемых качеств). Иногда эффективным является сведение многокритериальной задачи к однокритериальной путем расстановки приоритетов. В этом случае в многокритериальной задаче

оптимизации на множестве допустимых решений задаются лексикографические отношения предпочтения (ранжировка критериев по важности); оптимизация структуры и свойств сложной системы, состоящей из взаимосвязанных подсистем, находящихся на разных иерархических уровнях, легко представляется в лексикографической форме. Часто используют метод решения дискретных и линейных лексикографических задач, основанный на свертывании всех критериев в один.

В задачах многокритериальной оптимизации при переходе от одного варианта к другому, как правило, улучшаются значения одних критериев, но ухудшаются значения других (решение большинства задач однокритериальной оптимизации позволяет получить однозначное решение). Компромисс разрешается введением тех или иных дополнительных ограничений или субъективных предположений: нельзя говорить об *объективном единственном решении* задачи; выбор наилучшего решения в значительной степени субъективен. Решение задачи оптимизации существенно зависит от результатов ранжирования критериев; избавиться от этого недостатка можно методом последовательных уступок: многокритериальная задача сводится к поочередной максимизации частных критериев и выбору величин уступок (чем уступки меньше, тем приоритет жестче); оптимальной считается любая стратегия, соответствующая условному максимуму последнего по важности критерия. При формулировке и ранжировке критериев широко используются экспертные методы [5]; выявляются и группируются критерии, которые подлежат оптимизации (максимизации или минимизации) либо ранжированию. Каждый эксперт самостоятельно проводит ранжирование критериев путем определения их значимости, используя метод экспертных оценок. Составляется матрица (x_{ijl}) предпочтений, позволяющая попарно сравнить критерии. Это дает возможность определить их сравнительные весовые оценки. Элементы матрицы парного сравнения l -м экспертом принимаются в виде

$$X_{ijl} = \begin{cases} 2, & \text{если качество } K_i \text{ доминирует над } K_j; \\ 1, & \text{если качества равнозначны;} \\ 0, & \text{если качество } K_i \text{ менее значимо, чем качество } K_j. \end{cases}$$

По каждому критерию качества определяется сумма баллов:

$$S_i = \sum_{j=1}^n X_{ij}, i = \overline{1, n}.$$

Относительная значимость каждого критерия:

$$M_i = \frac{S_i}{n^2}; \sum_{i=1}^n x_{ij} + \sum_{j=1}^n x_{ij} = 2n, \quad \sum_i \sum_l x_{ij} = n^2 = \sum_{i=1}^n S_i.$$

Далее определяется ранг каждого критерия. Принципиально следует оптимизировать не один, а все важные критерии (многие из них противоречивые). С увеличением количества рассматриваемых критериев растет информация о возможностях исследуемого объекта и, соответственно, о том, насколько хорошо модель описывает реальную ситуацию.

В качестве реализации разработанного подхода укажем использованные нами методологические принципы создания материалов с использованием методов системного анализа и на основе моделирования кинетических процессов формирования их физико-механических характеристик (см. таблицу).

Принципы проектирования сложных систем

№№	Принцип	Содержание
1	Многомодельность	Описание с достаточной степенью адекватности различных аспектов сложной системы (невозможно на основе единственной модели); возможны различные взаимосвязанные представления, отображающие отдельные аспекты поведения или структуры системы
2	Декомпозиция	Сведение одной задачи большой размерности к нескольким задачам меньшей размерности (декомпозиция проектируемого объекта приводит к иерархическому принципу проектирования по этапам)
3	Иерархическое строение модели сложных систем	Построение модели осуществляется на разных уровнях абстрагирования или детализации в рамках фиксированных представлений; построение иерархической структуры критериев качества и разработанной в соответствии с ней иерархической структуры собственно системы; когнитивное моделирование с построением орграфа; поуровневый спуск от общих моделей концептуального уровня к частным
4	Минимизация размерности критериального пространства	Требуемое число элементов критериального пространства устанавливается исходя из дифференциального порога при выделении классов качества с обеспечением необходимого уровня соотношения сигнал/шум (лучше всего использовать независимые частные критерии качества)
5	Итерационное проектирование	Последовательное приближение по результатам моделирования и оптимизации на каждом этапе проектирования
6	Унификация моделей	Основная цель – минимизация числа вновь разрабатываемых моделей
7	Верификация (поэтапная)	Подтверждение соответствия конечного продукта предопределённым эталонным требованиям

Поведение системы всегда определяется ее структурой: правильность гипотезы о будущем состоянии объекта зависит от того, насколько правильно определили параметры исследуемого объекта, взаимосвязи между ним и внешней средой; научное описание никогда не охватывает всех деталей, оно всегда выделяет существенные элементы структур и связей.

При построении модели описание с достаточной степенью адекватности различных аспектов сложной системы невозможно на основе единственной модели; возможны различные взаимосвязанные представления, отображающие отдельные аспекты поведения или структуры системы. Одна задача большой размерности сводится к нескольким задачам меньшей размерности; декомпозиция проектируемого объекта приводит к иерархическому принципу проектирования по этапам.

На основе этих принципов и строится общая схема проектирования (см. рисунок). Фактически проектирование системы сводится к построению ее сложной модели. Предполагается, что компоненты системы, в свою очередь, могут рассматриваться как системы. Проектируемая система является компонентом системы более высокого порядка (*надсистемы*). Определяется *иерархия систем* – расположение частей или элементов целого в порядке от высшего к низшему. Проект системы объединяет частные, взаимосвязанные, взаимообусловленные модели, отражает значительное число параметров и связей между ними, не всегда простых для формализованного описания. В этом смысле о проекте системы можно говорить как о большой сложной модели, отражающей все свойства будущей реальной системы. Проект представляет собой ряд

зависимостей между целями проектирования, возможными целями их достижения, окружающей средой и ресурсами.

Выбор некоторого проектного решения из возможных альтернативных вариантов (средство достижения целей проектирования) осуществляется на основе некоторого показателя, обобщенно характеризующего степень достижения поставленной цели тем или иным вариантом проекта. Здесь система рассматривается как совокупность взаимосвязанных управляемых подсистем, объединенных общей целью функционирования для решения заданной проблемы в некотором диапазоне условий с учетом показателя «эффективность-стоимость» (отражает соотношение между эффективностью решения поставленной задачи и суммарными затратами). При решении отдельных задач, в том числе обороны страны, иногда этот показатель может и не учитываться.

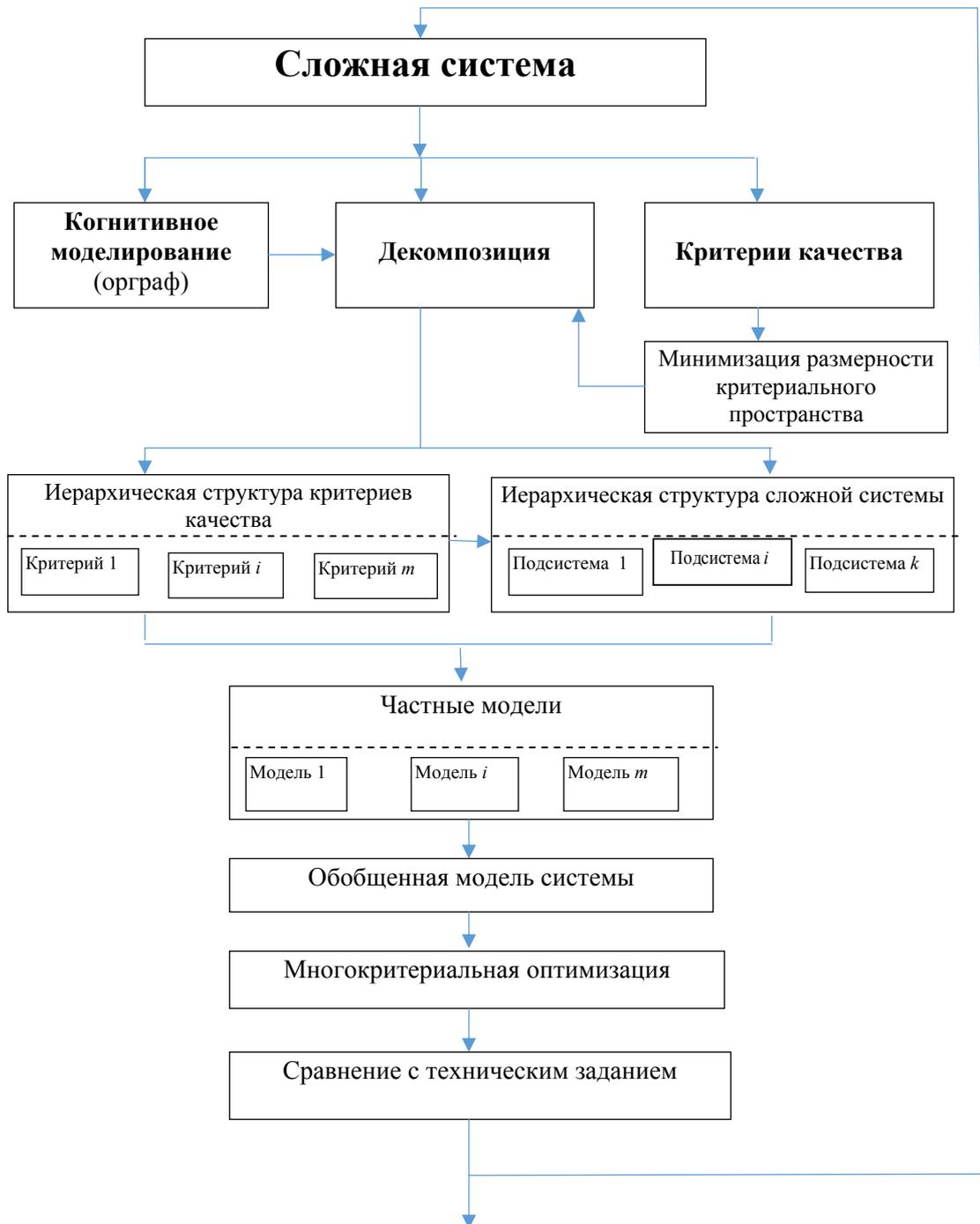


Схема проектирования сложной системы

Любые *изменения внешней среды* (динамическая система) влияют на систему; как правило, верно и обратное; при проектировании системы с длительным периодом эксплуатации учитывается не только сегодняшнее состояние среды, но и прогнозируются ее изменения; предусматриваются возможные отказы подсистем с передачей функций другой подсистеме; возможно резервирование подсистем; возможны различные модификации системы. Проектирование с системных позиций – это проектирование части целого как элемента целого; критерием оценки является показатель, обеспечивающий оптимальность вышестоящей системы.

Моделирование сложных систем основывается на методах системного анализа (системная проблема выражается в аристотелевском положении: «целое — больше суммы его частей»); свойства предметов и способы действия на высших уровнях не могут быть представлены в виде суммы свойств и действий изолированных компонентов; если известны ансамбль компонентов и существующие между ними отношения, то высшие уровни могут быть выведены из компонентов). Общая теория систем представляет собой логико-математическую область исследований, задачей которой является формулировка общих принципов исследования систем. Осуществляемая в рамках этой теории точная формулировка таких понятий, как целостность и сумма, дифференциация, прогрессивная механизация, централизация, иерархическое строение и т.п., должна позволить эти понятия применять во всех дисциплинах, имеющих дело с системами. Система может быть охарактеризована только через взаимодействие составляющих элементов. Различие между реальными и концептуальными системами на уровне простого здравого смысла практически невозможно установить; различные аспекты функционирования системы всегда будут изучаться на основе разных моделей и соответствующих теорий, что в итоге и может привести к их унификации.

Указанными выше методологическими принципами не исчерпываются все концептуальные положения проектирования системы; они являются основополагающими. Превентивное или корректирующее воздействия на систему с целью изменения качества осуществляются по результатам оптимизации показателей свойств и качества в целом, прогнозирования качества, определения конкурентоспособности и др. Вопросы практической реализации подробно рассматриваются в [5...9].

Выводы

Предложен новый подход к созданию композиционных материалов с использованием методов системного анализа. Композит рассматривается как совокупность элементов, связанных отношениями, порождающими интегративное качество. Реализуются синергетический, информационный и гомеостатический подходы. Признаки системы и методы выбора элементов и подсистем определяются с учетом парадоксов целостности и иерархии. Затрагиваются вопросы смены парадигмы. При смене парадигмы нет преемственности теорий; предполагается формирование иной системы взглядов на основе принципиально новых базовых моделей и изменение принципа управления формированием исходной структуры. Используется принцип имитации сложной системы (ее представляли конечным набором моделей, отражающих определенную грань ее сущности) и целенаправленности (сопоставление сложной системы множеству частных критериев и специально разработанных глобальных критериев, описывающих ее сущность). Указаны примеры синтеза композитов на основе выявления кинетических процессов формирования их физико-механических характеристик.

Список литературы

1. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // *Строительные материалы*. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.
2. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // *Архитектура и строительство России*. – 2020. – № 3. – С. 14.

3. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.
4. Абрамова, Н.А. О проблеме рисков из-за человеческого фактора в экспертных методах и информационных технологиях / Н.А. Абрамова // Проблемы управления. – 2007. – №2. – С. 11–21.
5. 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.
6. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
7. Будылина, Е.А. Принципы управления качеством сложных систем модульной структуры / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 4 (41). – С. 74–80.
8. Будылина, Е.А. Из опыта синтеза сложных систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 4 (49). – С. 25–29.
9. Будылина, Е.А. Синтез материалов с регулируемыми свойствами / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 39–44.

References

1. Garkina, I.A. The evolution of ideas about composite materials from the standpoint of a paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2018. – № 1–2. – P. 60–62.
2. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Architecture and construction of Russia. – 2020. – №3. – P. 14.
3. Chernyshov, E.M. The problem of the complexity and consistency of the qualitative description and statistical reliability of the quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: theory and practice. – 2022. – № 2 (17). – P. 75–80.
4. Abramova, N.A. On the problem of risks due to the human factor in expert methods and information technologies / N.A. Abramova // Problemy upravleniya. – 2007. – № 2. – P. 11–21.
5. Budylyna, E.A. System Analysis as a Problem Solving Methodology / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – №2 (55). – P.14–20.
6. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
7. Budylyna, E.A. Principles of quality management of complex systems of modular structure / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2019. – № 4 (41). – P. 74–80.
8. Budylyna, E.A. From the experience of synthesis of complex systems / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2021. – № 4(49). – P. 25–29.
9. Budylyna, E.A. Synthesis of materials with controlled properties / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – № 2(51). – P. 39–44.

УДК 666.948

DOI 10.54734/20722958_2024_1_40

*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

Калатоzi Георгий Мерабович,
инженер кафедры материаловедения
и технологии материалов
E-mail: vpv-1994@mail.ru

Урманова Христина Викторовна,
инженер кафедры материаловедения
и технологии материалов
E-mail: urmanova0103@gmail.com

Нецвет Дарья Дмитриевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры материаловедения и технологии
материалов
E-mail: netsvet_dd@mail.ru

Шахова Любовь Дмитриевна,
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
НИИ «Наносистемы в строительном
материаловедении»
E-mail: luba.shakhova2015@yandex.ru

Строкова Валерия Валерьевна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой материаловедения
и технологии материалов
E-mail: vvstrokova@gmail.com

*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

Kalatozi Georgii Merabovich,
Engineer of the Department of Materials
Science and Technology
E-mail: vpv-1994@mail.ru

Urmanova Hristina Viktorovna,
Engineer of the Department of Materials
Science and Technology
E-mail: urmanova0103@gmail.com

Netsvet Daria Dmitrievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department of Materials Science and
Technology
E-mail: netsvet_dd@mail.ru

Shakhova Lubov Dmitrievna,
Doctor of Sciences, Professor, Leading
Researcher of the Research Institute
«Nanosystems in Building Materials Science»
E-mail: luba.shakhova2015@yandex.ru

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

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

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОДУКТОВ ГИДРАТАЦИИ АЛЮМИНАТНЫХ ЦЕМЕНТОВ

Г.М. Калатоzi, Х.В. Урманова, Д.Д. Нецвет, Л.Д. Шахова, В.В. Строкова

Представлены результаты исследований минералогического состава трёх алюми-
натных цементов: ГЦ-35 40, ГЦ-35 50, ВГЦ-70, а также продуктов их гидратации.
Временные рамки эксперимента обусловлены тем, что исследуемые цементы относятся
к быстротвердеющим, набирающим свою основную прочность в течение первых 7 су-
ток. На основании рентгенофазового анализа исследуемых вяжущих установлены состав
и характер изменения значений интенсивности пиков основных минералов цементов в
процессе гидратации (CA , α'_L-C_2S , C_2AS – для ГЦ-35 40; CA , $АН_3$ – для ГЦ-35 50; CA ,
 CA_2 – для ВГЦ-70), а также продуктов их гидратации.

Ключевые слова: алюминатные цементы, гидратация, аналитические отражения, минералы

MINERALOGICAL COMPOSITION OF HYDRATION PRODUCTS OF ALUMINATE CEMENTS

G.M. Kalatozy, H.V. Urmanova, D.D. Netsvet, L.D. Shakhova, V.V. Strokova

The results of studies of mineralogical composition of three aluminate cements are presented:
AC-35 40, AC-35 50, HAC-70, as well as their hydration products. The time limits of the experiment
are conditioned by the fact that the studied cements belong to fast hardening cements, gaining their
basic strength during the first 7 days. On the basis of X-ray phase analysis of the investigated binders
the composition and character of the change in the intensity values of peaks of the main minerals of

cements during hydration (CA, α'_L -C₂S, C₂AS – for AC-35 40; CA, AH₃ – for AC-35 50; CA, CA₂ – for HAC-70), as well as the products of their hydration were established.

Keywords: aluminate cements, hydration, analytical reflections, minerals

Введение. В настоящее время процесс гидратации глиноземистых и высокоглиноземистых цементах представлен одним из наиболее востребованных и актуальных направлений в области строительных материалов. По сравнению с портландцементом, глиноземистые цементы относятся к цементам с высокой начальной прочностью и химической стойкостью, используемым для создания специальных составов сухих строительных смесей. Глиноземистые и высокоглиноземистые цементы в основном предназначены для изготовления быстротвердеющих и жаростойких бетонов специального назначения. Однако, ввиду того что данные виды цемента обеспечивают получение более стойкого и прочного цементного камня по сравнению с портландцементом, они являются перспективными в качестве компонентов сухих строительных смесей, в том числе получаемых на основе микроцементов. В этой связи процессы фазообразования, протекающие при гидратации глиноземистых и высокоглиноземистых цементах, представляют интерес с точки зрения их использования в составе многокомпонентных смесей.

Глиноземистые цементы отличаются от портландцементов тем, что в их составе присутствует высокая концентрация глиноземистых соединений, таких, как гидросиликат и гидроалюминат. Эти соединения обладают высокой активностью в процессе гидратации, что обеспечивает более быстрое и полное формирование кристаллической структуры цементного камня.

Как правило, предприятия производят алюминатные цементы по технологии плавки сырьевых компонентов, технология спекания применяется ограниченно [1]. В соответствии с ГОСТ 969–2019 глиноземистый цемент (ГЦ) в зависимости от прочности при сжатии делится на три класса: 40, 50 и 60; высокоглиноземистый цемент (ВГЦ) – на два класса: 25 и 35. Класс прочности цемента, определяемый в возрасте трех суток после изготовления образцов, зависит от минералогического состава, который, в свою очередь, зависит от химического состава сырьевой смеси. В зависимости от содержания в цементе оксида алюминия (Al₂O₃) цементы подразделяются на виды. При этом при маркировке ГЦ указывается как вид, так и класс (например ГЦ-35 40), тогда как для ВГЦ используется лишь маркировка по виду (например ВГЦ-70).

Преобладающим минералом в глиноземистых цементах является моноалюминат кальция (CA), также присутствуют фазы – бредигит (α'_L -C₂S) и геленит (C₂AS). Для высокоалюминатных цементах характерно присутствие алюминатов кальция CA и CA₂ [2].

Гидратация глиноземистых и высокоглиноземистых цементах является сложным и многогранным процессом, который требует точного понимания и контроля всех факторов, влияющих на его протекание. Несмотря на большое количество научных исследований [3–9], процессы гидратации алюминатных цементах все ещё остаются недостаточно изученными.

Целью работы являлось изучение минералогического состава продуктов гидратации алюминатных цементах с помощью рентгенофазового анализа в целях более глубокого понимания протекающих процессов, особенностей их реакций, а также взаимосвязей между различными фазами в системе глиноземистых и высокоглиноземистых цементах.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью углубления теоретических представлений о механизме взаимодействия алюминатных цементах с водой с целью их более эффективного использования в дальнейшем при разработке составов сухих строительных смесей.

Материалы и методы исследований. Проводились исследования минералогического состава образцов глиноземистых цементах классов ГЦ-35 40 и ГЦ-35 50 и высокоглиноземистого цемента вида ВГЦ-70, а также продуктов их гидратации на 1-е и 7-е сутки.

Цементы ГЦ-35 40 и ГЦ-35 50 получены по технологии плавления, а ВГЦ-70 – по технологии спекания.

Водоцементное отношение смесей составило 0,3. Образцы твердели в камере, обеспечивающей у поверхности образцов нормальные условия: температуру (20±3) °C и относительную влажность воздуха (95±5) %.

Рентгенофазовый анализ проводился на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 WorkStation на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Результаты и их анализ. Для исследования минералогического состава глиноземистых цементов классов ГЦ-35 40 и ГЦ-35 50 и высокоглиноземистого цемента вида ВГЦ-70 был проведен рентгенофазовый анализ исходных образцов (рис. 1) и продуктов их гидратации на 1-е и 7-е сутки (рис. 2).

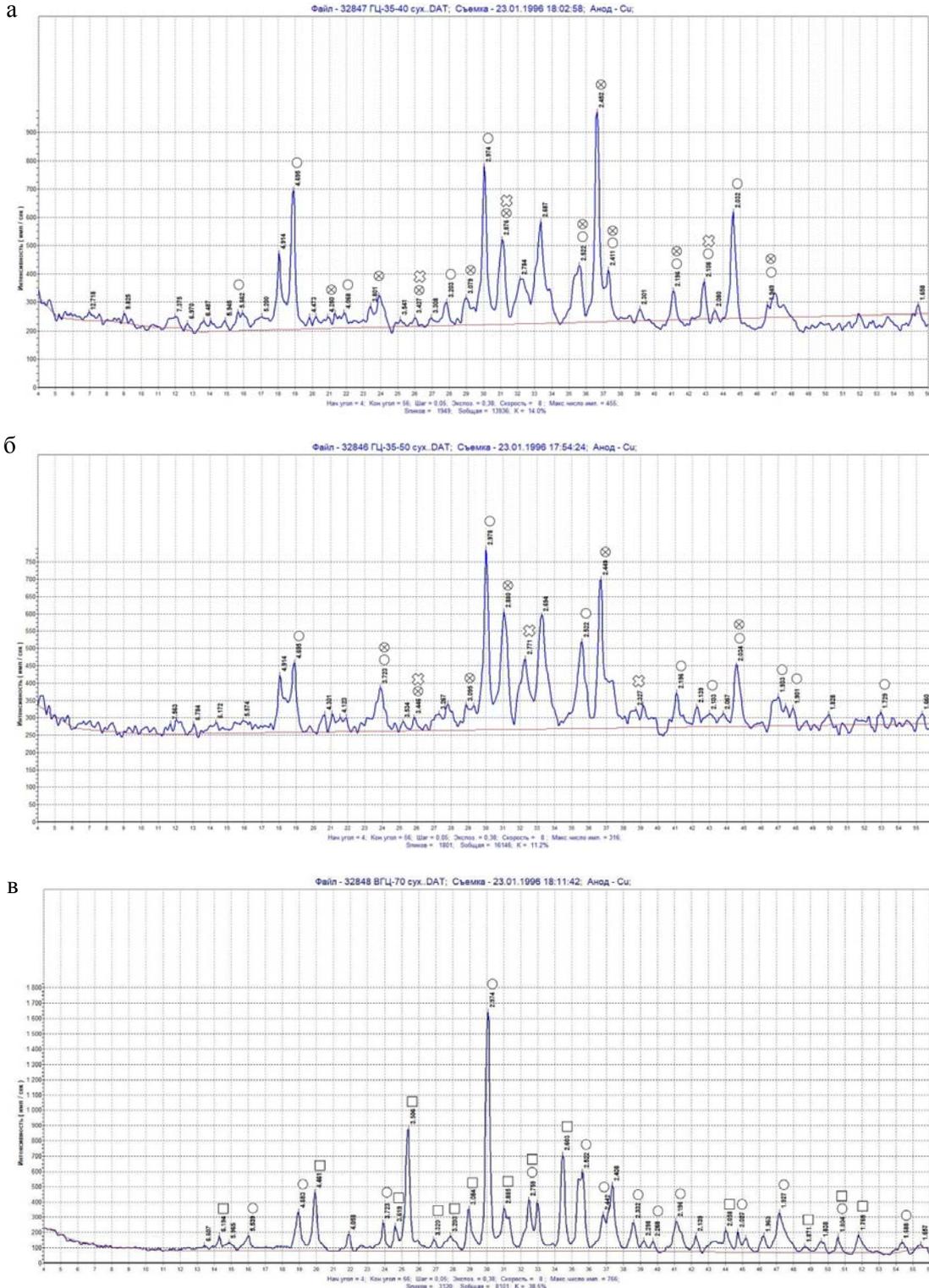


Рис. 1. Минералогический состав (по данным РФА) алюминатных цементов:

- а – ГЦ-35 40; б – ГЦ-35 50; в – ВГЦ-70;
- – CA; ⊗ – C₂AS; ⋄ – α'-L-C₂S, □ – CA₂

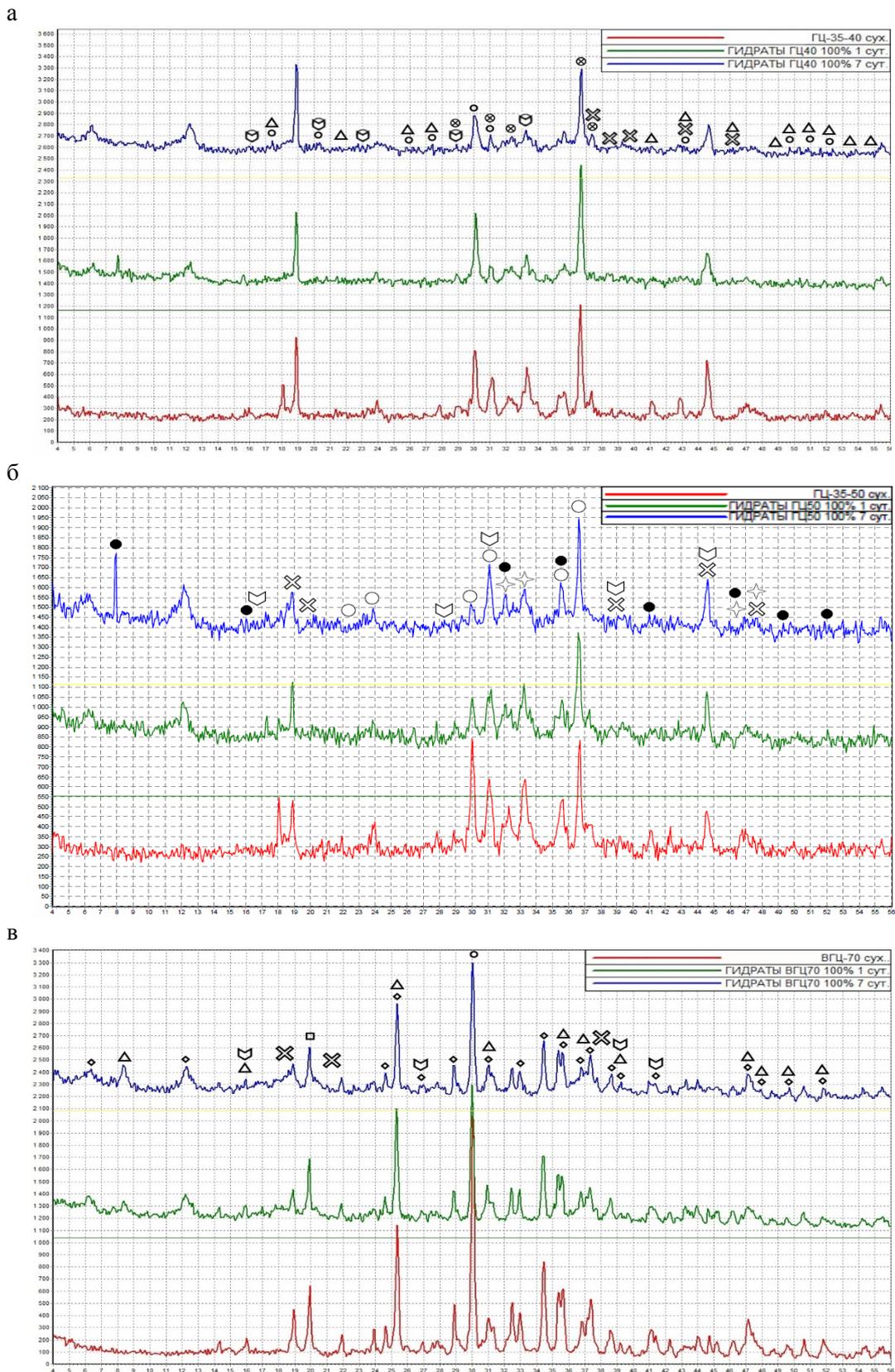


Рис. 2. Минералогический состав (по данным РФА) продуктов гидратации на 1-е и 7-е сутки алуминатных цементов:

- а – ГЦ-35 40; б – ГЦ-35 50; в – ВГЦ-70;
 ○ – CA; ⊗ – C₂AS; ⊕ – α'-C₂S, △ – C₂AH₈, ⊗ – AH₃;
 ● – C₃S₆H₅; ☆ – C₃A; ♡ – C₃AH₆; □ – CA₂; ◇ – CAH₁₀

Рентгенометрическая диагностика показала, что на рентгенограммах исходных образцов цементов присутствуют аналитические отражения следующих основных минералов:

СА – $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, однокальциевый алюминат;

СА₂ – $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, однокальциевый диалюминат;

С₂АС – $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, геленит;

α' -L-C₂S – α' -L-2CaO·SiO₂, бредигит.

Из анализа рентгенограмм глиноземистых цементов следует, что в исследуемых образцах присутствуют одни и те же минералы, а именно однокальциевый алюминат, геленит и бредигит. Однако необходимо отметить, что интенсивности их основных отражений (табл. 1–2) различаются, что указывает на различия в количественном составе.

Т а б л и ц а 1

Анализ интенсивности минералов исходного и прогидратированного образца ГЦ-35 40

ГЦ-35 40	Значения интенсивности пиков минералов (относительные единицы)		
	СА	α' -L-C ₂ S	С ₂ АС
Исход.	31	12	51
1-е сут	32	10	53
7-е сут	17	9	34

Т а б л и ц а 2

Анализ интенсивности минералов исходного и прогидратированного образца ГЦ-35 50

ГЦ-35 50	Значения интенсивности пиков минералов (относительные единицы)	
	СА	АН ₃
Исход.	51	25
1-е сут	21	25
7-е сут	14	16

Т а б л и ц а 3

Анализ интенсивности минералов исходного и прогидратированного образца ВГЦ-70

ВГЦ-70	Значения интенсивности пиков минералов (относительные единицы)	
	СА	СА ₂
Исход.	88	48
1-е сут	52	43
7-е сут	48	34

Дифракционные отражения для анализа процесса гидратации были выбраны с условием отсутствия наложения пиков одних минералов на другие.

Анализ рентгенограммы ВГЦ-70 показал, что основные аналитические отражения принадлежат алюминатам кальция (СА) и (СА₂).

Исследуемые виды цементов относятся к быстротвердеющим, набирающим свою основную прочность в течение первых 7 суток, поэтому образование минералов в процессе гидратации было изучено именно в этот период.

Анализ рентгенограмм продуктов гидратации алюминатных цементов на 1-е и 7-е сутки показал наличие следующих минералов:

СА – $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, однокальциевый алюминат;

СА₂ – $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, однокальциевый диалюминат;

С₂АС – $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, геленит;

α' -L-C₂S – α' -L-2CaO·SiO₂, бредигит;

С₂АН₈ – $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, гексагональный восьмиводный гидроалюминат кальция;

АН_3 – $\text{Al}(\text{OH})_3$, гидроксид алюминия;
 САН_{10} – $\text{СаО} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, десятиводный однокальциевый гидроалюминат;
 $\text{С}_3\text{АН}_6$ – $3\text{СаО} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, кубический шестиводный гидроалюминат кальция;
 $\text{С}_5\text{S}_6\text{H}_5$ – $5\text{СаО} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, тоберморит;
 $\text{С}_3\text{А}$ – $3\text{СаО} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, трехкальциевый алюминат.

На рентгенограммах образцов глиноземистого цемента ГЦ-35 40 имеются аналитические отражения минерала геленита (C_2AS), который не является гидравлически активным соединением. На основании изменения интенсивности его отражений можно судить о его концентрации в смеси. Повышение количества геленита в составе вяжущего оказывает негативное влияние на прочностные характеристики ГЦ-35 40.

Анализ процесса гидратации ГЦ-35 40 производился по дифракционным отражениям минералов СА (2,97), $\alpha'_L\text{-C}_2\text{S}$ (2,78) и C_2AS (2,45). Как видно из табл. 1, значение интенсивности дифракционного отражения минерала СА на 7-е сутки падает на 14 относительных единиц, минерала $\alpha'_L\text{-C}_2\text{S}$ – на 3, минерала C_2AS – на 17. Степень гидратации этого минерала на 1-е сутки уменьшилась на 3 %, на 7-е сутки – увеличилась на 55 %. Степень гидратации минерала $\alpha'_L\text{-C}_2\text{S}$ на 1-е сутки увеличилась на 17 %, на 7-е сутки – на 25 %. Минерал C_2AS имеет такой же характер гидратации, как и однокальциевый алюминат: на 1-е сутки степень гидратации уменьшилась на 4 %, на 7-е сутки – увеличилась на 33 %. Увеличение интенсивности пика минерала на первые сутки свидетельствует о перераспределении интенсивности отражений в связанных с ними процессах гидратообразования.

Рентгенограммы гидратированного однокальциевого алюмината характеризуются наличием дифракционных отражений минералов $\text{C}_2\text{АН}_8$ и АН_3 .

Анализ процесса гидратации ГЦ-35-50 производился по аналитическим отражениям минералов СА (2,45) и АН_3 (4,72). Как видно из табл. 2, значение интенсивности отражения минерала СА на 7-е сутки падает на 37 единиц, а минерала АН_3 – на 9. Степень гидратации минерала СА образца ГЦ 35-50 на 1-е сутки увеличилась на 59 %, на 7-е сутки – на 73 %. Степень гидратации минерала АН_3 на 1-е сутки не изменилась, на 7-е сутки увеличилась на 36 %. Также на 7-е сутки можно заметить дифракционные отражения минералов $\text{С}_5\text{S}_6\text{H}_5$, $\text{С}_3\text{А}$ и $\text{С}_3\text{АН}_6$.

Анализ процесса гидратации ВГЦ-70 производился по аналитическим отражениям минералов СА (2,97) и СА_2 (4,46). Как видно из табл. 3, значение интенсивности минерала СА на 7-е сутки падает на 40 единиц, минерала СА_2 – на 14. Степень гидратации минерала СА образца ВГЦ-70 на 1-е сутки увеличивается на 40 %, на 7-е сутки – на 46 %, а минерала СА_2 – на 10 и 30 %, соответственно.

Рентгенограммы гидратированного СА_2 характеризуются наличием аналитических отражений минералов САН_{10} и АН_3 . В образцах 7-суточного твердения происходит постепенный переход минерала САН_{10} в минерал $\text{C}_2\text{АН}_8$.

При гидратации СА в течение 1 суток также видны линии САН_{10} . По истечении 7 суток интенсивность линий САН_{10} и $\text{C}_2\text{АН}_8$ увеличивается. Постепенное образование минерала $\text{С}_3\text{АН}_6$ свидетельствует о том, что процесс гидратации ещё не завершён. Окончательное образование минералов в процессе гидратации происходит на 28-е сутки, поэтому данное исследование может быть продолжено до получения конечных результатов с образованием всех гидратированных минералов.

Выводы. Минералогический состав алюминатных цементов сильно зависит от способа производства, характера среды обжига, условий кристаллизации, содержания в исходной сырьевой шихте оксида железа и образовавшихся после обжига и охлаждения железосодержащих соединений, вида и состава полученных твердых растворов и др.

Изучение процесса гидратации глиноземистых и высокоглиноземистых цементов дает возможность использовать их в качестве компонента в составе с микроцементом в целях получения сухих строительных смесей или улучшения их свойств с учетом функционального назначения, например в качестве инъекционных, расширяющихся или гидрофобных сухих строительных смесей.

Список литературы

1. Ле Сау, Г. Фазовый состав глиноземистого цемента: обзор / Г. Ле Сау // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2018. – № 2 (51). – С. 12–20.
2. Кузнецова, Т.В. Глиноземистый цемент / Т.В. Кузнецова, Й. Талабер. – М.: Стройиздат, 1988. – 272 с.
3. Рояк, С.М. Специальные цементы / С.М. Рояк, Г.С. Рояк. – М.: Стройиздат, 1983. – 279 с.
4. Абзаев, Ю.А. Анализ структурно-фазового состояния моноалюмината кальция / Ю.А. Абзаев, Ю.С. Саркисов, Т.В. Кузнецова, С.В. Самченко, А.А. Клопотов, В.Д. Клопотов, Д.А. Афанасьев // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – №3. – С. 56–62.
5. Козлова, В.К. Состав продуктов гидратации высокоглиноземистых цементов, изготовленных из шлаков алюминотермического производства хрома / В.К. Козлова, В.Г. Григорьев, Е.В. Божок, А.М. Соколов, А.В. Вольф // Ползуновский Вестник. – 2014. – №1. – С. 68–71.
6. Мирюк, О.А. Гидратация и твердение магнийкремнийсодержащих алюминатных цементов / О.А. Мирюк // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2008. – №3. – С. 70–74.
7. Островская, Т.Е. Влияние гидроксида кальция на гидратационные свойства алюминатных цементов / Т.Е. Островская, Ю.Р. Кривобородов // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. XXXI, №1. – С. 17–18.
8. Данилова, Н.В. Свойства глиноземистого цемента при введении в его состав гидроалюминатной добавки / Н.В. Данилова, Ю.Р. Кривобородов // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. XXXIII, №4. – С. 60–62.
9. Нецвет, Д.Д. Исследование химического и минералогического составов глиноземистых цементов / Д.Д. Нецвет, Х.В. Урманова, Г.М. Калатоzi // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: сборник докладов. Часть 4. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 145–152.

References

1. Le Sau, G. Phase composition of alumina cement: a review / G. Le Sau // ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. – 2018. – № 2 (51). – P. 12–20.
2. Kuznetsova, T.V. Alumina cement / T.V. Kuznetsova, J. Talaber. – M.: Stroyizdat, 1988. – 272 c.
3. Rojak, S.M. Special cements / S.M. Rojak, G.S. Rojak. – M.: Stroyizdat, 1983. – 279 c.
4. Abzaev, Yu.A. Analysis of the structural-phase state of calcium monoaluminate / Yu.A. Abzaev, Yu.S. Sarkisov, T.V. Kuznetsova, S.V. Samchenko, A.A. Klopotov, V.D. Klopotov, D.A. Afanasyev // Engineering and Construction Journal. – 2014. – №3. – P. 56–62.
5. Kozlova, V.K. Composition of hydration products of high-alumina cements made from slags of aluminum-thermal production of chromium / V.K. Kozlova, V.G. Grigoriev, E.V. Bozhok, A.M. Sokolov, A.V. Wolf // Polzunov Bulletin. – 2014. – №1. – P. 68–71.
6. Miryuk, O.A. Hydration and hardening of magnesium-silicon containing aluminate cements / O.A. Miryuk // Vestnik of G.I. Nosov MSTU. – 2008. – №3. – P. 70–74.
7. Ostrovskaya, T.E. Influence of calcium hydroxide on hydration properties of aluminate cements / T.E. Ostrovskaya, Yu.R. Krivoborodov // Advances in chemistry and chemical technology. – 2017. – Vol. XXXI, No. 1. – P. 17–18.
8. Danilova, N.V. Properties of alumina cement at introduction of hydroaluminate additive into its composition / N.V. Danilova, Yu.R. Krivoborodov // Successes in Chemistry and Chemical Technology. – 2019. – Vol. XXXIII, №4. – С. 60–62.
9. Netsvet, D.D. Study of chemical and mineralogical compositions of alumina cement / D.D. Netsvet, H.V. Urmanova, G.M. Kalatozi // International Scientific and Technical Conference of young scientists V.G. Shukhov BGTU, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov: Collection of reports. Part 4. – Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. V.G. Shukhov, 2023. – P. 145–152.

УДК 666.972

DOI 10.54734/20722958_2024_1_47

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

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Управление
территориями»
E-mail: tarov60@mail.ru

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Россия, 410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: +7 (8452) 99-86-03;
факс: +7 (8452) 99-86-04

Ивашенко Юрий Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Строительные материалы,
конструкции и технологии»
E-mail: kafedra.smkt@gmail.com

Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д. 26,
тел.: +7 (495) 781-80-07,
факс: +7 (499) 183-44-38

Ерофеева Ирина Владимировна,
кандидат технических наук, старший
преподаватель кафедры «Основы
архитектуры и художественных
коммуникаций»
E-mail: ira.erofeeva.90@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

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Professor, Decan of
faculty «Management of territories»
E-mail: tarov60@mail.ru

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin

Russia, 410054, Saratov, 77,
Politechnicheskaya St.,
tel.: +7 (8452) 99-86-03;
fax: +7(8452) 99-86-04

Ivashchenko Yuri Grigorievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department of «Building Materials, Structures
and Technologies»
E-mail: kafedra.smkt@gmail.com

National Research University Moscow State University of Civil Engineering

Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoe shosse,
tel.: +7 (495) 781-80-07,
fax: +7 (499) 183-44-38

Erofeeva Irina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Senior Lecturer of the
Department «Fundamentals of Architecture
and Artistic Communications»
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КАРБОНАТНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТЬ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

О.В. Тараканов, Ю.Г. Ивашенко, И.В. Ерофеева

Рассмотрены теоретические аспекты активации гидратации силикатных фаз цемента в присутствии кальцита. Анализ рентгенофазовых исследований образцов β -C₂S, гидратированных с добавкой тонкомолотого кальцита в течение до 1,5 года, показал, что кальцит способствует активации образования слабозакристаллизованных гидросиликатов кальция. Доказано, что тонкомолотый кальцит, используемый в количестве до 10 % от массы цемента, приводит к повышению прочности цементного камня в среднем на 10-30 % по сравнению с составами без добавки. Применение в технологии высокопрочных мелкозернистых бетонов микронаполнителей и заполнителей на основе карбонатных пород позволяет получать бетоны прочностью 130 МПа.

Ключевые слова: силикатные фазы цемента, гидратация, активация образования гидросиликатов кальция, гидрокарбосиликаты кальция, рентгенофазовые исследования, цементный камень, кинетика твердения, прочность, мелкозернистые высокопрочные бетоны

THE EFFECT OF CARBONATE MINERAL ADDITIVES ON THE FORMATION OF MICROSTRUCTURE AND STRENGTH OF MINERAL BINDERS

O.V. Tarakanov, Y.G. Ivashchenko, I.V. Erofeeva

Theoretical aspects of activation of hydration of cement silicate phases in the presence of calcite are considered. Analysis of X-ray phase studies of β -C₂S samples hydrated by the addition of finely ground calcite for up to 1.5 years has showed that calcite promotes activation of the formation of weakly crystallized calcium hydrosilicates. It has been shown that finely ground calcite, used in the amount of up to 10 % by weight of cement, leads to an increase of cement stone strength by an average of 10-30 % compared with compositions without additives. The use of microfillers and fillers based on carbonate rocks in the technology of high-strength fine-grained concretes makes it possible to obtain concrete with a strength of 130 MPa.

Keywords: silicate phases of cement, hydration, activation of formation of calcium hydrosilicates, calcium bicarbosilicates, X-ray phase studies, cement stone, kinetics of hardening, strength, fine-grained high-strength concretes

В современных бетонах и особенно в многофункциональных бетонах нового поколения кроме высокоэффективных супер- и гиперпластификаторов (СП и ГП) все большее применение находят минеральные микронаполнители. Использование тонкомолотых природных карбонатных пород невысокой прочности (известняков, доломитов, доломитизированных известняков), а также минеральных карбонатных шламов представляет потенциально высокий научный и практический интерес [1-14].

Весьма важными являются исследования характера влияния карбонатов не только на кинетику твердения и прочность цементных материалов, но и на формирование начальной структуры и фазовый состав продуктов гидратации.

В исследованиях, выполненных ранее [2], установлено, что добавка тонкодисперсного кальцита в количестве 5-20 % от массы цемента способствует повышению интенсивности начального структурообразования и росту пластической прочности (P_T).

Традиционным считается мнение, что активация начального структурообразования обусловлена формированием гидратов AFm- и AFt-фаз. Однако рентгенофазовый анализ показал [2], что в системе происходит активное формирование гидросиликатов кальция различной структуры; следовательно, ускорение кинетики роста пластической прочности может быть обусловлено в том числе за счет комплексных солей, образующихся на основе гидросиликатов кальция в присутствии кальцита, например $\text{CaHSiO}_4 \cdot \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Одной из возможных причин интенсивного структурообразования и роста прочности цементных систем, наполненных карбонатом кальция, является активация кристаллизационных процессов на подложке тонкодисперсного кальцита. Разнообразие соотношений в развитии граней кристаллов является результатом периодически повторяющихся внутренних сил связей между частицами и условий роста кристаллов. Многообразие габитусов кристаллов кальцита и близость его кристаллических характеристик к параметрам формирующихся в системе гидратов определяют возможность его интенсивного гидратообразования в цементных системах.

Грани кальцита, находящиеся в диффузном потоке раствора, растут быстрее, чем другие грани. Поэтому начальный период гидратации, для которого характерно протекание основных реакций в обводненных условиях, является наиболее благоприятным для условий проявления изоморфизма формирующихся гидратных фаз с кальцитом.

Для понимания механизмов активирующего влияния кальцита на процессы гидратации и твердения цементных материалов важными являются исследования механизмов действия кальцита не только на многокомпонентные цементные системы, но и на алюминатные и силикатные минералы цемента.

По данным многочисленных исследований [15-17], механизм активирующего влияния кальцита на алюминатные фазы цемента связан с образованием гидрокар-

боалюминатов кальция, аналогичных по структуре гидросульфоалюминату кальция (эттрингиту) и гидрокарбоалюминату кальция моносulfатной структуры.

В отношении характера влияния кальцита на гидратацию силикатных фаз цемента многие вопросы требуют дальнейших исследований.

Алит является наиболее важной составляющей всех обычных портландцементных клинкеров, и его содержание в цементе составляет 5-70 %. Этот минерал представляет собой трехкальциевый силикат Ca_3SiO_5 , состав и структура которого модифицированы за счет размещения в решетке инородных ионов, в большинстве случаев Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} . Алит относительно быстро реагирует с водой и в нормальных портландцементных играет важную роль в развитии прочности.

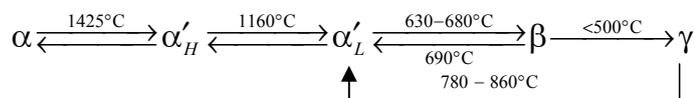
Содержание белита в обычных портландцементных клинкерах составляет 15-30 %. Это двухкальциевый силикат Ca_2SiO_4 , β -модификации, структура которого модифицирована инородными ионами. Белит медленно реагирует с водой и существенно увеличивает прочность цементного камня в поздние сроки. Через год нормального твердения прочности чистого алита и белита примерно одинаковы.

Получаемые искусственным путем основные минералы портландцемента $\beta\text{-}2\text{Ca}\cdot\text{SiO}_2$ и $3\text{Ca}\cdot\text{SiO}_2$ и их твердые растворы белит и алит имеют дефектную структуру. Из всех ортосиликатов кальция самой реакционноспособной по отношению к воде является модификация $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$.

Ионность связи Ca-O и $\beta\text{-C}_2\text{S}$ колеблется в пределах от 80 до 85 %. Высокое значение ионности связи Ca-O свидетельствует о существенном смещении электронной плотности на связи Si-O , то есть кислородные атомы цепочек Ca-O-Si имеют неравноценные связи – более ковалентные с атомами кремния и более ионные с атомами кальция. В структуре $\beta\text{-C}_2\text{S}$ наблюдаются парамагнитные центры двух типов: электроны и дырки, локализованные на примесных атомах. Примесные атомы занимают различные положения в кристаллической решетке, вследствие чего появляются локальная некомпенсация зарядов и искажение координационного многогранника. Такие дефектные зоны в кристаллической решетке $\beta\text{-C}_2\text{S}$ являются ловушками для мигрирующих электронов и вакансий. Захваченный ловушкой электрон или вакансия является парамагнитным центром. Электроны и дырки, захваченные катионными и анионными вакансиями, ассоциациями вакансий и другими видами дефектов в решетке $\beta\text{-C}_2\text{S}$, также являются парамагнитными центрами. В клинкере чистого $\beta\text{-C}_2\text{S}$ нет. Белит – это твердый раствор ионов Mg^{2+} , K^{1+} , Na^{1+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Ba^{2+} , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} . В $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ион Ca^{2+} замещается на перечисленные катионы, а анион SiO_4^{2-} – на PO_4^{3-} , SO_4^{2-} .

Таким образом, в портландцементном клинкере $\beta\text{-C}_2\text{S}$ имеет исключительно дефектную структуру, насыщенную точечными дефектами и дислокациями.

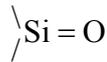
При комнатной температуре существует пять полиморфных форм C_2S [16].



Как в индивидуальной системе $\text{Ca-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, так и в композиционных вяжущих, содержащих силикаты кальция и кремнеземистую составляющую, при 200°C образуются сходные по структуре гидросиликаты кальция, представляющие собой твердые растворы с различными областями гомогенности и выделением из них фаз с различными степенью конденсации кремнекислородного мотива и степенью обогащения компонентами CaO и H_2O . Отличие между индивидуальной системой и композиционным вяжущим заключается в том, что в первом случае C-S-H -фазы образуются в ходе химического взаимодействия более простых и менее дефектных составляющих.

В портландцементных твердые растворы алит и белит, полученные при высоких температурах, более дефектны и насыщены атомами многих химических элементов. При взаимодействии алита и белита с водой происходит их частичное разрушение с образованием более устойчивых при обычных температурах твердых растворов C-S-H(I) , C-S-H(II) , C-S-H(B) .

Известно, что модификация β -C₂S отличается от других модификаций ортосиликата кальция самой высокой степенью деформации и анизотропии внутрикристаллического окружения SiO₄-групп. Ионная связь (Ca–O) – это жесткая недеформируемая связь. Ковалентная связь Si–O с образованием сопряженной связи



Происходит частичное разрушение и кремнекислородного мотива, и даже основной кристаллографической ячейки силикатов – тетраэдров SiO₄, а также кальцийкислородных полиэдров CaO_n. При этом часть SiO₄⁴⁻-групп переходит в жидкую фазу.

При смешивании с водой полярные молекулы воды атакуют кислотные и основанные центры силикатных минералов, происходит расслабление и разрыв химических связей, диссоциация воды с образованием активных частиц, свободных атомов водорода и свободных радикалов OH, а также ионов H и OH. Реакция диссоциации воды является базисной экзотермической реакцией, питающей энергией эти процессы. Химическая и энергетическая неоднородность поверхности силикатных минералов усиливается адсорбцией на поверхности частиц молекул и ионов добавок, вводимых в систему.

Твердые растворы алита и белита – вещества, способные под действием активных частиц H и OH перестраивать свою кристаллическую решетку, включая в нее молекулы нейтрального амфотерного вещества – воды вместо очень активного компонента CaO. Образуются твердые растворы – гидросиликаты кальция, которые более устойчивы по отношению к активным частицам H и OH и в равной степени обогащены CaO и H₂O. При гидратации и твердении цементных систем в присутствии кремнеземистых добавок кроме процесса взаимодействия составляющих алита и белита с водой протекает процесс взаимодействия выделившегося при гидратации силикатных минералов Ca(OH)₂ с активной кремнеземистой составляющей добавок с образованием системы Ca–SiO₂–H₂O [18].

С целью определения характера влияния тонкомолотого кальцита в смеси с суперпластификатором С-3 на состав продуктов гидратации силикатных минералов цемента была выполнена серия рентгенофазовых исследований в интервале брегговских углов от 4 до 80°. Исследования проводились с использованием медного анода с длиной волны $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ и кобальтового анода с длиной волны $\lambda=1,7902 \text{ \AA}$. Добавка кальцита вводилась в C₂S с водой затворения в количестве 10 % от массы вяжущего, С-3 – 0,3 %. После изготовления образцы твердели в нормальных условиях в течение одного года и полутора лет.

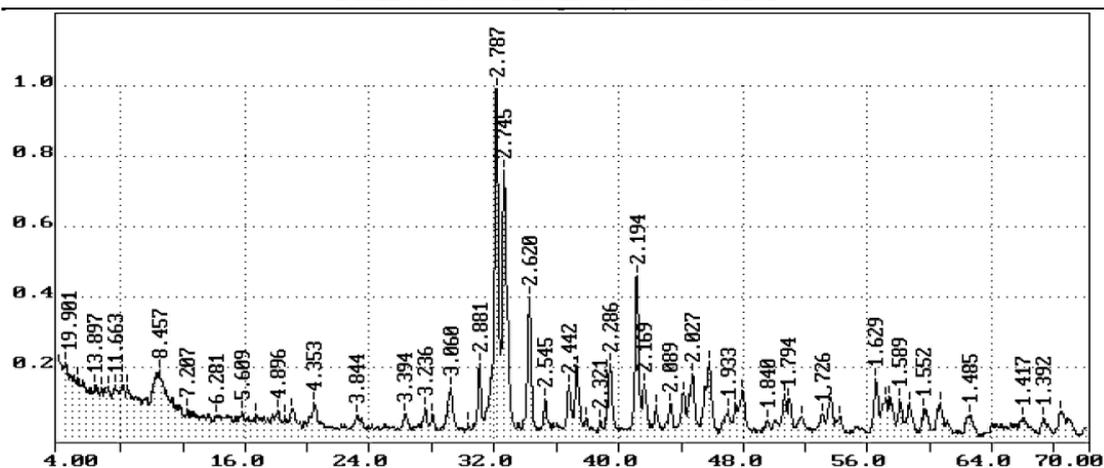
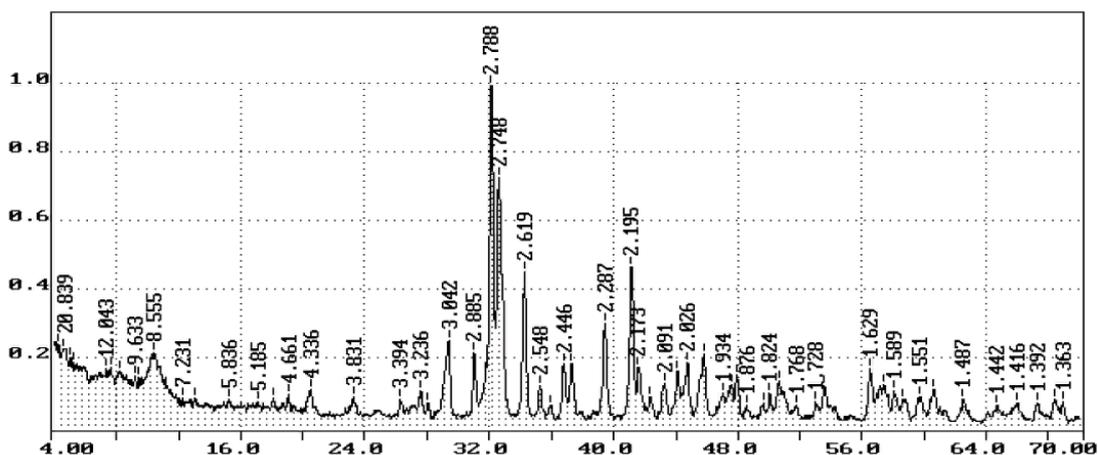
Результаты рентгенофазовых исследований, выполненных после 1 года гидратации, свидетельствуют о том, что характерным является увеличение относительной интенсивности отражений тоберморитового геля 0,305 нм на рентгенограмме образцов с добавкой кальцита.

Результаты рентгенофазовых исследований, выполненных после 1,5 года твердения в нормальных условиях (рис. 1, 2), также свидетельствуют об увеличении относительной интенсивности отражений, характерных для тоберморитового геля ($d=3,07; 1,82 \text{ \AA}$), это подтверждается также расчетом площади пиков (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Значения расчетных параметров интенсивности отражений (*I*) и площадей пиков (*S*) тоберморитового геля

Состав	Значение межплоскостных расстояний $d \text{ \AA}$			
	3,07		1,82	
	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>I</i>	<i>S</i>
C ₂ S В/Т = 0,5 без добавок	12,1	46	3,7	14
C ₂ S В/Т = 0,5 с добавкой кальцита (10 %) + С-3 (0,3 %)	21,9	75	7,3	25

Рис. 1. Рентгенограмма β - C_2S без добавок. 1,5 годаРис. 2. Рентгенограмма β - C_2S , гидратированного с добавкой тонкодисперсного кальцита (10%) и С-3 (0,3%). 1,5 года

Вместе с тем возрастает величина полуширины этих пиков (от 0,34 для контрольного образца до 0,45 для образца с добавкой шлама (см. рис. 1, 2), что косвенно свидетельствует о возможности искажений кристаллической решетки тоберморитоподобных гидросиликатов кальция, образующихся в присутствии кальцита. Повышение прочности образцов β - C_2S с добавкой кальцита может быть объяснено активацией образования гидратов $C-S-H(II)$. Характерное увеличение относительных интенсивностей этих гидросиликатов кальция (0,20, 0,183, 0,156 и 0,14 нм) отмечено на рентгенограммах C_2S с добавкой кальцита (см. рис. 1 и 2).

Исследования, выполненные на кобальтовом излучении, также подтверждают факт увеличения относительных интенсивностей отражений, характерных для $Ca(OH)_2$, тоберморитового геля и $C-S-H(II)$ в присутствии кальцита.

О повышении степени гидратации C_2S в присутствии кальцита свидетельствует увеличение интенсивностей основных отражений $Ca(OH)_2$ (0,263; 0,193; 0,179; 0,169; 0,1485 и 0,145 нм) на рентгенограммах образцов с добавкой кальцита, полученных в период до 1,5 года (см. рис. 1 и 2).

При анализе рентгенограмм C_2S , гидратированного в течение одного года и полутора лет, характерной особенностью являются наличие в интервале углов 2θ 45-55 и 56-70 каскадов гало с эпизодическими отражениями, характерными для $Ca(OH)_2$ (1,93; 1,79; 1,69; 1,485; 1,45 Å), тоберморитового геля и $C-S-H(II)$ (1,83; 1,56; 1,40 Å). Из этого следует сделать вывод, что карбонат кальция способствует активации гидросиликатов кальция, но структура их остается дефектной и слабокристаллизованной. Кроме того, возможно образование твердых растворов $Ca(OH)_2$ и ГСК

различной степени закристаллизованности. Об этом свидетельствуют многочисленные ступенчатые пики отражений гидратных фаз в интервале углов $2\Theta=45-70^\circ$.

Анализ рентгенофазовых исследований образцов C_2S , гидратированных в присутствии смеси кальцита и суперпластификатора С-3, показал, что, несмотря на возможное замедляющее влияние С-3 в начальный период гидратации, тонкомолотый кальцит способствует активации гидратации $\beta-C_2S$ и, как следствие, формированию гидросиликатов кальция различной структуры.

При гидратации цемента и силикатных фаз теоретически возможны два основных механизма активации гидратационного процесса.

1. За счет эпитаксиального наращивания гидратных фаз цементного камня на гранях тонкодисперсного кальцита.

2. Образование ортосиликатов различной структуры кальция в присутствии ионов CO_3^{2-} и других примесных ионов, содержащихся в кальците, вследствие изменения порядка формирования ГСК.

Первый механизм в большей степени можно отнести к $Ca(OH)_2$ и гидроалюминатным структурам, поскольку они имеют уже на ранней стадии кристаллическую структуру. Структурообразующая роль карбонатного микронаполнителя многосторонняя и касается не только топологических аспектов, но и кристаллохимических механизмов. Физико-химическая роль кальцита заключается в том, что его частицы могут служить центрами кристаллизации гидратов. Кристаллы кальцита могут служить подложкой для ориентированной кристаллизации новообразований на поверхности $CaCO_3$ [19]. Возможность этого обусловлена кристаллохимическим сродством параметров элементарной ячейки кальцита цемента, и в первую очередь с $Ca(OH)_2$ и АГм-фазами. При определенных условиях и сближении $Ca(OH)_2$ и $CaCO_3$ возможно формирование контактно-конденсационных связей физико-химического типа. Этому способствует чрезвычайно широкое разнообразие габитусов кристаллов кальцита (до нескольких десятков тысяч), что позволяет им служить хорошей подложкой не только для эпитаксиального наращивания на гранях $CaCO_3$ неорганических веществ, но и адсорбции органических соединений [19, 20].

Более сложным является механизм образования гидросиликатов кальция в присутствии кальцита.

В негидратированных кристаллах силикатных фаз кулоновские силы отталкивания между ионами Ca^{2+} и соседними с ним катионами сбалансированы. Однако при нарушении структуры, что наблюдается при реакции с водой, проявляется тенденция к увеличению сил отталкивания. Когда на поверхности кристалла из полиэдра CaO_x освобождается ион Ca^{2+} и при этом образуются группы OH^- и $Si-OH$, то в следующем полиэдре CaO_x валентные усилия связей оказываются нескомпенсированными, и ион Ca^{2+} перемещается на освободившееся место. При наличии структурных построек из бесконечных Ca -полиэдров, связанных общими гранями, эти процессы облегчаются, т.е. в процессе гидратации $\beta-C_2S$ и C_3S ионы Ca^{2+} мигрируют на поверхность кристалла, а затем в раствор. Влияние полиморфизма и примесных атомов на гидратационную активность силикатов кальция является второстепенным по сравнению со структурными факторами.

При гидратации цементных минералов анионы кислорода в их структуре, недосыщенные положительным зарядом катионов, протонируются, и образуются группы OH^- . Образование этих групп и воздействие возникших, как следствие, водородных связей приводят к необходимости структурных изменений. Поскольку группа OH^- представляет собой диполь, т.е. сильно поляризованный анион, то образуются менее симметричные структуры – сложные, в которых основным структурообразующим мотивом становятся октаэдрические блоки и слои гидроксида кальция, определяющие генетический код твердеющей системы [21].

В твердеющей цементной системе в процессе углубления конденсационно-кристаллизационных процессов возможны структурные переходы и трансформации ГСК.

Силикатные минералы цемента при реакции с водой образуют кристаллическую известь (СН) и почти аморфные продукты-гидраты силиката кальция с переменной стехиометрией (ГСК).

Взаимодействие β - C_2S с водой протекает более медленно, чем C_3S , и, очевидно, в обоих случаях скорость образования и характеристики СН влияют на скорость образования и характеристики ГСК, и наоборот. На образование ГСК может влиять как переход ионов кальция в раствор (после чего в безводных силикатах кальция остаются пустоты), так и удаление ионов кальция из раствора с образованием центров кристаллизации в присутствии кальцита; вполне естественно, что скорости растворения силиката и формирования СН и ГСК изменяются и, возможно, нарушается порядок образования СН и ГСК.

Известно [22], что тоберморит при соотношении $Ca/Si > 1$ через различные промежутки времени трансформируется в другие гидросиликаты кальция и одним из возможных вариантов является переход его в ксонотлит. Образование этой фазы обычно происходит по схеме $C-S-H \rightarrow$ тоберморит \rightarrow ксонотлит.

Возможно, что образование ксонотлита является результатом углубления конденсационных процессов, сопровождающихся сворачиванием интенсивных тоберморитовых цепочек с образованием между ними дополнительных силоксановых связей.

Ксонотлиты, образующиеся на основе других модификаций тоберморита, могут иметь несколько другие формулы.

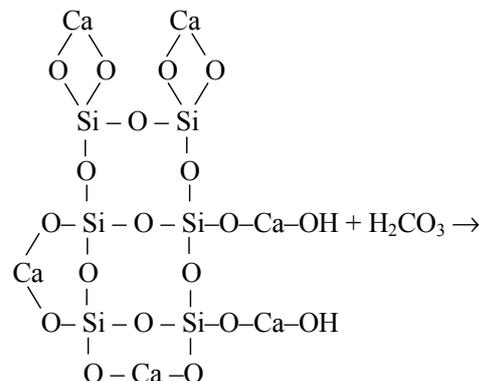
Анализ рентгенофазовых исследований цементного камня с карбонатным наполнителем свидетельствует об активации процесса образования $Ca(OH)_2$. В контрольном образце отсутствует аналитическая линия СН $2,63\text{\AA}$, в то время как она появляется в образцах с добавкой карбонатного микронаполнителя. Кроме того, для этих образцов характерно увеличение интенсивности линий СН при $d = 1,93\text{\AA}$ [2].

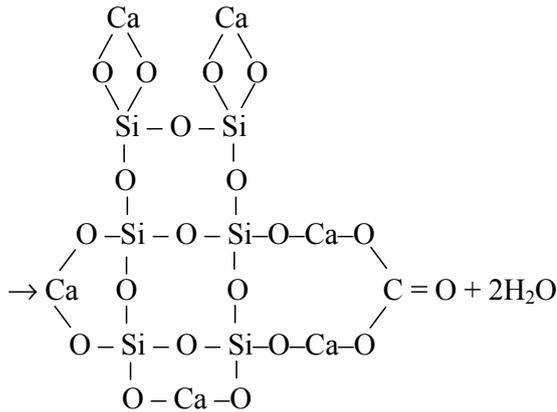
Таким образом, с учётом указанных выше структурных переходов приходим к заключению, что при избыточном количестве $Ca(OH)_2$ в цементной системе в присутствии тонкодисперсного карбонатного наполнителя возможно образование гидросиликатов кальция со структурой, характерной для ксонотлита, что, очевидно, является одной из причин повышения прочности твердеющей системы.

Возможность образования ксонотлита, подтвержденная данными выполненного рентгенофазового анализа, представляется нам весьма интересной в связи с тем, что ксонотлит является основой образования скаутита.

При взаимодействии кальциево-силикатных фаз цемента с угольной кислотой или её солями образуются новые соединения, состав которых ещё недостаточно изучен. Многие авторы считают, что основным продуктом при этом является карбонат кальция. Однако исследования, выполненные авторами [22], свидетельствуют о том, что карбонат кальция в этом случае не является основным соединением. Значительную долю составляют продукты, которые можно отнести к слабоизученной группе соединений – гидрокарбосиликатам кальция. Представителем этой группы является двойная соль скаутит, имеющая формулу $Ca_7[Si_6O_{18}] \cdot CO_3 \cdot H_2O$. В твердеющей системе скаутит может образовываться по схемам [22]:

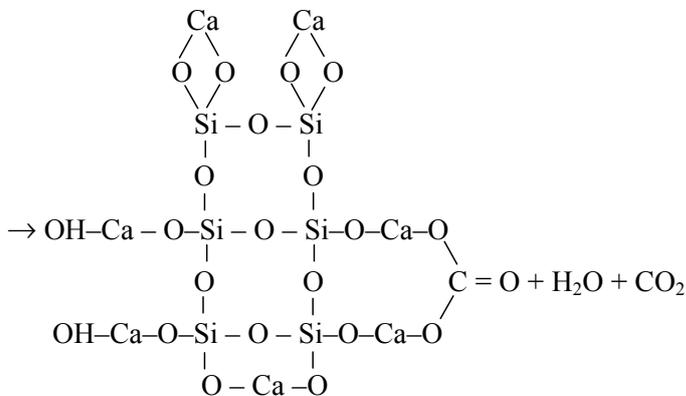
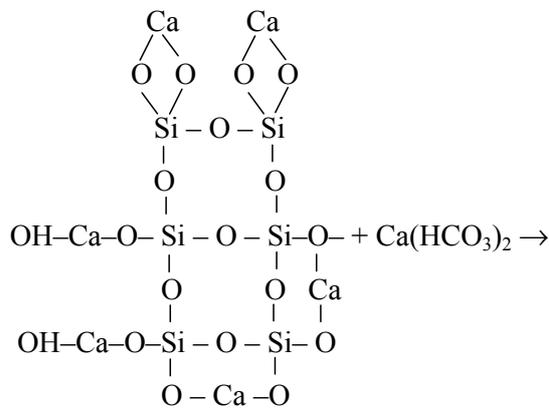
1.





Общая формула – $\text{Ca}_5[\text{Si}_6\text{O}_{17}] \cdot \text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

2.



Общая формула – $\text{Ca}_5[\text{Si}_6\text{O}_{17}] \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Таким образом, скаутит различных форм образуется в зависимости от того, на основе какого исходного гидрата он формируется. В процессе образования скаутита не происходит замена кремния на углерод, а имеет место образование двойной соли.

Проведенный анализ [22] показывает, что скаутит может формироваться как на основе ксонотлитов, так и на основе тоберморитов. Очевидно, что образование скаутита на основе тоберморитовых фаз будет происходить более активно, так как структура тоберморита является менее устойчивой.

Теоретический анализ возможных механизмов взаимодействия цементных минералов с карбонатом кальция показал всю сложность гидратации цемента в присутствии кальцита. В рамках выполненных исследований не ставилась цель расшифровки структуры сложных гидрокарбосиликатов кальция. Важным является установленный

факт взаимодействия β - C_2S с карбонатом кальция, результатом которого является формирование новых гидратных фаз, способствующих повышению прочности цементного камня, приготовленного на основе β - C_2S . Исследования прочностных характеристик цементных паст на основе β - C_2S , твердевших в нормальных условиях в течение 1,5 года, показали, что образцы имели весьма низкую прочность. Однако добавка тонкомолотого кальцита способствует повышению прочности. Так, прочность образцов $1 \times 1 \times 1$ см контрольного состава при В/Т=0,5 составила всего 0,7 МПа. Добавка кальцита в количестве 10 % от массы вяжущего приводит к повышению прочности в 2 раза ($R_{сж}=1,4$ МПа). Характерно, что комплексная добавка на основе кальцита (10 %) и суперпластификатора С-3 (0,3 %) обеспечивает повышение прочности более чем в 4 раза ($R_{сж}=3,1$ МПа).

Исследования, выполненные на чистом цементе, также показали, что тонкомолотый кальцит способствует повышению прочности в среднем на 10-30 %. Использование совместно с кальцитом суперпластификатора С-3 приводит лишь к незначительному повышению прочности (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Прочность цементного камня с добавкой тонкомолотого кальцита

Состав	Количество добавки, % от массы цемента	Прочность при сжатии, МПа	
		60 суток	1,5 года
ЦЕМ I/A 42,5 В/Ц=0,45	-	35,9	41,2
ЦЕМ I/A 42,5 В/Ц=0,45 +тонкомолотый кальцит	5	<u>38,6</u> 107	<u>55,8</u> 136
ЦЕМ I/A 42,5 В/Ц=0,45 +тонкомолотый кальцит	10	<u>39,7</u> 110	<u>49,0</u> 119
ЦЕМ I/A 42,5 В/Ц=0,45 +тонкомолотый кальцит +С-3	10 0,3	<u>37,2</u> 104	<u>42,9</u> 104

П р и м е ч а н и е . В числителе – прочность образцов в МПа, в знаменателе – прирост прочности в % по сравнению с контрольным составом.

Исследования кинетики твердения и прочности мелкозернистого высокопрочного бетона с использованием смесей карбонатных накопителей различных фракций показали, что у карбонатных пород при использовании суперпластификатора Melflux 5581 уже через 1 сутки прочность $R=41$ МПа, а через 28 суток прочность возрастает до 130 МПа (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Влияние карбонатных наполнителей на прочность мелкозернистого бетона

Состав	Расход на 1 м ³ , кг	В/Ц	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа, через, сут		
				1	7	28
1	2	3	4	5	6	7
ЦЕМ I/A 42,5	700	0,27	2411	41,5	120,5	130,0
ГП Melflux 5581 1 % от массы цемента	7					
Известняк молотый $S_{уд}=3500$ см ² /г	300					
Песок известняковый тонкий Фр 0,16÷0,63 мм	700					

1	2	3	4	5	6	7
Песок известня- ковый крупный Фр 0,63÷2,5 мм	470					
Вода	190					

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Теоретически показана возможность активации гидратации силикатных фаз цемента в присутствии тонкомолотого кальцита с образованием гидрокарбосиликатов кальция различной структуры.

2. Рентгенофазовыми исследованиями образцов β - C_2S , гидратированных в присутствии кальцита в период до 1,5 года, установлено, что кальцит способствует активации образования гидросиликатов кальция и повышению прочности образцов β - C_2S .

3. Исследованиями влияния кальцита на прочность чистого цементного камня установлено, что прочность образцов с добавкой кальцита в количестве до 10 % от массы цемента возрастает в среднем на 10-30 % по сравнению с составами без добавки. Использование совместно с кальцитом суперпластификатора С-3 замедляет кинетику твердения цементного камня в период до 1,5 года.

4. Применение в технологии высокопрочных мелкозернистых бетонов микронаполнителей и заполнителей на основе карбонатных пород позволяет получать прочность мелкозернистого бетона в возрасте 1 сут нормального твердения 41,5 МПа и в возрасте 28 суток – 130 МПа.

Список литературы

1. Хозин, В.Г. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности: монография / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков, И.Р. Сибгатулин. – М.: Изд-во АСВ, 2021. – 366 с.
2. Тараканов, О.В. Гидратация и твердение цементных материалов с добавками минеральных шламов / О.В. Тараканов, Т.В. Пронина. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 150 с.
3. Bornemann, R. Ultrahochfester Beton–Entwicklung und Verhalten / R. Bornemann, E. Fenling // Leipziger Massivbauseminar. – 2000. – Bd. 10. – P. 1–15.
4. Schmidt, M. Möglichkeiten und Crensen von Hochfester Beton / M. Schmidt, R. Bornemann // Proc. 14, Jbausil. – 2000. – Bd. 1. – P. 1083–1091.
5. Grübe, P. Vom Gussbeton zum Selbstverdichtenden Beton / P. Grübe, C. Lemmer, M. Rühl. – P. 243–249.
6. Kleingelhöfer, P. Neue Betoverflüssiger auf Basis Policarboxilat / P. Kleingelhöfer // Proc. 13. Jbasil Weimar. – 1997. – Bd. 1. – P. 491–495.
7. Калашников, В.И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: дис. ... в форме научного доклада на соискание степени д.т.н. / В.И. Калашников. – Воронеж, 1996. – 89 с.
8. Калашников, В.И. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Тараканов, Д.В. Калашников, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – №9. – С.70.
9. Калашников, В.И. Концепция стратегического развития пластифицированных порошково–активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – №12 (988). – С. 48–52.
10. Тараканов, О.В. Расширение базы комплексных органоминеральных добавок в технологии бетона / О.В. Тараканов, Т.К. Акчурин, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно–строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – Вып. 3(88). – С. 97–107.
11. Тараканов, О.В. Применение модифицированных бетонов нового поколения в строительстве / О.В. Тараканов, Т.К. Акчурин, Е.А. Белякова // Вестник Волгоградско-

го государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 1 (86). – С. 163–174.

12. Erofeev, V. Biological resistance of cement composites filled with limestone powders / V. Erofeev, V. Kalashnikov, D. Emelyanov, I. Tretiakov, A. Matvievskiy // *Solid State Phenomena*. – 871. – P. 22–27.

13. Erofeev, V. Biological resistance of cement composites filled with dolomite powders / V. Erofeev, V. Kalashnikov, D. Emelyanov, I. Tretiakov, A. Matvievskiy // *Solid State Phenomena*. – 871. – P. 33–39.

14. Erofeev, V. Physical and mechanical properties of the cement stone based on biocidal Portland cement with active mineral additive / V. Erofeev, V. Kalashnikov, S. Karpushin, I. Tretiakov, A. Matvievskiy // *Solid State Phenomena*. – 871. – P. 28–32.

15. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 187 с.

16. Тейлор, Х. Химия цемента / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. 560 с.

17. Рамачадран, В.С., Добавки в бетон: справ. пособие / В.С. Рамачадран, Р.Ф. Фельдман, М. Коллепарди [и др.]. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.

18. Вернигорова, В.Н. Физико-химические основы образования модифицированных гидросиликатов кальция в композиционных материалах на основе системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ / В.Н. Вернигорова. – Пенза: ЦНТИ, 2001. – 393 с.

19. Чернышов, Е.М. Портландитовые и портландито-карбонатные бесцементные системы твердения / Е.М. Чернышов, Н.Д. Потамошнева, О.Б. Кукина // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. – 2002. – №5. – С. 8–10.

20. Калашников, В.И. Теоретические предпосылки высокой поверхностной реакционной активности карбонатов в формировании прочности карбонатно-цементных и карбонатно-шлаковых вяжущих / В.И. Калашников, Л.В. Хвастунов, О.Л. Викторова, В.М. Журавлев, В.И. Степанов // *Современные проблемы строительного материаловедения* / V Акад. чтения РААСН. – Воронеж, 1999. – С.181–187.

21. Бирюков, А.И. Твердение силикатных минералов цемента / А.И. Бирюков. – Харьков: Транспорт Украины, 1999. – 288 с.

22. Козлова, В.К. Продукты гидратации кальциево-силикатных фаз цемента и смешанных вяжущих веществ / В.К. Козлова, Ю.А. Ильевский, Ю.В. Карпова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – 185 с.

References

1. Khozin, V.G. «Carbonate» cements of low water demand: monograph / V.G. Khozin, O.V. Khokhryakov, I.R. Sibgatulin. – М.: DIA Publishing House, 2021. – 366 p.

2. Tarakanov, O.V. Hydration and hardening of cement materials with additives of mineral slurries / O.V. Tarakanov, T.V. Pronina. – Penza: PGUAS, 2006. – 150 p.

3. Bornemann, R. Ultrahochfester Beton–Entwicklung und Verhalten / R. Bornemann, E. Fenling // *Leipziger Massivbauseminar*. – 2000. – Bd. 10. – P. 1–15.

4. Schmidt, M. Möglichkeiten und Crensen von Hochfester Beton / M. Schmidt, R. Bornemann // *Proc. 14, Jbausil*. – 2000. – Bd. 1. – P. 1083–1091.

5. Grube, P. Vom Gussbeton zum Selbstverdichtenden Beton / P. Grube, C. Lemmer, M. Rühl. – P. 243–249.

6. Kleingelhöfer, P. Neue Betoverflüssiger auf Basis Policarboxilat / P. Kleingelhöfer // *Proc. 13. Jbasil Weimar*. – 1997. – Bd. 1. – P. 491–495.

7. Kalashnikov, V.I. Fundamentals of plasticization of mineral dispersed systems for the production of building materials: Dissertation in the form of a scientific report for the degree of Doctor of Technical Sciences / V.I. Kalashnikov. – Voronezh, 1996. – 89 p.

8. Kalashnikov, V.I. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, jointly ground with cement or mineral rocks / V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz, O.V. Tarakanov, D.V. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev // *Building Materials*. – 2014. – No. 9. – P.70.

9. Kalashnikov, V.I. The concept of strategic development of plasticized powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov // BST: Bulletin of construction equipment. – 2016. – №12 (988). – P. 48–52.
10. Tarakanov, O.V. Expansion of the base of complex organomineral additives in concrete technology / O.V. Tarakanov, T.K. Akchurin, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2022. – Issue 3(88). – P. 97–107.
11. Tarakanov, O.V. Application of modified new generation concrete in construction / O.V. Tarakanov, T.K. Akchurin, E.A. Belyakova // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. – 2022. – № 1 (86). – P. 163–174.
12. Erofeev, V. Biological resistance of cement composites filled with limestone powders / V. Erofeev, V. Kalashnikov, D. Emelyanov, I. Tretiakov, A. Matvievskiy // Solid State Phenomena. – 871. – P. 22–27.
13. Erofeev, V. Biological resistance of cement composites filled with dolomite powders / V. Erofeev, V. Kalashnikov, D. Emelyanov, I. Tretiakov, A. Matvievskiy // Solid State Phenomena. – 871. – P. 33–39.
14. Erofeev, V. Physical and mechanical properties of the cement stone based on biocidal Portland cement with active mineral additive / V. Erofeev, V. Kalashnikov, S. Karpushin, I. Tretiakov, A. Matvievskiy // Solid State Phenomena. – 871. – P. 28–32.
15. Ratinov, V.B. Additives in concrete / V.B. Ratinov, T.I. Rosenberg. – M.: Stroyizdat, 1989. – 187 p.
16. Taylor H. Chemistry of cement / H. Taylor. – M.: Mir, 1996. 560 p.
17. Ramachadran, V.S. Additives in concrete: reference. the manual / V.S. Ramachadran, R.F. Feldman, M. Kolleparadi [etc.]. – M.: Stroyizdat, 1988. – 575 p.
18. Vernigorova, V.N. Physico-chemical bases of the formation of modified calcium hydrosilicates in composite materials based on the CaO-SiO₂-H₂O system / V.N. Vernigorova. – Penza: Central Research Institute, 2001. – 393 p.
19. Chernyshov, E.M. Portlandite and portlandite-carbonate cement-free hardening systems / E.M. Chernyshov, N.D. Potamoshneva, O.B. Kukina // Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2002. – No. 5. – P. 8–10.
20. Kalashnikov, V.I. Theoretical prerequisites for high surface reactivity of carbonates in the formation of strength of carbonate-cement and carbonate-slag binders / V.I. Kalashnikov, L.V. Khvastunov, O.L. Viktorova, V.M. Zhuravlev, V.I. Stepanov // Modern problems of building materials science / V Acad. RAASN readings. – Voronezh, 1999. – P.181–187.
21. Biryukov, A.I. Hardening of silicate minerals of cement / A.I. Biryukov. – Kharkiv: Transport of Ukraine, 1999. – 288 p.
22. Kozlova, V.K. Hydration products of calcium-silicate phases of cement and mixed binders / V.K. Kozlova, Yu.A. Ilyevskiy, Yu.V. Karpova. – Barnaul: Publishing house of AltSTU, 2005. – 185 p.

УДК 691.537

DOI 10.54734/20722958_2024_1_59

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

Гаврилов Михаил Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Начертательная геометрия
и графика»

E-mail: gavrillov79@inbox.ru

*Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, Центральный федеральный
округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,
тел. +7 (495) 781-80-07;
факс +7 (495) 781-80-07

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук,
профессор 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

Gavrilov Mikhail Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Descriptive Geometry
and Graphics»

E-mail: gavrillov79@inbox.ru

Moscow State University of Civil Engineering

Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoye shosse,
tel.: +7(495) 583-73-81;
fax: +7(495) 582-59-67

Erofeev Vladimir Trofimovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Construction Materials Science»

ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИТОВ

М.А. Гаврилов, В.Т. Ерофеев

Приведены результаты исследования прочностных и деформативных свойств эпоксидных композитов для защиты трубопроводов с применением модификаторов на основе жидкого синтетического каучука, кремнийорганических жидкостей и наполнителей различной природы. Выявлено определяющее влияние модифицирующих добавок и наполнителей на прочностные и деформативные свойства композитов. Установлено, что кремнийорганические продукты упрочняют эпоксидный композит. Получены аналитические зависимости прочности эпоксидного композита на кварцевом песке в зависимости от вида и концентрации добавок.

Ключевые слова: прочность, деформативные свойства, защитные свойства, эпоксидный композит

DURABLE AND DEFORMATIVE PROPERTIES OF EPOXY PROTECTIVE COMPOSITES

M.A. Gavrilov, V.T. Erofeev

The article provides the results of researching durable and deformative properties of epoxy composites for protection pipe lines, which are modified with liquid rubber, silicaorganic liquids and various types of fillers. The determining influence of modifying additives and fillers on durable and deformative properties is revealed. It has been found that silicaorganic products strengthen the epoxy composite. Analytic dependencies have been got for strength of quartz sand-based epoxy composite, depending upon the type and amount of additives.

Keywords: durability, deformative properties, protective properties, epoxy composite

В настоящее время особую значимость приобретают исследования, направленные на разработку материалов для защиты металлических трубопроводов от коррозии. В качестве связующего в полимерных композитах широкое распространение получили эпоксидные смолы. Многочисленные исследования позволили установить высокий

уровень основных физико-механических свойств полимерных строительных материалов на основе эпоксидных смол [1]. Однако довольно высокая хрупкость, вязкость, наличие внутренних напряжений, недостаточная водостойкость композитов, относительно высокая стоимость эпоксидного связующего ограничивают технические возможности широкого применения эпоксидных композитов при защите тепловых сетей от коррозии [2]. Несмотря на недостатки эпоксидных полимеров, представляется перспективным их использование для защиты тепловых сетей. Для устранения указанных недостатков применяют различные добавки, изменяют технологические режимы приготовления, формования, обработки композиционных материалов на основе эпоксидных смол. Разработка методов физико-химической модификации эпоксидных композитов, позволяющих целенаправленно регулировать их свойства, является актуальной задачей. Практическая реализация таких исследований приведет к повышению надежности и долговечности изделий из полимерных материалов на основе эпоксидных смол, а следовательно, к повышению долговечности и надежности защищаемых конструкций. Особые требования предъявляются к прочности материала. Вопросы управления прочностью имеют большое значение при создании материалов с заранее заданными свойствами. Показана возможность регулирования прочности полимерных композитов путем введения различных по природе наполнителей, ПАВ в качестве модифицирующих добавок, изменения режима отверждения.

Прочность эпоксидных полимеррастворов зависит от следующих факторов: состояния поверхности минерального наполнителя, соотношения полимер – наполнитель, адгезионной связи в зоне контакта эпоксидной матрицы с наполнителем, дисперсности наполнителя. Исследования прочности отвержденных эпоксидных полимеррастворов проводились по следующим направлениям:

- исследование влияния вида наполнителя;
- исследование влияния добавок жидкого синтетического каучука;
- исследование влияния добавок кремнийорганических жидкостей.

В качестве наполнителя полимеррастворов использовались кварцевый песок, молотый известняк, молотый кокс. Составы, применяемые в исследованиях, приведены в табл. 1.

Наполнитель оказывает существенное влияние на прочность эпоксидных полимеррастворов. Наибольший предел прочности при сжатии показывают полимеррастворы, наполненные коксом ($\sigma_{сж} = 143,3$ МПа). Активные группы твердеющих эпоксидных смол (эпоксидные, гидроксильные, аминогруппы) способны вступать во взаимодействие с поверхностью кварцевых и карбонатных материалов с образованием водородных связей. Высокая адгезия эпоксидной смолы к поверхности наполнителя и прочность отвержденных полимеррастворов могут свидетельствовать об образовании ковалентных связей. Но на поверхности кварцевого наполнителя всегда находится тонкий слой связанной воды, поэтому кубиковая прочность эпоксидных полимеррастворов на кварцевом песке существенно ниже, чем на известняке.

Т а б л и ц а 1

Составы, применяемые в исследованиях

Номер состава	Содержание компонентов в частях по массе			
	ЭД-20	ПЭПА	добавка	наполнитель
1	100	20	-	500
2	100	20	0,62	500
3	100	20	1,55	500
4	100	20	3,0	500
5	100	20	6,0	500
6	100	20	20,0	500
7	100	20	30,0	500

Разрушение полимерраствора носит адгезионно-когезионный характер. Когезионная прочность наполнителя превышает прочность полимерной матрицы, что не

оказывает существенного влияния на прочность композита в целом. Это приводит к тому, что разрушение наполненных полимерных композитов происходит главным образом по зоне контакта полимерной матрицы с поверхностью наполнителя и по самой матрице.

При изучении влияния добавок синтетических каучуков на прочностные свойства эпоксидных композитов были поставлены следующие задачи:

- исследование влияния добавок на прочность композитов на различных наполнителях;
- определение оптимальных концентраций добавок.

В табл. 2 представлены результаты исследований влияния добавок ЖСК при концентрации 20 % на прочность эпоксидных полимеррастворов, наполненных кварцевым песком, известняком и коксом.

Т а б л и ц а 2

Влияние ЖСК на прочность эпоксидных полимеррастворов на различных наполнителях

Вид наполнителя	Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут			
	без добавки	СКН-КТР	СКН-18	СКПС
Кварцевый песок	96,1	47,8	83,3	81,1
Известняк	107,2	53,3	96,7	87,5
Кокс	143,3	106,1	121,1	147,2

Как видно из результатов, приведенных в табл. 2, добавки ЖСК понижают прочность эпоксидных полимеррастворов. Наибольшее снижение прочности происходит при введении добавки каучука СКН-КТР.

Снижение прочности композитов за счет введения добавок ЖСК можно объяснить тем, что жидкий каучук, распределяясь в объеме полимерной матрицы в виде дисперсных включений, приводит к снижению жесткости системы.

Влияние концентрации и вида ЖСК на прочностные свойства эпоксидных полимеррастворов изучали на образцах, наполненных кварцевым песком. В табл. 3 приведены результаты этих исследований.

Т а б л и ц а 3

Влияние концентрации каучуков на прочностные свойства эпоксидных композитов

Наименование добавки	Концентрация, %	Прочность при сжатии, МПа в возрасте, сут				
		1	3	7	14	28
СКН-18	0,0	73,3	76,5	79,4	89,2	96,1
	0,5	69,4	71,1	72,8	75,0	95,6
	1,5	76,1	78,3	80,4	83,9	84,4
	3,0	57,2	63,0	65,0	68,3	78,9
	6,0	62,8	67,2	73,3	75,6	78,3
	20,0	75,6	76,2	76,7	82,6	83,3
	30,0	69,4	72,1	74,4	75,0	82,2
СКН-КТР	0,5	64,4	68,9	71,1	80,0	87,2
	1,5	55,3	60,6	63,3	72,8	76,7
	3,0	45,6	47,8	52,5	63,3	68,9
	6,0	40,6	42,8	48,9	53,3	58,9
	20,0	34,4	41,1	46,7	47,2	47,8
	30,0	33,3	36,7	41,7	42,6	43,3
СКПС-70	0,5	76,7	79,4	81,7	87,2	87,2
	1,5	80,0	82,5	83,5	90,0	92,8
	3,0	81,1	82,3	82,8	90,6	92,2
	6,0	65,0	80,6	81,1	86,1	98,3
	20,0	63,9	67,7	71,1	77,2	81,1
	30,0	50,0	54,7	61,1	63,9	70,0

Как видно из табл. 3, прочность ЭК зависит от концентрации и вида добавок ЖСК. Проанализировав результаты испытаний, можно сделать вывод, что концентрация ЖСК 0,5-3,0 % от массы смолы является оптимальной, при дальнейшем увеличении концентрации происходит интенсивное снижение прочности ЭК.

Малые (легирующие) добавки ЖСК упорядочивают структуру ЭК.

Большая концентрация ЖСК приводит к блокированию реакционных групп, что снижает прочность в целом.

В результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ получены следующие выражения для прочности ЭК на кварцевом песке в зависимости от концентрации ЖСК:

- для добавки СКН-18

$$\sigma_{сж} = 80,59 - 5,3X_1 + 0,24X_1^2 + 0,023X_2^2;$$

- для добавки СКН-КТР

$$\sigma_{сж} = 69,57 - 10,53X_1 + 1,61X_2 + 0,16X_1X_2 + 0,41X_1^2 - 0,04X_2^2;$$

- для добавки СКПС

$$\sigma_{сж} = 73,36 + 2,08X_1 + 0,84X_2 - 0,14X_1^2 - 0,01 X_2^2,$$

где X_1 – концентрация соответствующей добавки в % от массы смолы; X_2 – время отверждения, сут.

С целью повышения когезионной прочности и стойкости ЭК к воздействию агрессивных сред вводили кремнийорганические продукты: гидрофобизирующую жидкость 136-41, силазан МСН-7-80 и полиметилфенилсилоксан КО-921. Влияние концентрации кремнийорганических жидкостей (КОЖ) на предел прочности при сжатии ЭК, наполненных кварцевым песком, представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Влияние концентрации КОЖ и ЖСК на прочностные свойства ЭК

Концентрация каучука СКН-18, % от массы смолы	Время отверждения, сут	Концентрация гидрофобизирующей жидкости 136-41, % от массы смолы					
		0	0,01	0,25	0,005	0,075	0,10
0,5	1	57,2	63,3	68,3	68,8	54,2	53,3
	3	65,8	65,0	69,5	70,0	57,2	63,3
	7	60,0	68,9	71,7	73,3	63,3	67,2
	14	71,2	75,0	76,7	78,3	79,5	71,7
	28	73,3	81,7	77,6	83,3	81,7	72,8
5	1	51,2	61,2	67,8	58,3	56,7	52,2
	3	60,0	63,3	74,5	67,5	64,5	74,2
	7	61,2	67,8	75,0	73,3	67,8	76,1
	14	64,4	74,2	75,6	75,6	77,5	78,9
	28	69,8	77,5	79,1	80,0	81,1	83,1
10	1	64,4	62,8	64,4	62,2	61,1	56,4
	3	65,0	66,1	68,3	70,0	70,0	63,3
	7	66,7	70,0	72,2	71,3	73,3	65,0
	14	74,2	70,6	73,3	75,0	74,4	68,7
	28	78,5	73,3	75,0	77,6	79,1	69,9

Как видно из данных, представленных в табл. 4, добавка кремнийорганической жидкости 136-41 приводит к повышению предела прочности при сжатии ЭК. Переход структуры эпоксидной матрицы под воздействием КОЖ из глобулярного строения в фибриллярное сопровождается повышением прочности отвержденных ЭК.

После обработки данных эксперимента на ЭВМ получена аналитическая зависимость прочности ЭК от концентрации добавки ЖСК, добавки КОЖ и времени отверждения:

$$\sigma_{сж} = 62,0 + 89,3X_1 + 1,26X_3 - 1055,56X_2^2,$$

где X_1 – концентрация добавки ЖСК, % от массы смолы; X_2 – концентрация добавки КОЖ, % от массы смолы; X_3 – время отверждения, сут.

Влияние вида и концентрации КОЖ на прочность при изгибе изучали на полимеррастворах, наполненных кварцевым песком. В табл. 5 представлены данные исследований влияния вида и концентрации добавок кремнийорганических жидкостей на предел прочности при изгибе ЭК.

Т а б л и ц а 5

Влияние вида и концентрации КОЖ на предел прочности при изгибе ЭК

Вид добавки	Концентрация КОЖ, % от массы смолы							
	0	0,01	0,05	0,075	0,1	1,0	5,0	10,0
Жидкость 136-41	26,5	30,8	35,7	27,8	26,6	–	–	–
КО-921	26,5	-	-	-	-	27,5	25,1	25,6
МСН-7-80	26,5	-	-	-	-	38,5	33,8	33,7

Как видно из результатов, приведенных в табл. 5, кремнийорганические добавки повышают предел прочности при изгибе ЭК на кварцевом песке, но не столь существенно, как предел прочности при сжатии.

Исследовали влияние концентрации добавок ЖСК и КОЖ на адгезионную прочность ЭК. Испытания проводили на ЭК, наполненных молотым кварцевым песком. Результаты исследований влияния концентрации ЖСК на адгезионную прочность ЭК приведены в табл. 6.

Экспериментальные данные исследования влияния концентрации КОЖ на адгезионную прочность ЭК представлены в табл. 7.

Т а б л и ц а 6

Влияние концентрации ЖСК на адгезионную прочность ЭК

Адгезионная прочность σ_{ag} , МПа	Концентрация добавки, % от массы смолы				
	0	0,5	1,0	3,0	5,0
		8,0	7,3	7,5	10,4

Т а б л и ц а 7

Влияние концентрации КОЖ на адгезионную прочность ЭК

Адгезионная прочность σ_{ag} , МПа	Концентрация добавки, % от массы смолы					
	0	0,01	0,025	0,05	0,075	0,1
		8,0	5,42	4,69	3,67	2,51

Как видно из результатов исследований (см. табл. 6, 7), добавки ЖСК и КОЖ оказывают влияние на адгезионную прочность ЭК, адгезия к металлической поверхности уменьшается.

Выводы

1. Исследовано влияние вида наполнителя на прочностные и деформативные свойства эпоксидного композита. Наибольшим пределом прочности при сжатии обладают полимеррастворы, наполненные коксом.

2. Кремнийорганические продукты упрочняют эпоксидный композит, наибольший эффект упрочнения достигается при применении КОЖ 136-41.

3. Получены аналитические зависимости прочности ЭК на кварцевом песке в зависимости от вида и концентрации добавок ЖСК.

Список литературы

1. Ерофеев, В.Т. Разработка и исследование цементных и полимерных композитов для ремонта мостового сооружения / В.Т. Ерофеев, Б.А. Бондарев, В.М. Круглов, М.А. Гаврилов // Транспортные сооружения. – 2021. – Т.8, №2.
2. Гаврилов, М.А. Прочностные свойства модифицированных эпоксидных композитов / М.А. Гаврилов, Д.М. Гаврилова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2022. – №4 (41). – С. 188–196.
3. Данилов, А.М. Разработка строительных материалов как сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2. – С. 50–54.
4. Данилов, А.М. Структура наполненного эпоксидного связующего. Оптическая и сканирующая зондовая микроскопия / А.М. Данилов, В.П. Селяев, А.Н. Круглова // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №1. – С. 41–52.
5. Гаврилов, Г.Н. Технология изготовления композиционных материалов методами литья, проката и прессования / Г.Н. Гаврилов, В.А. Хренов, В.Т. Ерофеев, М.А. Гаврилов. – Саранск, 2020. – 232 с.

References

1. Erofeev, V.T. Research and Evaluation of Cement and Polymer Based Compositions for Bridge Structural Maintenance / V.T. Erofeev, B.A. Bondarev, V.M. Kruglov, M.A. Gavrilo // Transport Infrastructure. – 2021. – Vol. 8, Issue 2.
2. Gavrilo, M.A. Rigidity Properties of Modified Epoxy Composites / M.A. Gavrilo, D.M. Gavrilo // PGUAS Herald: Construction, Science and Education. – 2022. – Issue 4 (41). – P.188–196.
3. Danilov, A.M. Researching The Construction Materials As Complex Sytems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional Architecture and Engineering. – 2016. – Vol. 2. – P. 50–54.
4. Danilov, A.M. Structure of Filled Epoxy Binder. Optical and Scanning Probe Microscopy / A.M. Danilov, V.P. Selyaev, A.N. Kruglova // Regional Architecture and Engineering. – 2014. – Vol. 1. – P. 41–52.
5. Gavrilo, G.N. Technology of Production of Composite Materials by Means of Molding, Rolling and Pressing / G.N. Gavrilo, V.A. Hrenov, V.T. Erofeev, M.A. Gavrilo. – Saransk, 2020. – 232 p.

УДК 51-74

DOI 10.54734/20722958_2024_1_65

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Светалкина Мария Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: adikaevka_01@mail.ru

Жегера Кристина Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством и
технология строительного производства»
E-mail: jegera@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»
Россия, 241037, г. Брянск,
ул. Станке Димитрова, д.3

Алпатов Евгений Геннадьевич,
аспирант кафедры «Производство
строительных конструкций»
E-mail: alpatov.egn@gmail.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

Svetalkina Maria Anatolievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Quality Management and
Technology of Construction Production»
E-mail: adikaevka_01@mail.ru

Zhegera Kristina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Quality Management and
Technology of Construction Production»
E-mail: jegera@yandex.ru

Bryansk State University of Engineering and Technology

Russia, 241037, Bryansk, 3,
Stanke Dimitrova St.

Alpatov Evgeny Gennadievich,
Postgraduate student of the Department
«Production of Building Structures»
E-mail: alpatov.egn@gmail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

М.А. Светалкина, К.В. Жегера, Е.Г. Алпатов

Подбор оптимального состава сухой строительной смеси – довольно трудоемкий процесс, требующий много времени и средств. Для автоматизации данного процесса применяют различное программное обеспечение. Представлен принцип работы программного обеспечения, используемого для планирования эксперимента. Приведен вариант использования предлагаемого программного обеспечения на примере оптимизации состава сухой строительной смеси. Составлена математическая модель влияния параметров оптимизации на выбранный параметр оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация, планирование эксперимента, программное средство, сухая строительная смесь

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF DRY BUILDING MIXES USING SOFTWARE TOOLS

M.A. Svetalkina, K.V. Zhegera, E.G. Alpatov

Selection of the optimal composition of a dry construction mix is a rather laborious process that takes a lot of time and money. Various software is used to automate this process. The article describes the principle of operation of the software used to plan the experiment. A variant of using the proposed software is given on the example of optimizing the composition of a dry construction mixture. A mathematical model of the influence of optimization parameters on the selected optimization parameter has been compiled.

Keywords: optimization, experiment planning, software, dry construction mix

Во многих областях науки и техники, в том числе и в строительстве, исследование того или иного явления или процесса возможно только эмпирически, то есть с помощью опыта или эксперимента.

Эксперименты, как правило, являются многофакторными и связаны с оптимизацией качества материалов, отысканием оптимальных условий проведения технологических процессов, разработкой наиболее рациональных конструкций оборудования и т.д. Системы, которые служат объектом таких исследований, очень часто являются такими сложными, что не поддаются теоретическому изучению в разумные сроки. Поэтому традиционные методы проведения экспериментальных исследований требуют больших затрат сил и средств в связи с тем, что являются «пассивными».

Одной из наиболее часто встречающихся проблем, встающих перед учеными различных специальностей, является проблема нахождения зависимости между некоторым набором величин. Эта зависимость может быть выведена из теории и (или) может быть получена на основании экспериментальных исследований. Если зависимость выведена из теоретических соображений, то довольно часто она может быть приближенно представлена в аналитическом виде, заданном с точностью до нескольких неизвестных параметров. Если же в основе построения зависимости лежат экспериментальные исследования, то параметрическая зависимость постулируется. В обоих случаях при построении математической модели должны использоваться сведения об исследуемом объекте, на основании которых мог бы быть сделан вывод о достаточной точности описания объекта моделью и, следовательно, о том, что приведенные для модели статистические выводы в определенной мере справедливы и по отношению к самому объекту.

Следовательно, возникает необходимость вести исследовательскую работу более ускоренными темпами, принимать решения быстро и по возможности верно. Чтобы достичь оптимального решения, целесообразно воспользоваться статистическими методами планирования эксперимента.

Под планированием эксперимента понимается организация экспериментального исследования, которая позволит собрать необходимые данные, применить для их анализа статистические методы и сделать правильные и объективные выводы. Без статистического подхода к планированию эксперимента не обойтись.

Если данные эксперимента содержат ошибки, то статистические методы являются единственным объективным подходом к их анализу. Таким образом, в любой экспериментальной задаче два аспекта: планирование эксперимента и статистический анализ данных, причем эти два аспекта тесно взаимосвязаны, так как метод анализа непосредственно зависит от выбранного плана.

В основе планирования эксперимента лежат два принципа – репликация и рандомизация. Под репликацией понимают повторение основного эксперимента. Рандомизация – краеугольный камень, на котором основано применение статистических методов в планировании эксперимента. Рандомизация означает, что распределение экспериментального материала и порядок, в котором должны проводиться отдельные опыты или прогоны, устанавливаются случайным образом.

Они способствуют повышению производительности труда экспериментатора, а также надежности и достоверности полученных результатов. Важным достоинством таких методов является универсальность, пригодность в большинстве областей исследований [1–4].

Реализация метода планирования эксперимента в настоящее время тесно связана с применением компьютеров и пакетов прикладных программ, которые представлены достаточно широко: STATISTICA DOE, DataFit, Microcal Origin, Statistica 6.0, PlanExp и др.

Сложность использования таких программ заключается в том, что экспериментатор должен обладать навыками программирования, что делает их применение достаточно проблематичным для множества исследователей и ставит необходимость искать программное обеспечение, более простое в использовании [5].

Цель исследования заключается в разработке программного обеспечения для проведения планирования эксперимента и реализации его применения на примере оптимизации рецептуры сухой строительной смеси (ССС).

Разработанное программное обеспечение работает на основе принципа, представленного на рис. 1 [6].

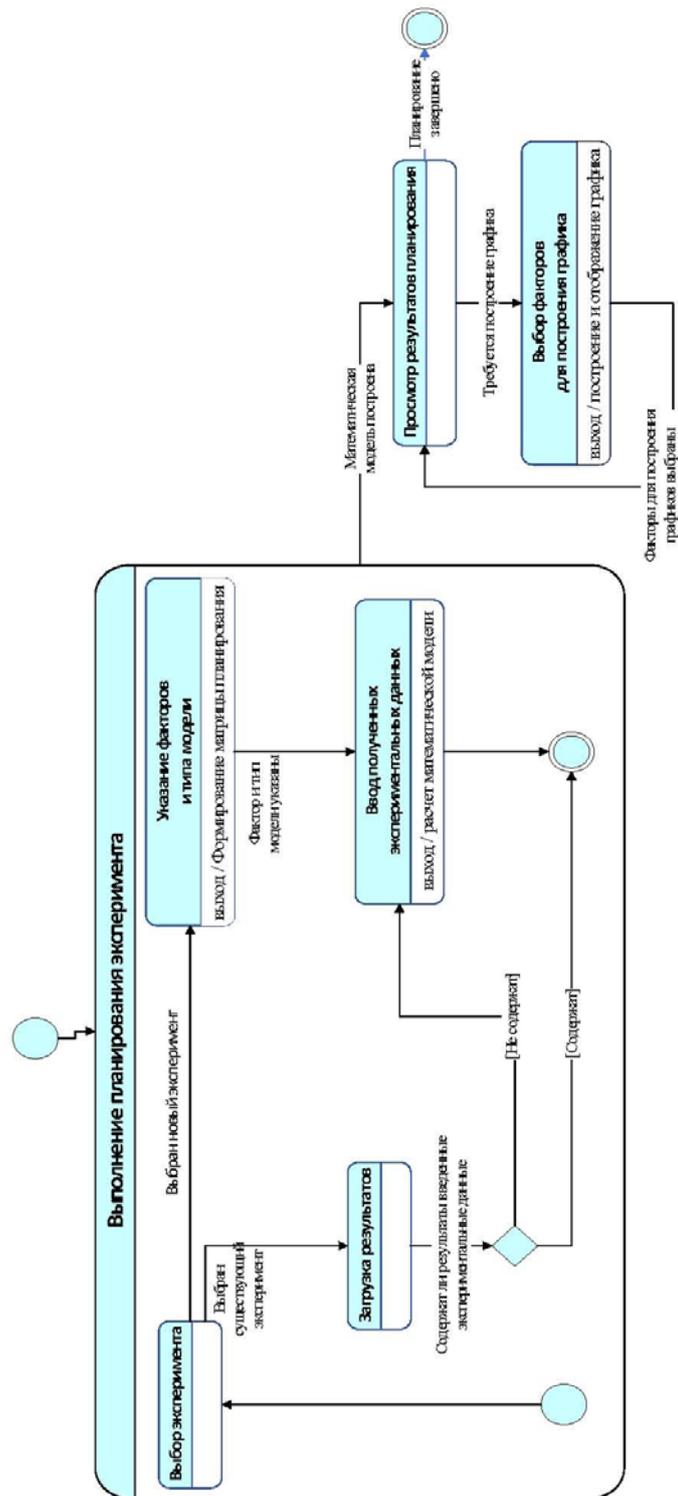


Рис. 1. Диаграмма состояний

Начало процесса обозначено переходом в состояние «Выполнение планирования эксперимента». Из состояния «Планирование эксперимента» следуют два возможных варианта развития событий. Первый вариант «Выбран новый эксперимент» переходит в состояние «Указание факторов и типа модели», и если исследователь продолжает работу в этом проекте эксперимента, то он переходит в состояние «Вывод полученных экспериментальных данных». В случае продолжения планирования следует переход в состояние «Ввод полученных экспериментальных данных» и составление математической модели.

Во втором варианте – «Выбран существующий эксперимент» – переход совершается в состояние «Загрузка результатов». При этом возможны два варианта принятия решений в зависимости от содержания введенных данных: если существующий эксперимент не содержал введенных экспериментальных данных, то осуществляется переход в состояние «Ввод полученных экспериментальных данных», если данные уже содержатся, то происходит переход в конечную точку.

Главным условием перехода из состояния «Планирование эксперимента» в новое состояние «Просмотр результатов планирования» является построение математической модели. Планирование эксперимента может завершиться только построением математической модели или дополнительным построением графика составленной модели [7].

С помощью разработанного программного средства проведена оптимизация рецептуры сухой строительной смеси (ССС) на цементной основе [8, 9].

В качестве параметра оптимизации выбрана прочность цементного композита, полученного на основе разрабатываемой ССС. Состав ССС включает: цемент, добавку-пластификатор (с/п) Кратасол ПФМ и аморфные алюмосиликаты.

Для оптимизации рецептуры сухой строительной смеси проведено планирование полного трехфакторного эксперимента (см. таблицу).

Условия изменения переменных

Уровни факторов	Кодированное обозначение	Факторы		
		Удельная поверхность наполнителя x_1 , %	Количество содержания наполнителя в цементном композите x_2 , %	Содержание суперпластификатора Кратасол ПФМ в цементном композите x_3 , %
Верхний уровень	-1	4886	10	0,7
Основной уровень	0	6886	15	1,0
Нижний уровень	+1	8886	20	1,3
Интервал варьирования	Δ	2000	5	0,3

После обработки полученных экспериментальных данных и исключения из уравнения регрессии незначимых коэффициентов уравнение приобрело следующий вид:

$$R_{сж} = 33,388 + 2,2125x_1 + 3,525x_2 - 0,9875x_3. \quad (1)$$

Адекватность построенной модели проверялась по критерию Фишера. Так как табличное значение критерия Фишера $F_{кр}=3,5$ больше расчетного значения $F=3,1$, можно считать, что построенная модель адекватно описывает исследуемую систему.

Однородность дисперсий оценивалась по критерию Кохрена. Расчетное значение критерия, равное 0,12, меньше табличного значения 0,63.

Графическая интерпретация полученных данных представлена на рис. 2–4.

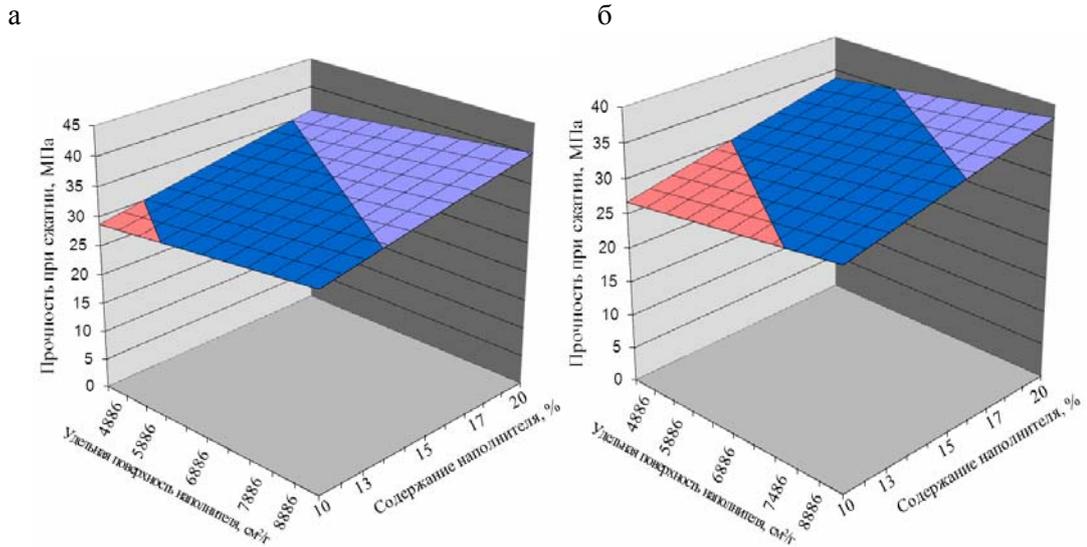


Рис. 2. Прочность цементного камня в зависимости от удельной поверхности и количества синтетической добавки:

а – с добавлением с/п Кратасол ПФМ, 0,5 % от массы вяжущего;
 б – с добавлением с/п Кратасол ПФМ, 1,5 % от массы вяжущего

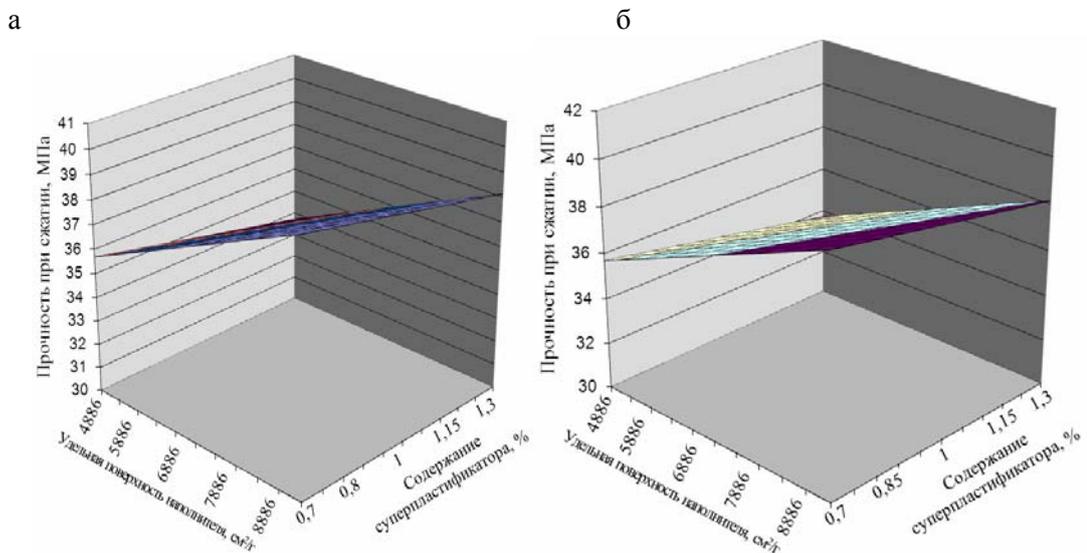


Рис. 3. Прочность цементного композиционного камня в зависимости от удельной поверхности синтетической добавки и процентного содержания с/п Кратасол ПФМ:

а – при содержании синтетических цеолитов 10 % от массы вяжущего;
 б – при содержании синтетических цеолитов 20 % от массы вяжущего

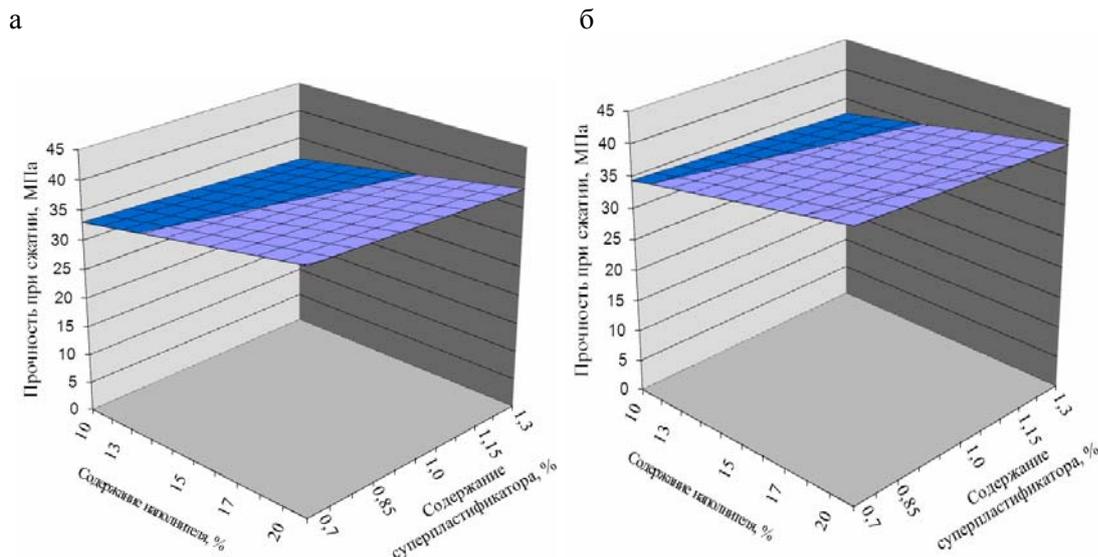


Рис. 4. Прочность цементного композиционного камня в зависимости от содержания добавки и процента с/п Кратасол ПФМ:

- а – при удельной поверхности добавки 4886 см²/г;
 б – при удельной поверхности добавки 8886 см²/г

Полученные коэффициенты уравнения регрессии (см. рис. 2–4) свидетельствуют, что добиться увеличения прочности цементного композита можно путем повышения удельной поверхности добавки и одновременного уменьшения содержания суперпластификатора. Таким образом, оптимальное содержание синтетической добавки в рецептуре клеевой ССС составляет 20 % с удельной поверхностью, равной 6886 см²/г.

Вывод

Показан принцип работы разработанного программного обеспечения, и с его помощью составлена модель оптимизации состава сухой строительной смеси.

Список литературы

1. Яценко, Л.А. Применение методов математической статистики для исследования влияния параметров синтеза на свойства пористых стеклокомпозитов / Л.А. Яценко, Б.М. Гольцман, Е.А. Яценко, В.С. Яценко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 2 (214). – С. 78–84.
2. Сединин, И.Н. Определение влияния переменных факторов на математическую модель шероховатости торцевого фрезерования / И.Н. Сединин, В.Ф. Макаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №2. – С. 659–665.
3. Суржиков, В.Ф. Планирование физического эксперимента в задачах анализа результатов воздействия помех на радиоэлектронную аппаратуру / В.Ф. Суржиков // Мир науки, культуры, образования. – 2021. – № 2(87). – С. 171–173. – DOI: 10.24412/1991-5497-2021-287-171-173
4. Ешбаева, У.Ж. Моделирование краскоперехода на бумаге, содержащей отходы полиэстерного (лавсанового) волокна, методом математического планирования эксперимента / У.Ж. Ешбаева, Н.Б. Алиева, Д.Х. Усманов // Universum: технические науки. – 2023. – № 6–2 (111). – С. 36–40.
5. Пышкина, И.С. Разработка программного средства планирования и анализа результатов эксперимента / И.С. Пышкина, Г.В. Мартяшин, А.В. Жуланов, Н.Ю. Елизаров // Форум молодых ученых. – 2015. – №7(23). – С. 814–818.
6. Пышкина, И.С. Программный комплекс планирования эксперимента и анализа экспериментальных данных / И.С. Пышкина, Г.В. Мартяшин // Новые информа-

ционные технологии и системы сборник научных статей XII Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 63–65.

7. Пышкина, И.С. Разработка информационной подсистемы оптимизации составов строительных материалов / И.С. Пышкина, Г.В. Мартяшин, Т.А. Глебова // Форум молодых ученых. – 2018. – №7 (23). – С. 819–824.

8. Жегера, К.В. Оптимизация режимов синтеза добавки на основе аморфных алюмосиликатов / К.В. Жегера // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 11. – С. 17–20. – DOI: 10.12737/article_5bf7e353db5229.24492197

9. Логанина, В.И. Оптимизация режима синтеза гидросиликатов кальция для известкового композиционного вяжущего / В.И. Логанина, И.С. Пышкина, Р.В. Тарасов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 65.

References

1. Yatsenko, L.A. Application of methods of mathematical statistics for the study of the influence of synthesis parameters on the properties of porous glass composites / L.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, E.A. Yatsenko, V.S. Yatsenko // Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical sciences. – 2022. – № 2 (214). – P. 78–84.

2. Sedinin, I.N. Determination of the influence of variable factors on the mathematical model of the roughness of end milling / I.N. Sedinin, V.F. Makarov // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2021. – № 2. – P. 659–665.

3. Surzhikov, V.F. Planning of a physical experiment in the tasks of analyzing the results of interference effects on radio-electronic equipment / V.F. Surzhikov // The world of science, culture, and education. – 2021. – № 2(87). – P. 171–173. – DOI: 10.24412/1991-5497-2021-287-171-173

4. Eshbaeva, U.Zh. Modeling of a paint transition on paper containing polyester (dacron) fiber waste by the method of mathematical experiment planning / U.Zh. Eshbaeva, N.B. Alieva, D.H. Usmanov // Universum: technical sciences. – 2023. – № 6–2 (111). – P. 36–40.

5. Pyshkina, I.S. Development of a software tool for planning and analyzing experimental results / I.S. Pyshkina, G.V. Martyashin, A.V. Zhulanov, N.Yu. Elizarov // Forum of Young Scientists. – 2015 – №7(23). – P. 814–818.

6. Pyshkina, I.S. Program complex of experiment planning and analysis of experimental data / I.S. Pyshkina, G.V. Martyashin // New information technologies and systems collection of scientific articles of the XII International Scientific and Technical Conference. – 2015.– P. 63–65.

7. Pyshkina, I.S. Development of an information subsystem for optimizing the composition of building materials / I.S. Pyshkina, G.V. Martyashin, T.A. Glebova // Forum of Young Scientists. – 2018. – №7 (23). – P. 819–824.

8. Zhegera, K.V. Optimization of modes of synthesis of additives based on amorphous aluminosilicates / K.V. Zhegera // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2018. – № 11. – P. 17–20. – DOI: 10.12737/article_5bf7e353db5229.24492197

9. Loganina, V.I. Optimization of the synthesis mode of calcium hydrosilicates for lime composite binder / V.I. Loganina, I.S. Pyshkina, R.V. Tarasov // Modern problems of science and education. – 2014. – № 6. – P. 65.

УДК 691.327:539.4

DOI 10.54734/20722958_2024_1_72

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

Макридин Николай Иванович,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник научно-
исследовательского сектора

Максимова Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: maksimovain@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

Makridin Nikolai Ivanovich,
Doctor of Sciences, Chief Researcher of the
research sector

Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Quality Management and
Construction Production Technology»
E-mail: maksimovain@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ВАРИАЦИОННО- СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Приведены результаты сравнительной вариационно-статистической оценки качества параметров прочности R_{btf} и $R_{сж}$ конструкционных цементных композитов на двух видах портландцемента: бездобавочного М500-Д0 и М500-Д20. Сравнительные серии опытных образцов изготавливали при трех вариантах расхода цемента: 481, 289 и 385 кг/м³ бетона. Качество параметров прочности оценивали как на ранней, так и на поздней стадии структурообразования и твердения цементных систем в диапазоне времени 18 лет.

Ключевые слова: вариационно-статистическая оценка, параметры прочности, структурообразование, цементный композит, конструктивные и деструктивные процессы

COMPARATIVE VARIATIONAL AND STATISTICAL ASSESSMENT OF THE QUALITY OF STRENGTH PARAMETERS OF CEMENT COMPOSITES

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

A comparative variational and statistical assessment of the quality of strength parameters R_{btf} and $R_{сж}$ of structural cement composites of two types of Portland cement is given (one is additive-free grade M500-D0, and the other M500-D20). Comparative series of prototypes were produced with three variants of cement consumption: 481; 289 and 385 kg/m³. The quality of strength parameters was evaluated both at the early and late stages of structure formation and hardening of cement systems in the time range of 18 years.

Keywords: variational and statistical assessment, strength parameters, structure formation, cement composite, constructive and destructive processes

Расширение областей применения и повышение требований к конструкционным свойствам цементных композитов вызывают необходимость более глубокого понимания материаловедческих функций зависимости критериев прочности, надежности и долговечности от механики и технологии, состава и структуры конструкционных композитов путем комплексной оценки сравнительных испытаний механического

поведения под нагрузкой опытных образцов разного состава и структуры с позиций как механики деформируемого твердого тела (МДТТ), так и структурной механики разрушения материалов (СМРМ).

В современных условиях поиска путей получения и использования в строительстве бетонов нового поколения (БНП), в основу получения которых положена новая концепция бетоноведения – получение высокоподвижной матричной фазы бетонной смеси, проблема длительной конструкционной прочности БНП приобретает особый научный и практический интерес с позиций как выбора технологической и физико-химической оптимизации структуры, так и прогнозирования механических свойств цементных композитов.

Изучение природы механических свойств БНП с позиций МДТТ и СМРС [1–9] вызывает настоятельную необходимость широкого внедрения в исследовательскую практику при разработке и создании материалов новых научных принципов комплексной оценки силовых, деформационных и энергетических критериев конструкционной прочности с получением феноменологических математических моделей этих свойств, а также вариационно-статистической оценки качества параметров прочности R_{bif} и $R_{сж}$ цементных композитов на ранних и поздних стадиях их структурообразования и твердения. Это являлось целью и задачей нашего исследования по изучению характера изменения длительной прочности структур цементных композитов, полученных при механических испытаниях опытных образцов сравниваемых серий и испытанных по методике ГОСТ 29167-2021 на образцах типа I в разные сроки во временном диапазоне 6580 суток (18 лет) с применением метода акустической эмиссии, позволяющего изучать кинетику разрушения образцов в реальном масштабе времени [1].

Для изготовления сравниваемых опытных образцов использовали два вида портландцемента (ПЦ): Старооскольский ПЦ М500-Д0 с нормальной плотностью 0,257 и Вольский ПЦ М500-Д20 с минеральной пуццолановой добавкой на основе опоки и с нормальной плотностью 0,285. Для изготовления опытных образцов-призм типа I по ГОСТ 29167-2021 размером 40×40×160 мм использовали также Сурский речной песок, $M_{кр}=1,63$, и высокопрочный гранитный щебень фракции 5–10 мм. На каждом виде ПЦ изготавливали на каждый принятый срок испытания опытных образцов (в возрасте бетона одни сутки после ТВО; в возрасте 28 и 90 суток после ТВО; на поздней стадии структурообразования и твердения – 18 лет) по 23 серии сравниваемых образцов одинакового состава с одинаковой удобоукладываемостью, твердеющих в одинаковых условиях.

При этом, как следует из данных, приведенных в табл. 1 и 2, для изготовления опытных образцов было принято три расхода цемента: 481; 289 и 385 кг/м³ бетона. В табл. 1 и 2 приведены также технологические и физико-химические факторы влияния на формирование структуры и параметров качества конструкционной прочности цементных композитов на сравниваемых ПЦ по времени.

В работе [10] отмечается, что фактор времени вызывает в бетоне проявление двух характерных разнонаправленных процессов: процесса нарастания прочности во времени (процесс старения бетона), определяемого физико-химическими изменениями его структуры, и процесса снижения прочности находящегося в напряженном состоянии бетона, связанного с проявлением его реологических свойств – ростом деформаций во времени, приводящим к определенным нарушениям внутренних связей в материале на микро- и макроуровнях.

Технологические и физико-химические факторы влияния на формирование структуры и параметров конструкционной прочности цементных композитов на портландцементе марки М500-Д20 (ПО «Вольскцемент»)

Образец серии	Расход материалов на 1 м ³ , кг					В/Ц	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, °С	ТВО, °С·ч
	Ц	П	Щ	В	ПДО-М, % от массы Ц				
Расход портландцемента 481 кг/м ³ бетона									
1В	481	615	1100	211	1,7	0,438	12+2+7,4+3	77	570
3В	481	615	1100	216	0,3	0,450	12+2+7,4+3	77	570
5В	481	615	1100	211	1,7	0,438	12+2+4,6+3	77	354
7В	481	615	1100	216	0,3	0,450	12+2+4,6+3	77	354
9В	481	615	1100	216	1,7	0,450	12+2+7,4+3	63	466
11В	481	615	1100	207	0,3	0,430	12+2+7,4+3	63	466
13В	481	615	1100	216	0,7	0,450	12+2+4,6+3	63	290
15В	481	615	1100	207	0,3	0,431	12+2+4,6+3	63	290
Расход портландцемента 289 кг/м ³ бетона									
2В	289	932	1100	214	1,7	0,740	12+2+7,4+3	77	570
4В	289	932	1100	218	0,3	0,754	12+2+7,4+3	77	570
6В	289	932	1100	214	1,7	0,740	12+2+4,6+3	77	354
8В	289	932	1100	218	0,3	0,754	12+2+4,6+3	77	354
10В	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+7,4+3	63	466
12В	289	932	1100	214	0,3	0,741	12+2+7,4+3	63	466
14В	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+4,6+3	63	290
16В	289	932	1100	214	0,3	0,740	12+2+4,6+3	63	290
Расход портландцемента 385 кг/м ³ бетона									
19В	385	774	1100	171	2,0	0,445	12+2+6+3	70	420
20В	385	774	1100	229	0,0	0,595	12+2+6+3	70	420
21В	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+8+3	70	560
22В	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+4+3	70	280
23В	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	80	480
24В	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	60	360
25В	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	70	420

Т а б л и ц а 2

Технологические и физико-химические факторы влияния на формирование структуры и параметров конструкционной прочности цементных композитов на портландцементе марки М500-Д0 (ПО «Осколцемент»)

Образец серии	Расход материалов на 1 м ³ , кг					В/Ц	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, °С	ТВО, °С·ч
	Ц	П	Щ	В	ПДО-М, % от массы Ц				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход портландцемента 481 кг/м ³ бетона									
1с	481	615	1100	196	1,7	0,407	12+2+7,4+3	77	570
3с	481	615	1100	201	0,3	0,418	12+2+7,4+3	77	570
5с	481	615	1100	196	1,7	0,407	12+2+4,6+3	77	354
7с	481	615	1100	201	0,3	0,418	12+2+4,6+3	77	354

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9с	481	615	1100	216	1,7	0,450	12+2+7,4+3	63	466
11с	481	615	1100	207	0,3	0,430	12+2+7,4+3	63	466
13с	481	615	1100	216	0,7	0,450	12+2+4,6+3	63	290
15с	481	615	1100	207	0,3	0,431	12+2+4,6+3	63	290
Расход портландцемента 289 кг/м ³ бетона									
2с	289	932	1100	229	1,7	0,792	12+2+7,4+3	77	570
4с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+7,4+3	77	570
6с	289	932	1100	229	1,7	0,792	12+2+4,6+3	77	354
8с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+4,6+3	77	354
10с	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+7,4+3	63	466
12с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+7,4+3	63	466
14с	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+4,6+3	63	290
16с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+4,6+3	63	290
Расход портландцемента 385 кг/м ³ бетона									
19с	385	774	1100	171	2,0	0,444	12+2+6+3	70	420
20с	385	774	1100	207	0,0	0,538	12+2+6+3	70	420
21с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+8+3	70	560
22с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+4+3	70	280
23с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+6+3	80	480
24с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+6+3	60	360
25с	385	774	1100	185	1,0	0,480	12+2+6+3	70	420

Комплексная оценка совокупности показателей параметров качества конструкционной прочности R_{bif} и $R_{сж}$ на ранних стадиях и поздней стадии структурообразования и твердения цементных композитов в возрасте 6570 суток позволила получить обширный экспериментальный материал для сравнительного анализа и получения кинетических зависимостей процессов структурообразования и твердения.

Результаты комплексной вариационно-статистической оценки качества параметров прочности R_{bif} и $R_{сж}$ цементных композитов во времени на двух видах ПЦ при трех расходах цемента приведены в табл. 3–6.

Приведенные в табл. 3–6 экспериментально определенные значения оценки качества параметров: среднего арифметического M , среднего квадратического отклонения σ , вариационного коэффициента ν – для опытных данных определяли по формулам:

$$M = \frac{\sum V}{n},$$

где $\sum V$ – сумма всех вариантов; n – число наблюдений (вариант);

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum (V_i - M)^2}{n-1}},$$

где $\sum (V_i - M)^2$ – сумма квадратов отклонений всех вариантов от среднего арифметического; n – число наблюдений (вариант);

$$\nu = \pm \frac{\sigma}{M} \cdot 100, \%$$

Для табл. 3–6 примечание: в возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 90-суточного возраста.

Вариационно-статистическая оценка качества параметров прочности R_{bif} цементных композитов во времени на портландцементе марки М500-Д20 (ПО «Вольскцемент»)

Серия образцов	Прочность на растяжение при изгибе R_{bif} , МПа			
	Возраст бетона, t , сут.			
	1	28	90	6570
	Расход портландцемента 481 кг/м ³ бетона			
1в	6,4	7,16/1,12	7,18/1,00	11,73/1,63
3в	6,18	7,0/1,13	6,69/0,96	11,32/1,69
5в	6,68	7,74/1,16	8,23/1,06	11,32/1,37
7в	6,0	7,74/1,29	7,79/1,01	11,32/1,45
9в	5,9	8,8/1,49	7,74/0,88	10,8/1,39
11в	5,94	8,65/1,45	7,20/0,83	12,4/1,72
13в	5,94	8,19/1,38	6,96/0,85	10,29/1,48
15в	5,67	8,24/1,45	7,72/0,94	10,9/1,41
	Для R_{bif} : среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 6,09$ МПа	$M = 7,94$ МПа	$M = 7,44$ МПа	$M = 11,26$ МПа
	$\sigma = \pm 0,32$ МПа	$\sigma = \pm 0,651$ МПа	$\sigma = \pm 0,262$ МПа	$\sigma = \pm 0,607$ МПа
	$\nu = \pm 5,25$ %	$\nu = \pm 8,2$ %	$\nu = \pm 3,52$ %	$\nu = \pm 5,39$ %
	Расход портландцемента 289 кг/м ³ бетона			
2в	4,3	4,25/0,99	4,63/1,09	6,43/1,39
4в	3,37	3,74/1,11	4,12/1,1	5,04/1,22
6в	3,62	4,62/1,27	4,86/1,08	6,94/1,43
8в	2,81	3,58/1,27	4,12/1,15	4,63/1,12
10в	3,05	5,05/1,65	5,14/1,02	5,92/1,15
12в	2,59	4,41/1,7	3,6/0,82	10,2/2,83
14в	2,54	4,79/1,88	5,92/1,24	7,72/1,3
16в	2,08	3,95/1,9	3,86/0,98	6,79/1,76
	Для R_{bif} : среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 3,045$ МПа	$M = 4,3$ МПа	$M = 4,53$ МПа	$M = 6,71$ МПа
	$\sigma = \pm 0,703$ МПа	$\sigma = \pm 0,517$ МПа	$\sigma = \pm 0,763$ МПа	$\sigma = \pm 1,71$ МПа
	$\nu = \pm 23,09$ %	$\nu = \pm 12,03$ %	$\nu = \pm 16,8$ %	$\nu = \pm 25,5$ %
	Расход портландцемента 385 кг/м ³ бетона			
19в	4,52	6,93/1,53	5,56/0,8	11,83/2,13
20в	4,11	5,56/1,35	6,17/1,11	9,81/1,59
21в	3,92	6,62/1,69	7,2/1,09	10,8/1,5
22в	4,03	6,92/1,7	6,94/1,0	9,88/1,42
23в	3,8	5,17/1,36	6,02/1,16	9,26/1,54
24в	4,42	7,39/1,67	7,2/0,97	10,3/1,43
25в	3,92	6,92/1,76	7,2/1,04	10,4/1,44
	Для R_{bif} : среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 4,1$ МПа	$M = 6,5$ МПа	$M = 6,63$ МПа	$M = 10,33$ МПа
	$\sigma = \pm 0,27$ МПа	$\sigma = \pm 0,816$ МПа	$\sigma = \pm 0,7$ МПа	$\sigma = \pm 0,717$ МПа
	$\nu = \pm 6,58$ %	$\nu = \pm 12,5$ %	$\nu = \pm 10,5$ %	$\nu = \pm 6,95$ %

Вариационно-статистическая оценка качества параметров прочности R_{bf} цементных композитов во времени на портландцементе марки М500-Д0 (ПО «Осколцемент»)

Серия образцов	Прочность на растяжение при изгибе R_{bf} , МПа			
	Возраст бетона, t , сут.			
	1	28	90	6570
	Расход портландцемента 481 кг/м ³ бетона			
1с	6,74	8,14/1,21	7,63/0,94	10,85/1,33
3с	5,61	6,86/1,22	7,32/1,07	9,82/1,43
5с	6,22	8,45/1,36	8,36/0,99	11,83/1,4
7с	5,0	6,84/1,37	6,74/0,99	10,54/1,54
9с	3,36	7,74/2,3	8,15/1,053	10,13/1,31
11с	4,88	7,47/1,53	7,47/1,0	10,29/1,38
13с	4,92	7,5/1,52	7,16/0,95	10,29/1,37
15с	4,04	6,34/1,57	7,94/1,25	10,8/1,7
	Для R_{bf} : среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 5,09$ МПа	$M = 7,48$ МПа	$M = 7,6$ МПа	$M = 10,57$ МПа
	$\sigma = \pm 1,05$ МПа	$\sigma = \pm 0,71$ МПа	$\sigma = \pm 0,54$ МПа	$\sigma = \pm 0,61$ МПа
	$\nu = \pm 20,7$ %	$\nu = \pm 9,49$ %	$\nu = \pm 7,1$ %	$\nu = \pm 5,8$ %
	Расход портландцемента 289 кг/м ³ бетона			
2с	4,19	5,17/1,23	5,75/1,11	5,14/0,99
4с	2,43	3,13/1,29	4,18/1,34	5,12/1,22
6с	3,24	5,07/1,56	4,7/0,93	6,02/1,28
8с	1,58	3,12/1,97	4,18/1,34	5,4/1,29
10с	2,33	3,7/1,59	4,18/1,13	5,68/1,36
12с	1,31	3,76/2,87	3,4/0,9	4,12/1,21
14с	2,27	3,92/1,75	5,33/1,34	6,17/1,16
16с	1,6	3,4/2,12	3,14/0,92	3,6/1,15
	Для R_{bf} : среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 2,37$ МПа	$M = 4,31$ МПа	$M = 4,36$ МПа	$M = 5,16$ МПа
	$\sigma = \pm 0,961$ МПа	$\sigma = \pm 0,909$ МПа	$\sigma = \pm 0,885$ МПа	$\sigma = \pm 0,902$ МПа
	$\nu = \pm 40,5$ %	$\nu = \pm 21,2$ %	$\nu = \pm 20,3$ %	$\nu = \pm 17,5$ %
	Расход портландцемента 385 кг/м ³ бетона			
19с	3,92	6,1/1,55	3,92/0,64	10,29/2,62
20с	2,94	5,25/1,78	6,48/1,23	10,03/1,55
21с	3,29	5,07/1,54	4,99/0,98	8,05/1,61
22с	3,14	5,93/1,89	6,61/1,11	10,81/1,63
23с	3,92	5,58/1,42	5,64/1,01	9,26/1,64
24с	4,31	7,25/1,68	6,24/0,86	10,27/1,64
25с	3,44	5,85/1,7	4,96/0,85	10,29/2,07
	Для R_{bf} : среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 3,56$ МПа	$M = 5,86$ МПа	$M = 5,55$ МПа	$M = 9,71$ МПа
	$\sigma = \pm 0,495$ МПа	$\sigma = \pm 0,709$ МПа	$\sigma = \pm 0,909$ МПа	$\sigma = \pm 0,866$ МПа
	$\nu = \pm 13,9$ %	$\nu = \pm 12,1$ %	$\nu = \pm 16,4$ %	$\nu = \pm 8,92$ %

Вариационно-статистическая оценка качества параметров прочности $R_{сж}$ цементных композитов во времени на портландцементе марки М500-Д20 (ПО «Вольскцемент»)

Серия образцов	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа			
	Возраст бетона, t , сут.			
	1	28	90	6570
	Расход портландцемента 481 кг/м ³ бетона			
1В	48,0	60,65/1,26	67,3/1,11	88,77/1,32
3В	43,9	55,8/1,27	62,5/1,12	85,0/1,36
5В	47,95	61,75/1,29	70,0/1,13	91,6/1,31
7В	42,35	55,9/1,32	60,8/1,09	86,6/1,42
9В	39,91	62,4/1,56	68,3/1,09	98,4/1,44
11В	36,6	60,4/1,65	67,0/1,11	95,0/1,42
13В	30,8	60,5/1,96	65,7/1,09	102,0/1,55
15В	30,15	58,0/1,92	68,4/1,18	104,4/1,53
	Для $R_{сж}$: среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 40,0$ МПа	$M = 59,4$ МПа	$M = 66,2$ МПа	$M = 94,0$ МПа
	$\sigma = \pm 6,34$ МПа	$\sigma = \pm 2,55$ МПа	$\sigma = \pm 3,13$ МПа	$\sigma = \pm 7,18$ МПа
	$\nu = \pm 15,8$ %	$\nu = \pm 4,29$ %	$\nu = \pm 4,73$ %	$\nu = \pm 7,6$ %
	Расход портландцемента 289 кг/м ³ бетона			
2В	19,75	27,4/1,39	29,4/1,07	45,3/1,54
4В	17,45	22,8/1,3	25,2/1,1	33,9/1,34
6В	18,4	22,55/1,23	29,3/1,3	43,2/1,47
8В	16,7	23,0/1,38	23,2/1,01	26,6/1,15
10В	12,65	24,9/1,97	28,2/1,13	37,2/1,32
12В	12,0	24,0/2,0	26,7/1,11	44,9/1,68
14В	10,1	24,05/2,38	29,7/1,23	41,1/1,38
16В	9,2	23,4/2,54	28,0/1,2	40,0/1,43
	Для $R_{сж}$: среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 14,54$ МПа	$M = 24,0$ МПа	$M = 27,5$ МПа	$M = 39,0$ МПа
	$\sigma = \pm 4,0$ МПа	$\sigma = \pm 1,57$ МПа	$\sigma = \pm 2,29$ МПа	$\sigma = \pm 6,33$ МПа
	$\nu = \pm 27,7$ %	$\nu = \pm 6,5$ %	$\nu = \pm 8,34$ %	$\nu = \pm 16,2$ %
	Расход портландцемента 385 кг/м ³ бетона			
19В	22,44	42,95/1,91	48,3/1,12	64,8/1,34
20В	17,7	38,1/2,15	45,2/1,19	72,0/1,59
21В	23,35	43,5/1,86	51,9/1,19	94,9/1,83
22В	20,16	41,8/2,07	45,7/1,09	74,0/1,62
23В	22,75	40,3/1,77	44,6/1,11	75,0/1,68
24В	19,95	43,7/2,19	47,4/1,08	70,3/1,48
25В	25,1	44,05/1,75	49,8/1,13	82,6/1,66
	Для $R_{сж}$: среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 21,6$ МПа	$M = 42$ МПа	$M = 47,6$ МПа	$M = 76,2$ МПа
	$\sigma = \pm 2,5$ МПа	$\sigma = \pm 2,5$ МПа	$\sigma = \pm 2,65$ МПа	$\sigma = \pm 9,83$ МПа
	$\nu = \pm 11,5$ %	$\nu = \pm 5,1$ %	$\nu = \pm 5,57$ %	$\nu = \pm 12,9$ %

Вариационно-статистическая оценка качества параметров прочности $R_{сж}$ цементных композитов во времени на портландцементе марки М500-Д0 (ПО «Осколцемент»)

Серия образцов	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа			
	Возраст бетона, t , сут.			
	1	28	90	6570
	Расход портландцемента 481 кг/м ³ бетона			
1с	48,85	65,6/1,34	73,2/1,12	92,7/1,27
3с	35,9	52,95/1,47	59,7/1,13	82,2/1,38
5с	39,2	62,95/1,6	70,6/1,12	98,4/1,39
7с	26,5	50,05/1,89	59,6/1,19	86,2/1,45
9с	30,75	50,0/1,63	54,5/1,09	88,0/1,61
11с	23,4	43,8/1,87	58,0/1,19	76,8/1,48
13с	30,0	50,3/1,68	56,9/1,13	88,9/1,56
15с	21,73	41,75/1,92	50,1/1,2	89,4/1,78
	Для $R_{сж}$: среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 32$ МПа	$M = 53,4$ МПа	$M = 58,8$ МПа	$M = 87,8$ МПа
	$\sigma = \pm 9$ МПа	$\sigma = \pm 8,45$ МПа	$\sigma = \pm 8,12$ МПа	$\sigma = \pm 6,5$ МПа
	$\nu = \pm 28,1$ %	$\nu = \pm 15,8$ %	$\nu = \pm 13,8$ %	$\nu = \pm 7,4$ %
	Расход портландцемента 289 кг/м ³ бетона			
2с	17,86	27,15/1,52	30,3/1,12	44,6/1,47
4с	10,48	17,6/1,68	19,1/1,08	34,9/1,83
6с	12,96	26,15/2,02	31,2/1,19	41,2/1,32
8с	6,7	17,15/2,6	21,3/1,24	34,9/1,64
10с	10,2	21,15/2,07	23,2/1,1	38,9/1,68
12с	7,1	16,45/2,38	19,5/1,18	29,3/1,5
14с	9,65	19,4/2,01	24,7/1,27	39,4/1,6
16с	6,8	14,75/2,17	16,5/1,12	33,8/2,05
	Для $R_{сж}$: среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 10,22$ МПа	$M = 20$ МПа	$M = 23,2$ МПа	$M = 37,1$ МПа
	$\sigma = \pm 3,84$ МПа	$\sigma = \pm 4,54$ МПа	$\sigma = \pm 5,3$ МПа	$\sigma = \pm 4,83$ МПа
	$\nu = \pm 37,5$ %	$\nu = \pm 22,7$ %	$\nu = \pm 22,8$ %	$\nu = \pm 13,0$ %
	Расход портландцемента 385 кг/м ³ бетона			
19с	18,1	40,3/2,23	37,0/0,92	66,4/1,79
20с	16,35	29,3/1,79	40,1/1,37	73,6/1,83
21с	17,6	33,1/1,88	39,5/1,19	76,1/1,93
22с	14,65	32,17/2,19	38,0/1,18	79,4/2,09
23с	21,45	33,9/1,58	36,0/1,06	69,3/1,92
24с	18,7	40,05/2,14	48,5/1,21	72,1/1,49
25с	16,15	33,04/2,05	36,1/1,09	77,4/2,14
	Для $R_{сж}$: среднее арифметическое M , среднее квадратическое отклонение σ , вариационный коэффициент ν			
	$M = 17,6$ МПа	$M = 34,6$ МПа	$M = 39,3$ МПа	$M = 73,5$ МПа
	$\sigma = \pm 2,18$ МПа	$\sigma = \pm 4,11$ МПа	$\sigma = \pm 4,3$ МПа	$\sigma = \pm 4,56$ МПа
	$\nu = \pm 12,4$ %	$\nu = \pm 11,9$ %	$\nu = \pm 10,9$ %	$\nu = \pm 6,2$ %

Анализ результатов вариационно-статистической оценки качества параметров M , σ и ν для критериев R_{bf} и $R_{сж}$ в контрольные сроки ранней и поздней стадии структурообразования и твердения сравниваемых серий образцов, приведенных в табл. 3–6, дает дополнительную информацию для сравнения и оценки влияния минеральной добавки на основе опоки в Вольском ПЦ на формирование механических свойств цементных композитов в рассматриваемом диапазоне времени до 18 лет.

По результатам этой оценки механических свойств цементных композитов с учетом физико-химического воззрения на процессы структурообразования и твердения, предложенного нами в [9], следует отдать предпочтение образцам бетона на основе Вольского ПЦ М500-Д20.

Список литературы

1. Макридин, Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова. – М.: МГСУ, 2013. – 152 с.
2. Максимова, И.Н. Структура и конструкционная прочность цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – М.: Изд-во АСВ, 2017. – 400 с.
3. Кондращенко, В.И. Интегрированный подход в бетоноведении / В.И. Кондращенко // Строительные материалы. – 2022. – № 4. – С. 54–63.
4. Макридин, Н.И. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Ю.В. Полубарова // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 3. – С. 14–22.
5. Ярмаковский, В.Н. Физико-химические основы создания особо легких бетонов новых модификаций с высокими показателями теплотехнического качества / В.Н. Ярмаковский, Д.З. Кадиев // Строительные материалы. – 2022. – № 6. – С. 15–19.
6. Максимова, И.Н. О параметрах механического поведения горных пород с позиций структурной механики разрушения материалов / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Н.А. Егина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 2 (31). – С. 25–31.
7. Лесовик, В.С. Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композитов / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк, Ю.Л. Лисейцев, И.И. Панарин, В.В. Воронов // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 39–49.
8. Каприелов, С.С. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, И.А. Чилин // Строительные материалы. – 2022. – № 10. – С. 41–51.
9. Макридин, Н.И. Комплексная оценка критериев длительной прочности цементных композитов / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №3 (56). – С. 49–60.
10. Гениев, Г.А. Практический метод расчета длительной прочности бетона / Г.А. Гениев // Бетон и железобетон. – 1995. – № 4. – С. 25–27.

References

1. Makridin, N.I. Structural formation and structural strength of cement composites / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova. – M.: MGSU, 2013. – 152 p.
2. Maksimova, I.N. Structure and structural strength of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – M.: Publisher ASV, 2017. – 400 p.
3. Kondrashchenko, V.I. Integrated approach in concrete science / V.I. Kondrashchenko // Building materials. – 2022. – No. 4. – P. 54–63.
4. Makridin, N.I. Complex assessment of the quality parameters of the structure and mechanics of destruction of cement stone / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, Yu.V. Polubarova // Izvestiya of high schools. Building. – 2015. – No. 3. – P. 14–22.

5. Yarmakovskiy, V.N. Physico-chemical bases of creation of especially light concretes of new modifications with high indicators of thermal engineering quality / V.N. Yarmakovskiy, D.Z. Kadiev // *Building materials*. – 2022. – No. 6. – P. 15–19.
6. Maksimova, I.N. On the parameters of the mechanical behavior of rocks from the standpoint of structural mechanics of material destruction / I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin, N.A. Egina // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – No. 2 (31). – P. 25–31.
7. Lesovik, V.S. The influence of composition on the properties and structure of modified cement composites / V.S. Lesovik, R.S. Fedyuk, Yu.L. Liseitsev, I.I. Panarin, V.V. Voronov // *Building materials*. – 2022. – No. 9. – P. 39–49.
8. Kapriylov, S.S. Optimization of the parameters of concrete technology to ensure thermal crack resistance of massive foundations / S.S. Kapriylov, A.V. Sheinfeld, I.A. Chilin // *Building materials*. – 2022. – No. 10. – P. 41–51.
9. Makridin, N.I. Comprehensive assessment of criteria for long-term strength of cement composites / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – No. 3 (56). – P. 49–60.
10. Geniev, G.A. Practical method for calculating the long-term strength of concrete / G.A. Geniev // *Concrete and Reinforced Concrete*. – 1995. – No. 4. – P. 25–27.

УДК 666.91

DOI 10.54734/20722958_2024_1_82

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

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

Левицкая Ксения Михайловна,
младший научный сотрудник лаборатории
перспективных материалов и технологий
Белгородского государственного
национального исследовательского
университета, аспирант кафедры
«Строительное материаловедение,
изделия и конструкции»
E-mail: levickayalevickaya@gmail.com,

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

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д.26

Бурьянов Александр Федорович,
доктор технических наук, доцент,
консультант кафедры «Строительное
материаловедение»
E-mail: rga-service@mail.ru

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

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.

Levickaya Ksenia Mikhailovna,
Junior Research Associate of the Laboratory of
Advanced Materials and Technologies of
Belgorod National Research University,
Postgraduate student of the Department
«Building Materials, Products and Designs»
E-mail: levickayalevickaya@gmail.com,

Alfimova Natalya Ivanovna,
Candidate of Sciences, Assistant professor of
the Department «Building Materials, Products
and Designs»
E-mail: alfimovan@mail.ru,

*National Research Moscow State University
of Civil Engineering*

Russia, 129337, Moscow,
26, Yaroslavskoye shosse

Buryanov Aleksander Fedorovich,
Doctor of Sciences, Associate Professor,
Consultant of the Department «Building
Materials Science»
E-mail: rga-service@mail.ru

Исследование выполнено в рамках государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме «Разработка научных и технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий», FZWG-2021-0017.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОСФОГИПСА КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ

К.М. Левицкая, Н.И. Алфимова, А.Ф. Бурьянов

Фосфогипс является побочным продуктом производства фосфорной кислоты. В связи с тем, что мировые накопленные объемы данного отхода очень велики, возникает вопрос о поисках путей его утилизации. Исходя из того, что данный отход представляет собой дигидрат сульфата кальция, его можно рассматривать как альтернативы природному гипсовому камню. В данной статье обобщен мировой научный опыт использования фосфогипса в качестве сырья для производства однокомпонентных вяжущих различного твердения, сделаны выводы об основных тенденциях и полученных в исследованиях результатах.

Ключевые слова: фосфогипс, гипсовые вяжущие, ангидрит, переработка

The work was realized under support of the State Assignment for the creation of new laboratories in 2021, including under the guidance of young promising researchers of the national project "Science and Universities", research title is "Development of scientific and technological foundations for the creation of an integrated technology for processing gypsum-containing waste from various industrial enterprises", FZWG-2021-0017.

USE OF PHOSPHOGYPSUM AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF ONE-COMPONENT BINDERS

K.M. Levickaya, N.I. Alfimova, A.F. Buryanov

Phosphogypsum is a by-product of phosphoric acid production. The world's accumulated volumes of this waste are very large, so the question of finding ways to dispose it arises. Based on the fact that this waste is calcium sulfate dihydrate, it can be considered as an alternative to natural gypsum stone. This article summarizes the world scientific experience of using phosphogypsum as a raw material for one-component binders with various types of hardening; conclusions are made about the main trends and the results obtained in the studies.

Keywords: phosphogypsum, gypsum binders, anhydrite, processing

Введение. Вопросы рационального природопользования, в основе которых лежит поиск способов утилизации и направлений повторного использования отходов промышленности, являются приоритетными для всего мирового научного сообщества. Фосфогипс (ФГ) является одним из наиболее крупнотоннажных отходов производства ортофосфорной кислоты и фосфатных удобрений из фосфатной породы: ежегодно в мире образуется порядка 300 млн т данного отхода, при этом только 14 % утилизируется, остальные объемы либо складировываются, либо сбрасываются в водоемы, нанося ущерб окружающей среде [1–4].

Фосфогипс по минеральному составу представляет собой дигидрат сульфата кальция и может рассматриваться в качестве альтернативы природному гипсовому камню. Однако несмотря на очевидный потенциал, широкомасштабность переработки ФГ сдерживается невозможностью получения с помощью традиционных режимов и оборудования качественных гипсовых вяжущих и, как следствие, изделий на их основе. Это обусловлено особенностями данного сырья: непостоянством вещественного состава, дисперсностью, повышенной влажностью, которые предопределяются генезисом исходного сырья (фосфатной породы) и способом производства фосфорной кислоты [4, 5].

Фосфатная порода – это минеральное сырье, в состав которого входит фосфор. Она используется для производства фосфорной кислоты, которая, в свою очередь, является основным ингредиентом удобрений. Фосфатная порода в основном встречается в морских осадочных отложениях, магматических породах и гуано. Примерно 75 % мировых ресурсов фосфатов приходится на осадочные морские отложения, 20–25 % – на магматические, метаморфические и выветрелые отложения, 2–3 % – на биогенные отложения (скопления гуано птиц и летучих мышей) [6–10]. Крупнейшие осадочные месторождения находятся в Северной Африке, на Ближнем Востоке, в Китае и США, значительные магматические – в Бразилии, Канаде, Финляндии, России и Южной Африке [11]. Гуано, несмотря на высокое содержание фосфатов, не может использоваться в глобальном масштабе, поскольку его объемы достаточно ограничены [4].

Существует два основных способа получения фосфорной кислоты из фосфатной руды [12]:

- мокрый способ (фосфорная кислота получается путем разложения фосфатов под действием сильных минеральных кислот);
- сухой способ (при нагреве в печи фосфор, содержащийся в породе, переходит в паровой поток с образованием путем гидратации на воздухе пятиоксида фосфора).

Наиболее распространенным из вышеперечисленных является мокрый способ [4, 12, 13]: данным способом производится порядка 90 % фосфорной кислоты; по сравнению с сухим способом мокрый отличается меньшими энергозатратами и стоимостью [14].

Добыча и переработка фосфатов (табл. 1) осуществляются во многих странах [11, 15–17]. Наиболее крупными производителями являются Китай, Марокко и США, по данным за 2022 год их доля в общемировом объеме добычи фосфатов составляет 38,6 % (85 млн т) 17,3 % (38 млн т) и 10 % (22 млн т) соответственно. Россия по объемам добычи фосфатной руды занимает четвертое место – 13 млн т (6,4 % от общемировой добычи) [17].

Т а б л и ц а 1

Добыча фосфатов в мире (млн т) по годам

№ п.п.	Страна*	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
1	Китай	120,000	95,000	90,000	90,000	85,000
2	Марокко и Западная Сахара	34,800	35,500	37,000	38,100	40,000
3	США	25,800	23,300	24,000	21,600	21,000
4	Россия	14,000	13,100	13,000	14,000	13,000
5	Иордания	8,020	9,220	9,200	10,000	10,000
6	Саудовская Аравия	6,090	6,500	6,500	9,200	9,000
7	Бразилия	5,740	4,700	5,500	6,000	5,500
8	Египет	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
9	Вьетнам	3,300	4,650	4,700	4,500	4,500
10	Перу	3,900	4,000	4,000	4,200	4,200
11	Тунис	3,340	4,110	4,000	3,730	4,000
12	Сенегал	1,650	3,420	3,500	2,430	3,000
13	Израиль	3,550	2,810	2,800	2,100	2,600
14	Австралия	2,800	2,700	2,700	2,500	2,500
15	Южная Африка	2,100	2,100	2,100	2,130	1,600
16	Алжир	1,200	1,300	1,300	1,400	1,800
17	Казахстан	1,300	1,500	1,500	1,500	1,500
18	Того	0,800	0,800	0,800	1,000	1,500
19	Индия	1,600	1,480	1,500	1,400	1,400
20	Финляндия	0,989	0,995	1,000	0,900	1,000
21	Узбекистан	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900
22	Турция	–	–	0,600	0,900	0,800
23	Мексика	1,540	0,558	0,600	0,488	0,450
24	Сирия	0,100	2,000	–	–	–
25	Другие страны	1,070	0,870	1,000	1,950	1,600

*Страны выставлены в порядке убывания объема добычи фосфатной породы по данным за 2022 г.

Одним из наиболее перспективных направлений, которое может позволить утилизировать ФГ в больших объемах, является производство гипсовых вяжущих и изделий на его основе, в связи с чем нами были проведены анализ и обобщение научных исследований в области использования фосфогипса в качестве сырья для производства однокомпонентных вяжущих (α -, β -модификации, ангидрит, эстих-гипс).

Методология. Литературный обзор проводился путем обработки, анализа и общения данных из открытых источников, представленных на портале научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU и в классических полнотекстовых журналах издательства Elsevier на платформе ScienceDirect за 2000–2023 годы. В анализ не включались статьи, в тексте которых отсутствовали данные, затрудняющие оценку полученных результатов.

С целью выявления географии исследований в обязательном порядке фиксировался источник, откуда был получен фосфогипс, – предприятие (при наличии), город, регион, страна. В случае, если источник фосфогипса не был обозначен в тексте статьи, указывалась страна организации, с которой аффилировались авторы исследования.

Основная часть. Фосфогипс, как и природный гипс, можно рассматривать в качестве сырья для производства однокомпонентных вяжущих (α -, β -полугидрата,

ангидрита), однако особенности фосфогипса (наличие примесей, высокая дисперсность, влажность и прочие) определяют использование нетрадиционных технологических решений, отличных от стандартных, применяемых при изготовлении вяжущих из природного гипсового камня.

Гипсовые вяжущие α -модификации

Анализ литературных источников показал, что производство высокопрочного гипсового вяжущего α -модификации осуществляется путем синтеза в солевых растворах (Na_2SO_4 , CaCl_2 , H_3PO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) при температурах от 80 до 98 °С, для ускорения и обеспечения синтеза кристаллов необходимой морфологии используются различные модификаторы (малеиновая кислота, L-аспарагиновая кислота, цитрат натрия, сукцинат натрия) [18–28]. Сущность процесса состоит в следующем: раствор солей и модификатора предварительно нагревается на паровой бане, после чего к нему добавляется заданное количество фосфогипса и температура суспензии доводится до заданного значения (80–98 °С); затем осуществляется перемешивание суспензии с заданной скоростью, протекает реакция дегидратации, далее с определенными временными промежутками осуществляется отбор суспензии и фильтрация. Полученный осадок трижды промывается кипящей водой и обрабатывается чистым этанолом, после чего отправляется на сушку в шкаф.

Вяжущее, полученное данным способом, имеет предел прочности на изгиб 1,5–10,7 МПа и предел прочности при сжатии 6–38,3 МПа. Помимо использования модификаторов повысить качество конечного продукта позволяет предварительное удаление из фосфогипса примесей различными методами [18, 24] (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Условия синтеза α -полугидрата в растворах солей и его свойства

Местоположение источника фосфогипса	Условия синтеза	Механические свойства	Источник информации
1	2	3	4
Wengfu Group Co., Ltd. и Kailin Group Co., Ltd Провинция Гуйчжоу, Китай	Раствор H_3PO_4 Температура синтеза – до 98 °С Название используемого модификатора не указано	Прочность на изгиб 4,96–6,48 МПа Прочность на сжатие 29,9–50,8 МПа	[18]
Yihua Fertiliser Co., Ltd Ичан, провинция Хубэй, Китай	Раствор CaCl_2 Контроль pH Температура синтеза – 95 °С	Прочность на изгиб 4,1 МПа Прочность на сжатие 29,2 МПа	[19]
Yunan Phosphate Chemical Group Провинция Юньнань, Китай	Раствор H_2SO_4 и/или Na_2SO_4 Модификатор α -полугидрата, полученные из гипса десульфурации дымовых газов Температура синтеза – до 98 °С	Изучались технологии удаления примесей и одновременного получения α -полугидрата из ФГ посредством фазового превращения с помощью затравки	[20]
Xinyangfeng Fertilizer Co., Ltd провинция Хубэй, Китай	Раствор CaCl_2 + Модификатор – цитрат натрия Температура синтеза – до 98 °С	Прочность на сжатие 15–39 МПа	[21]
Источник не указан Провинция Гуйчжоу, Китай	Раствор NaCl и CaCl_2 Модификатор – кислый фталат калия Температура синтеза – до 96 °С	Изучалось влияние модификатора на процессы синтеза	[22]

1	2	3	4
Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd Шанхай, Китай	Раствор CaCl_2 + Модификатор – L-аспарагиновая кислота Температура синтеза – 95 °С	Прочность на изгиб 6,2–10,7 МПа Прочность на сжатие 13,1–30,2 МПа	[23]
Источник не указан Провинция Гуйчжоу, Китай	Раствор Na_2SO_4 в гли- церине аналитической чистоты ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) Модификатор – лимонная кислота Температура синтеза – 98 °С	Изучалось влияние условий синтеза на процессы кристалло- образования	[24]
Yihua Fertiliser Co., Ltd Ичан, провинция Хубэй, Китай	Раствор CaCl_2 + Модификатор – сукцинат натрия Температура синтеза – 80 °С	Прочность на изгиб 4,2–5,1 МПа Прочность на сжатие 27,3–41,2 МПа	[25]
Yihua Fertiliser Co., Ltd Ичан, провинция Хубэй, Китай	Предварительная очистка ФГ « HCl – H_2SO_4 метод» Раствор CaCl_2 + Модификатор – цитрат натрия Температура синтеза – 97°С	Прочность на изгиб 8,2 МПа Прочность на сжатие 38,3 МПа	[26]
Источник не указан Китай	Раствор $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ Модификатор – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ Температура синтеза – 97 °С	Прочность на изгиб 11,3 МПа Прочность на сжатие 41,7 МПа	[27]
Источник не указан Провинция Гуйчжоу, Китай	Раствор Na_2SO_4 Модификаторы: CaO и малеиновая кислота ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$) Температура синтеза – 85, 90, 95 и 97 °С	Исследовано влияние концентрации и температуры на форму кристаллов	[28]

Несмотря на высокие физико-механические характеристики получаемого данным способом вяжущего, к его недостаткам нужно отнести потребность в большом количестве химических реагентов и, как следствие, образование вторичных отходов, необходимость в специальном оборудовании, а также жесткий контроль на всех стадиях процесса, что делает его крайне сложным для исполнения в условиях реального производства. Также необходимо отметить, что данный способ синтеза рассматривается только в Китае.

В качестве способа получения высокопрочного вяжущего α -модификации из фосфогипса рассматривается также синтез при повышенных атмосферном давлении и температуре (*автоклавная обработка*) [29–34]. В частности, в работе [29] описано получение из фосфогипса, взятого с Воскресенского завода минеральных удобрений (г. Воскресенск, Россия), вяжущего с пределом прочности при сжатии 12 МПа, при этом использование пластификатора СЗ в количестве 0,5–1 % позволило повысить его прочность до 17,6–21 МПа. Использование различного рода модификаторов (тартрата калия-натрия, янтарной кислоты, сульфата калия, сульфата алюминия, сукцината

натрия, цитрата калия) [33, 34], оказывающих положительное влияние на морфологию кристаллов при синтезе в автоклавах, позволяет получить вяжущее с пределом прочности на изгиб более 4,5 МПа и при сжатии – более 30 МПа [33].

Исследования, направленные на изучение возможности получения α -полугидрата из фосфогипса при повышенных атмосферном давлении и температуре, проводились только российскими, белорусскими и китайскими учёными. Количество данных исследований крайне ограничено, что, вероятнее всего, связано с высокими энергетическими затратами, длительностью процесса и необходимостью приобретения и обслуживания автоклавов.

Также синтез α -полугидрата возможен *гидротермальным методом*, суть которого заключалась в том, что в очищенный от примесей путем промывки и просеянный фосфогипс (с завода по производству удобрений в г. Цзиюань провинции Хэнань, Китай) в массовом соотношении 1:5 добавляли в деионизированную воду и хорошо перемешивали. Синтез α -полугидрата протекал при скорости перемешивания 300 об/мин и температуре реакции 130 °С в течение 4 часов. После завершения реакции продукт извлекали и подвергали механическому обезвоживанию, а затем вымачивали в спирте для прекращения его гидратации. Далее осуществлялась сушка α -полугидрата в сушильном шкафу при 50 ± 5 °С. Полученное вяжущее отличалось низкими значениями прочности при сжатии, однако использование модификатора – янтарной кислоты (концентрация 4 мМ) позволило повысить данный показатель до 27,4 МПа [35].

Гипсовые вяжущие β -модификации

Обжиг при температуре до 120–200 °С является основным способом получения гипсовых вяжущих β -модификации, которые отличаются повышенной водопотребностью и, как следствие, невысокой прочностью (8–10 МПа). Использование различных пластификаторов позволяет снизить количество воды затворения и повысить прочность до 29 МПа [36–45]. Также зачастую требуется использование добавок, регулирующих (замедляющих) сроки схватывания. Повысить качество конечного продукта можно с помощью предварительной промывки фосфогипса и его помола после обжига или предварительного прессования при повышенных давлениях.

В отличие от метода солевых растворов, который изучался только в Китае, обжиг как способ получения вяжущих из фосфогипса имеет более широкую географию (Россия, Беларусь, Китай, Бразилия, Литва, США) (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Синтез β -полугидрата путем обжига и его свойства

Местоположение источника	Способ и условия синтеза	Механические свойства	Источник информации
1	2	3	4
Источник не указан Китай	Температура обжига 100 °С, 140 °С, 180 °С, 220 °С Длительность – 4 ч	Прочность на сжатие 9,15 МПа	[36]
Источник не указан Китай	Промыв, обжиг при температуре 180°С помол до удельной по- верхности – 451–709 м ² /кг Введение суперпластификатора	Прочность на изгиб 3,1–4 МПа Прочность на сжатие 8,5–11,7 МПа Прочности на сжатие до 20 МПа Прочность на изгиб свыше 7 МПа	[37]

1	2	3	4
Yihua Fertilizer Industry Co., Ltd Провинция Хубэй, Китай	Температура обжига – 150, 200, 300, 400 °С Длительность обжига – 3 ч	Прочность на изгиб 3–3,8 МПа Прочность на сжатие 10,3–13,8 МПа –	[38]
Yihua Group Co., Ltd., Китай Провинция Хубэй, Китай	Температура обжига – 150–160 °С	Прочности на сжатие 10,8 МПа	[39]
Завод удобрений Yihua Fertilizer Inc. Провинция Хубэй, Китай	Температура обжига – 160 °С	Прочности на изгиб 4,4 МПа Прочности на сжатие 13,6 МПа	[40]
Завод удобрений Уберабы, Штат Минас-Жерайс, Бразилия	Температура обжига: 120 °С, 150 °С, 200 °С Длительность обжига: 1 ч, 2 ч, 5 ч	Изучается содержание полугидрата в смеси и энергоёмкость процесса	[41]
AB Lifosa Литва	Температура обжига: 100–180 °С	Прочность на сжатие (14 сут.) с пластификатором на основе канифольной смолы до 29 МПа	[42]
Источник не указан Анклешваре, штат Гуджарат, Индия	Температура обжига: 150–160 °С Длительность обжига – 4 ч	Прочности на сжатие 8 МПа При использовании суперпластификаторов (конденсат сульфированного нафталинформальдегида, поликарбонный эфир) до ≈16 МПа	[43]
ООО «Балаковские минеральные удобрения» Балаково, Россия	Температура обжига – 180 °С	Прочности на сжатие 4 МПа	[44]
ОАО «Воскресенские минудобрения» Воскресенск, Россия	Предварительное прессование при давлении до 300 МПа Обжиг (температура не указана) Вторичное прессование при давлении до 300 МПа	Прочность на сжатие ≈4,5 МПа После вторичного прессования ≈7,2 МПа	[45]

Ангидритовые вяжущие

К ангидритовым вяжущим веществам относится собственно ангидритовое вяжущее (или цемент) и высокообжиговый гипс (эстрих-гипс), данный вид вяжущего является гидравлическим и набирает прочность в течение 28 суток. Ангидритовый цемент получают путем помола с активаторами твердения природного ангидрита или обожжённого при температуре 600–700 °С двугидрата. Эстрих-гипс – путем обжига при температуре 800–1000 °С двугидрата и его последующего помола, при этом активатор твердения (СаО) в количестве 2–3 % образуется в процессе обжига при разложении

сульфата и карбоната кальция [46]. Анализ литературных источников показал, что понятие «эстрих-гипс» в зарубежной литературе отсутствует, а в отечественной используется крайне редко; зачастую вяжущие, полученные из дигидрата сульфата кальция путем обжига при температуре более 500 °С, называются ангидритовыми.

Ангидритовое вяжущее из фосфогипса в основном также получают путем *обжига* при температуре 500–1100 °С. Прочность при сжатии такого вяжущего лежит в широких пределах – от 9,5 до 55 МПа (табл. 4) [47–56]. Существенному повышению прочности вяжущего способствует использование различных модификаторов и механоактивации [47], также положительное влияние на качество конечного продукта оказывает предварительная очистка ФГ от примесей.

Т а б л и ц а 4

Синтез ангидритового вяжущего путем прокаливания и его свойства

Местоположение источника фосфогипса	Температура и длительность обжига	Модификатор	Значение прочности в возрасте 28 суток	Источник информации
1	2	3	4	5
Yihua Fertilizer Industry Co., Ltd Провинция Хубэй, Китай	800 °С 3 ч	H_3PO_4 $Ca(H_2PO_4) \cdot H_2O$	Прочность на изгиб 4,7–5,3 МПа Прочность на сжатие 14,6–16,8 МПа	[47]
Yihua Fertilizer Industry Co., Ltd Провинция Хубэй, Китай	500, 600, 700, 800 °С 3 ч	–	Прочность на изгиб 0,9–6,1 МПа Прочность на сжатие 1,83–17,1 МПа	[38]
Источник не указан Россия	900, 1000 °С длительность не указана	Ускоритель K_2SO_4 Melflux 5581F (Melflux) на основе полиэфиркарбоксилата и Melment F 15G (Melment) на основе сульфомеламинформальдегида	Прочность на сжатие 10–55 МПа	[48]
ООО «Балаковские минеральные удобрения» Балаково, Россия	800 °С 900 °С 1000 °С длительность не указана	–	Прочность на сжатие 9,5 МПа 38 МПа 55 МПа	[49]
ОАО «Воскресенские минудобрения» Воскресенск, Россия	900 °С длительность не указана	–	Прочность на сжатие 10 МПа	[50]
ОАО «Воскресенские минудобрения» Воскресенск, Россия	960 °С 3 ч	Фторида кальция и CaO Дополнительный помол	Прочность на сжатие 40 МПа 50 МПа	[51]

1	2	3	4	5
ОАО «Воскресенские минудобрения» Воскресенск, Россия	1000 °С длительность не указана	СаО	Прочность на сжатие 40 МПа	[52]
АВ Lifosa Кедайний, Литва	800°С, 900°С 30 мин	Пыль вагранки (отходы производ- ства стекловаты) Молотый бой зеленого стекла Глина	Максимальная прочность на сжатие 30,74 МПа	[53]
ОАО «Гомельский химический завод» Гомель, Республика Беларусь	800–1000 °С 20 мин	Железосодержащие хвосты (0–20 %) СаО	Прочность на сжатие 30–38 МПа	[54]
ОАО «Гомельский химический завод» Гомель, Республика Беларусь	1100 °С длительность не указана	Содовый плав (2 %) Кремнегель (1 %) Сульфат алюминия (0,5 %) Фторид натрия (1 %) Фторид натрия (2 %) Сульфат алюминия (0,5 %) + Фторид натрия (1 %) –	Прочность на сжатие 27 МПа 19 МПа 36,5 МПа 52,5 МПа 30,4 МПа 37,4 МПа 10,1 МПа	[55]
Southern Petrochemical Industries Тутикорин, Индия	500–1000 °С 4 ч	(NH ₄) ₂ SO ₄ (1–3 %) Ca(OH) ₂ (3 %) + CaCl ₂ (0,5 %) + Na ₂ SO ₄ (2 %) Ca(OH) ₂ (3 %) + CaCl ₂ (0,5 %) + Na ₂ SO ₄ (2 %) K ₂ Cr ₂ O ₇ (1 %) + K ₂ SO ₄ (1 %) Na ₂ SO ₄ (1,5 %) + FeSO ₄ (0,5 %)	Прочность на сжатие 24,3–27,2 МПа 37,2 МПа 36,0 МПа 32,9 МПа 38,9 МПа	[56]

Помимо обжига, ангидритовые вяжущие можно получить в автоклавах при определенных режимах. В исследовании [31] авторами было установлено, что обработка фосфогипса (г. Сянфань провинции Хубэй, Китай) при температуре 180 °С и давлении пара 0,80 МПа в течение 8 часов способствует образованию ангидрита.

Также на базе Белгородского государственного технологического университета им В.Г. Шухова разработана технология получения ангидритового вяжущего путем обработки фосфогипса (г. Гебес, Тунис) серной кислотой с последующей нейтрализацией ее СаО. Авторы отмечают, что в зависимости от условий получаемое вяжущее может быть многофазным и состоять не только из ангидрита, но и полугидрата сульфата

кальция (CaSO_4 – 6,3–100 %; $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ – 0–21,1 %). Предел прочности при сжатии полученного таким способом вяжущего составляет 6–10 МПа, на изгиб – 1,5–2,5 МПа [56].

Выводы. Проведенный анализ литературных источников позволил сделать следующие выводы:

1. Исследования, связанные с рассмотрением возможности использования фосфогипса в качестве сырья для производства различных вяжущих, в основном осуществляются в странах, где есть проблема накопления данного отхода (Китай, Россия, Беларусь, Марокко, Индия, Тунис и т.д.). Наибольшее количество исследований сделано китайскими учеными, что является закономерным и обусловлено в первую очередь тем, что Китай по объемам добычи фосфатов занимает первое место в мире и проблема поисков путей утилизации ФГ для данной страны имеет приоритетное значение.

2. Наиболее распространёнными способами получения α -полугидрата из фосфогипса являются метод солевых растворов и автоклавная обработка. Оба способа позволяют получить вяжущее с высокими механическими характеристиками, однако имеют ряд недостатков. К недостаткам метода солевых растворов можно отнести: необходимость в химических реагентах; поиск решений вопросов, связанных с утилизацией вторичных отходов; сложность самого процесса, связанная с необходимостью проведения пооперационного контроля. К недостаткам метода автоклавной обработки можно отнести: необходимость в приобретении автоклавов, длительность и энергоёмкость процесса.

3. География исследований, направленных на рассмотрение вопроса получения гипсового вяжущего β -модификации из фосфогипса самая широкая, что, вероятно всего, связано с простотой технологии и доступностью оборудования.

4. Ангидритовые вяжущие получают в основном путем прокаливания фосфогипса при температуре 500–1100 °С, однако существует ряд исследований, в которых данный вид вяжущего получают в автоклавах (при определенных режимах) или путем воздействия раствора серной кислоты. Основная доля публикаций по данному направлению приходится на российских и белорусских исследователей.

5. Вне зависимости от вида получаемого вяжущего предварительная очистка фосфогипса от примесей путем промывки, прокаливания или обработки специальными растворами способствует повышению качества конечного продукта.

Благодарности. Исследование выполнено при административной поддержке Научно-образовательного центра мирового уровня «Инновационные решения в АПК» (г. Белгород).

This work was realized under the administrative support of the Belgorod Scientific and Educational Center of the world-level «Innovative Solutions in the Agricultural Sector».

Список литературы

1. One-step wet-process phosphoric acid by-product CaSO_4 and its purification / K. Fang, L. Xu, M. Yang [et al.] // Separation and Purification Technology. – 2023. – Vol. 309. – 123048. – DOI:10.1016/j.seppur.2022.123048.
2. Rashad, A.M. Phosphogypsum as a construction material / A.M. Rashad // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743. – DOI:10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
3. Иващенко, Т.Г. Фосфоритный фосфогипс: свойства, основные направления переработки и эколого-гигиеническая оценка / Т.Г. Иващенко, И.П. Крайнов // Экология и промышленность. – 2009. – №1(18). – С.59–64.
4. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide / E. Bilal, H. Bellefqih, V. Bourcier [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 414. – 137561. – DOI:10.1016/j.jclepro.2023.137561.
5. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств / Н.И. Алфимова, С.Ю. Пириева, М.Ю. Елистраткин [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 11. – С. 8–23. – DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23

6. Abouzeid, A.-Z.M. Physical and thermal treatment of phosphate ores – An overview / A.-Z.M. Abouzeid // *International Journal of Mineral Processing*. – 2008. – Vol. 85(40). – P. 59–84. – DOI:10.1016/j.minpro.2007.09.001.
7. Pufahl, P.K. Sedimentary and igneous phosphate deposits : formation and exploration: an invited paper / P.K. Pufahl, L.A. Groat // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112. – P. 483–516. – DOI:10.2113/econgeo.112.3.483.
8. Straaten, P.V. Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa / P.V. Straaten (CD). – ICRAF, Nairobi, Kenya, 2002. – 338p.
9. Manning, D.A.C. Phosphate minerals, environmental pollution and sustainable agriculture / D.A.C. Manning // *Elements*. – 2008. – Vol. 4. – P. 105–108. – DOI:10.2113/GSELEMENTS.4.2.105.
10. Straaten, P.V. Agrogeology, The Use of Rocks for Crops / P.V. Straaten. – *Enviroquest* (pub.), (Chapter 4), 2007. – P. 87–164.
11. Mineral Commodity Summaries, 2022. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – P. 124–125. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
12. Da Silva, G.A. Environmental performance comparison of wet and thermal routes for phosphate fertilizer production using LCA – A Brazilian experience / G.A. da Silva, L.A. Kulay // *Journal of Cleaner Production*. – 2005. – Vol. 13(13–14). – P. 1321–1325. – DOI:10.1016/j.jclepro.2005.05.004.
13. Application prospect of advanced oxidation technology in wet process phosphoric acid production / X. Liu, F. Wu, G. Qu [et al.] // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10(6). – 108868. – DOI:10.1016/j.jece.2022.108868.
14. Acid stable layer-by-layer nanofiltration membranes for phosphoric acid purification / S. Xu, R. He, C. Dong [et al.] // *Journal of Membrane Science*. – 2022. – Vol. 644. – 120090. – DOI:10.1016/j.memsci.2021.120090.
15. Mineral Commodity Summaries, 2020. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – P. 122–123. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2020.pdf>
16. Mineral Commodity Summaries, 2021. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – P. 122–123. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
17. Mineral Commodity Summaries, 2023. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – P. 132–133. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>
18. Chen, L. Utilization of phosphogypsum to synthesize α -hemihydrate gypsum in $H_3PO_4-H_2O$ solution / L. Chen, L. Yang, J. Cao // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 368. – 130453. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130453
19. Recycling of waste gypsum from α -hemihydrate phosphogypsum: Based on the atmospheric hydrothermal process / Z. Jin, C. Cui, Z. Xu [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 377. – 131136. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.131136
20. Efficient removal of impurities from phosphogypsum during preparation of α -hemihydrate gypsum / Q. Guan, Y. Zhou, W. Yu [et al.] // *Minerals Engineering*. – 2023. – Vol. 201. – 108203. – DOI:10.1016/j.mineng.2023.108203
21. Properties of β -HPG pastes in the presence of α -HPG prepared from phosphogypsum / H. Qi, B. Ma, H. Tan [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 334. – 127414. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.127414.
22. Li, X. Conversion of phosphogypsum into α -hemihydrate in the presence of potassium acid phthalate and Ca^{2+} : Experimental and DFT studies / X. Li, W. Gao // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2022. – Vol. 652. – 129906. – DOI:10.1016/j.colsurfa.2022.129906.
23. L-aspartic acid: A crystal modifier for preparation of hemihydrate from phosphogypsum in $CaCl_2$ solution / X. Li, Q. Zhang, Z. Shen [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2019. – Vol. 511. – P. 48–55. – DOI:10.1016/j.jcrysgro.2019.01.027
24. Li, X. Preparation of α -hemihydrate gypsum from phosphogypsum in glycerol and Na_2SO_4 mixed solutions under atmospheric pressure / X. Li, Y. He // *Journal of Crystal Growth*. – 2021. – Vol. 568–569. – 126184. – DOI:10.1016/j.jcrysgro.2021.126184.

25. Preparation of α -hemihydrate gypsum from phosphogypsum in recycling CaCl_2 solution / W. Lu, B. Ma, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 214. – Pp. 399–412. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.148
26. Synthesis of α -hemihydrate gypsum from cleaner phosphogypsum / B. Ma, W. Lu, Y. Su [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 195. – P.396–405. – DOI:10.1016/j.jclepro.2018.05.228
27. Mi, Y. Utilization of phosphogypsum for the preparation of α -calcium sulfate hemihydrate in chloride-free solution under atmospheric pressure / Y. Mi, D. Chen, S. Wang // *Journal Chemical Technology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 93 (8). – P. 2371–2379. – DOI:10.1002/jctb.5584
28. Insight into the effect of maleic acid on the preparation of α -hemihydrate gypsum from phosphogypsum in Na_2SO_4 solution / X. Li, Q. Zhang, B. Ke [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2018. – Vol. 493. – P. 34–40. – DOI:10.1016/j.jcrysro.2018.04.025
29. Сучков, В.П. Микроскопические исследования процесса перекристаллизации фосфогипса / В.П. Сучков, А.Е. Коршунов, А.А. Мольков // *Альманах мировой науки*. – 2015. – № 1–4(1). – С. 119–121.
30. Сапелин, Н.А. Получение гипсового вяжущего α -модификации из природного сырья и фосфогипса / Н.А. Сапелин, В.Н. Хохлов // *Сухие строительные смеси*. – 2011. – №6. – С. 25–27.
31. Preparation of load-bearing building materials from autoclaved phosphogypsum / J. Yang, W. Liu, L. Zhang [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23. – P. 687–693. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.02.011.
32. Губская, А.Г. Производство гипсового вяжущего и изделий из природного и техногенного сырья в Республике Беларусь / А.Г. Губская, Е.Я. Подлuzский, В.С. Меленько // *Строительные материалы*. – 2008. – №3. – С. 73–75.
33. Effect of modifiers on crystalizing habit and mechanical strength of α -hemihydrate gypsum prepared from PG by an autoclaved method / D. Liu, Q. Wang, G. Xu [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 366. – 130114. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130114.
34. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders / M. Garg, N. Jain, M. Singh // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23(10). – P. 3138–3143. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.024.
35. Effect of succinic acid on the preparation of α -HH and its hydration properties / M. Gou, J. Zhao, L. Zhou [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2023. – Vol. 617. – 127286. – DOI: 10.1016/j.jcrysro.2023.127286.
36. Influence of calcination and GGBS addition in preparing β -hemihydrate synthetic gypsum from phosphogypsum / L. Zhang, K.H. Mo, T.H. Tan [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – e02259. – DOI:10.1016/j.cscm.2023.e02259
37. Study on physical and chemical characteristics of β -hemihydrate phosphogypsum / X. Chen, Y. Liu, Q. Wu [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – Vol. 17. – e01461. – DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01461.
38. Recycling of phosphogypsum to prepare gypsum plaster: Effect of calcination temperature / W. Cao, W. Yi, J. Peng [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – Vol. 45. – 103511. – DOI:10.1016/j.jobee.2021.103511.
39. Preparation of eco-friendly lightweight gypsum: Use of beta-hemihydrate phosphogypsum and expanded polystyrene particles / Z. Jin, B. Ma, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 297. – 123837. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123837.
40. Utilization of hemihydrate phosphogypsum for the preparation of porous sound absorbing material / B. Ma, Z. Jin, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 234. – 117346. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117346
41. Calcination parameters on phosphogypsum waste recycling / R.H. Geraldo, A.R.D. Costa, J. Kanai [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 256. – 119406. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119406

42. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste / G. Bumanis, J. Zorica, D. Bajare [et al.] // *Energy Procedia*. – 2018. – Vol. 147. – P. 301–308. – DOI:10.1016/j.egypro.2018.07.096
43. Garg, M. Modifications in water resistance and engineering properties of β -calcium sulphate hemihydrate plaster-superplasticizer blends / M. Garg, A. Pundir, R. Singh // *Materials and Structures*. – 2016. – Vol. 49. – P. 3253–3263. – DOI:10.1617/s11527-015-0717-0
44. Зависимости прочности фосфогипсовых вяжущих материалов от температуры термообработки и гранулометрического состава / М.Г. Игленкова, А.А. Родина, В.А. Решетов и др. // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. – 2011. – Т. 11, № 2. – С. 60–63.
45. Михеенков, М.А. Прессование как способ повышения физико-механических свойств гипсового вяжущего / М.А. Михеенков // *Вестник МГСУ*. – 2009. – № 3. – С. 173–182.
46. Волженский, А.В. Гипсовые вяжущие и изделия (технология, свойства, применение) // А.В. Волженский, А.В. Феронская. – М.: Стройиздат, 1974. – 328 с.
47. Upcycling of phosphogypsum as anhydrite plaster: The positive effect of soluble phosphorus impurities / W. Cao, W. Yi, J. Peng [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 72. – 130824. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130824
48. Левашова, А.К. Влияние природы пластификатора на свойства ангидритового вяжущего / А.К. Левашова, Л.И. Сычева // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2016. – Т. 30, № 7(176). – С. 58–60.
49. Левашова, А.К. Изучение вяжущих свойств продуктов дегидратации фосфогипса / А.К. Левашова, Л.И. Сычева // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2015. – Т. XXIX, № 7. – С. 47–49.
50. Манкеевич, Я.В. Влияние механоактивации фосфогипсовой сырьевой смеси на гидратацию и твердение ангидритового вяжущего / Я.В. Манкеевич, Л.И. Сычева // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2014. – Т. 28, № 8(157). – С. 61–64.
51. Зависимости прочности фосфогипсовых вяжущих материалов от температуры термообработки и гранулометрического состава / М.Г. Игленкова, А.А. Родина, В.А. Решетов [и др.] // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. – 2011. – Т. 11, № 2. – С. 60–63.
52. Leškevičienė, V. Anhydrite binder calcined from phosphogypsum / V. Leškevičienė, D. Nizevičienė // *Ceramics – Silikáty*. – 2010. – Vol. 54(2). – P. 152–159.
53. Сакович, А.А. Переработка фосфогипса на ангидритовое вяжущее и сульфоалюминатную добавку к цементу / А.А. Сакович, А.А. Мечай, М.В. Новик // *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ*. – 2008. – Т. 1, № 3. – С. 134–138.
54. Новик, М.В. Получение высокопрочного водостойкого эстрих-гипса для сухих строительных смесей / М.В. Новик, А.А. Мечай, А.А. Сакович // *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ*. – 2008. – Т. 1, № 3. – С. 139–143
55. Singh, M. Making of anhydrite cement from waste gypsum / M. Singh, M. Garg // *Cement and Concrete Research*. – 2000. – Vol. 30(4). – P. 571–577. – DOI:10.1016/S0008-8846(00)00209-X
56. Чернышева, Н.В. Получение гипсового вяжущего из фосфогипса Туниса / Н.В. Чернышева, С.В. Свергузова, Г.И. Тарасова // *Строительные материалы*. – 2010. – №7. – С. 28–30.

References

1. One-step wet-process phosphoric acid by-product CaSO_4 and its purification / K. Fang, L. Xu, M. Yang [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2023. – Vol. 309. – 123048. – DOI:10.1016/j.seppur.2022.123048.

2. Rashad, A.M. Phosphogypsum as a construction material / A.M. Rashad // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743. – DOI:10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
3. Ivashchenko, T.G. Phosphorite phosphogypsum: properties, main directions of processing and environmental and hygienic assessment / T.G. Ivashchenko, I.P. Krainov // *Ecology and industry*. – 2009. – No. 1 (18). – P. 59–64.
4. Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide / E. Bilal, H. Bellefqih, V. Bourcier [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 414. – 137561. – DOI:10.1016/j.jclepro.2023.137561.
5. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review / N.I. Alfimova, S.Yu. Pirieva, M.Yu. Elistratkin [et al.] // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. – 2020. – No.11. – P. 8–23. – DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23
6. Abouzeid, A.-Z.M. Physical and thermal treatment of phosphate ores – An overview / A.-Z.M. Abouzeid // *International Journal of Mineral Processing*. – 2008. – Vol. 85(40). – P. 59–84. – DOI:10.1016/j.minpro.2007.09.001.
7. Pufahl, P.K. Sedimentary and igneous phosphate deposits : formation and exploration: an invited paper / P.K. Pufahl, L.A. Groat // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112. – P. 483–516. – DOI:10.2113/econgeo.112.3.483.
8. Straaten, P.V. Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa / P.V. Straaten (CD). – ICRAF, Nairobi, Kenya, 2002. – 338p.
9. Manning, D.A.C. Phosphate minerals, environmental pollution and sustainable agriculture / D.A.C. Manning // *Elements*. – 2008. – Vol. 4. – P. 105–108. – DOI:10.2113/GSELEMENTS.4.2.105.
10. Straaten, P.V. Agrogeology, The Use of Rocks for Crops / P.V. Straaten. – *Enviroquest (pub.)*, (Chapter 4), 2007. – P. 87–164.
11. Mineral Commodity Summaries, 2022. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – P. 124–125. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
12. Da Silva, G.A. Environmental performance comparison of wet and thermal routes for phosphate fertilizer production using LCA – A Brazilian experience / G.A. da Silva, L.A. Kulay // *Journal of Cleaner Production*. – 2005. – Vol. 13(13–14). – P. 1321–1325. – DOI:10.1016/j.jclepro.2005.05.004.
13. Application prospect of advanced oxidation technology in wet process phosphoric acid production / X. Liu, F. Wu, G. Qu [et al.] // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10(6). – 108868. – DOI:10.1016/j.jece.2022.108868.
14. Acid stable layer-by-layer nanofiltration membranes for phosphoric acid purification / S. Xu, R. He, C. Dong [et al.] // *Journal of Membrane Science*. – 2022. – Vol. 644. – 120090. – DOI:10.1016/j.memsci.2021.120090.
15. Mineral Commodity Summaries, 2020. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – P. 122–123. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2020.pdf>
16. Mineral Commodity Summaries, 2021. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – P. 122–123. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
17. Mineral Commodity Summaries, 2023. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – P. 132–133. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>
18. Chen, L. Utilization of phosphogypsum to synthesize α -hemihydrate gypsum in $H_3PO_4-H_2O$ solution / L. Chen, L. Yang, J. Cao // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 368. – 130453. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130453
19. Recycling of waste gypsum from α -hemihydrate phosphogypsum: Based on the atmospheric hydrothermal process / Z. Jin, C. Cui, Z. Xu [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 377. – 131136. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.131136
20. Efficient removal of impurities from phosphogypsum during preparation of α -hemihydrate gypsum / Q. Guan, Y. Zhou, W. Yu [et al.] // *Minerals Engineering*. – 2023. – Vol. 201. – 108203. – DOI:10.1016/j.mineng.2023.108203
21. Properties of β -HPG pastes in the presence of α -HPG prepared from phosphogypsum / H. Qi, B. Ma, H. Tan [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 334. – 127414. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.127414.

22. Li, X. Conversion of phosphogypsum into α -hemihydrate in the presence of potassium acid phthalate and Ca^{2+} : Experimental and DFT studies / X. Li, W. Gao // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2022. – Vol. 652. – 129906. – DOI:10.1016/j.colsurfa.2022.129906.
23. L-aspartic acid: A crystal modifier for preparation of hemihydrate from phosphogypsum in CaCl_2 solution / X. Li, Q. Zhang, Z. Shen [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2019. – Vol. 511. – P. 48–55. – DOI:10.1016/j.jcrysgro.2019.01.027
24. Li, X. Preparation of α -hemihydrate gypsum from phosphogypsum in glycerol and Na_2SO_4 mixed solutions under atmospheric pressure / X. Li, Y. He // *Journal of Crystal Growth*. – 2021. – Vol. 568–569. – 126184. – DOI:10.1016/j.jcrysgro.2021.126184.
25. Preparation of α -hemihydrate gypsum from phosphogypsum in recycling CaCl_2 solution / W. Lu, B. Ma, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 214. – Pp. 399–412. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.148
26. Synthesis of α -hemihydrate gypsum from cleaner phosphogypsum / B. Ma, W. Lu, Y. Su [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 195. – P.396–405. – DOI:10.1016/j.jclepro.2018.05.228
27. Mi, Y. Utilization of phosphogypsum for the preparation of α -calcium sulfate hemihydrate in chloride-free solution under atmospheric pressure / Y. Mi, D. Chen, S. Wang // *Journal Chemical Technology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 93 (8). – P. 2371–2379. – DOI:10.1002/jctb.5584
28. Insight into the effect of maleic acid on the preparation of α -hemihydrate gypsum from phosphogypsum in Na_2SO_4 solution / X. Li, Q. Zhang, B. Ke [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2018. – Vol. 493. – P. 34–40. – DOI:10.1016/j.jcrysgro.2018.04.025
29. Suchkov, V.P. Microscopic studies of the phosphogypsum recrystallization process / V.P. Suchkov, A.E. Korshunov, A.A. Molkov // *Almanac of world science*. – 2015. – No. 1–4(1). – P. 119–121.
30. Sapelin, N.A. Obtaining a gypsum binder α -modification from natural raw materials and phosphogypsum / N.A. Sapelin, V.N. Khokhlov // *Dry building mixes*. – 2011. – No. 6. – P. 25–27.
31. Preparation of load-bearing building materials from autoclaved phosphogypsum / J. Yang, W. Liu, L. Zhang [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23. – P. 687–693. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.02.011.
32. Gubskaya, A.G. Production of gypsum binder and products from natural and technogenic raw materials in the Republic of Belarus / A.G. Gubskaya, E.Ya. Podluzsky, V.S. Melenko // *Building materials*. – 2008. – No. 3. – P. 73–75.
33. Effect of modifiers on crystalizing habit and mechanical strength of α -hemihydrate gypsum prepared from PG by an autoclaved method / D. Liu, Q. Wang, G. Xu [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 366. – 130114. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130114.
34. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders / M. Garg, N. Jain, M. Singh // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23(10). – P. 3138–3143. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.024.
35. Effect of succinic acid on the preparation of α -HH and its hydration properties / M. Gou, J. Zhao, L. Zhou [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2023. – Vol. 617. – 127286. – DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2023.127286.
36. Influence of calcination and GGBS addition in preparing β -hemihydrate synthetic gypsum from phosphogypsum / L. Zhang, K.H. Mo, T.H. Tan [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – e02259. – DOI:10.1016/j.cscm.2023.e02259
37. Study on physical and chemical characteristics of β -hemihydrate phosphogypsum / X. Chen, Y. Liu, Q. Wu [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – Vol. 17. – e01461. – DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01461.
38. Recycling of phosphogypsum to prepare gypsum plaster: Effect of calcination temperature / W. Cao, W. Yi, J. Peng [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – Vol. 45. – 103511. – DOI:10.1016/j.jobee.2021.103511.

39. Preparation of eco-friendly lightweight gypsum: Use of beta-hemihydrate phosphogypsum and expanded polystyrene particles / Z. Jin, B. Ma, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 297. – 123837. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123837.
40. Utilization of hemihydrate phosphogypsum for the preparation of porous sound absorbing material / B. Ma, Z. Jin, Y. Su [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 234. – 117346. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117346
41. Calcination parameters on phosphogypsum waste recycling / R.H. Geraldo, A.R.D. Costa, J. Kanai [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 256. – 119406. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119406
42. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste / G. Bumanis, J. Zorica, D. Bajare [et al.] // *Energy Procedia*. – 2018. – Vol. 147. – P. 301–308. – DOI:10.1016/j.egypro.2018.07.096
43. Garg, M. Modifications in water resistance and engineering properties of β -calcium sulphate hemihydrate plaster-superplasticizer blends / M. Garg, A. Pundir, R. Singh // *Materials and Structures*. – 2016. – Vol. 49. – P. 3253–3263. – DOI:10.1617/s11527-015-0717-0
44. Dependences of the strength of phosphogypsum binders on the heat treatment temperature and particle size distribution / M.G. Iglenkova, A.A. Rodina, V.A. Reshetov [et al.] // *Proceedings of the Saratov University. New episode. Series: Chemistry. Biology. Ecology*. – 2011. – Vol. 11, No. 2. – P. 60–63.
45. Mikheenkov, M.A. Pressing as a way to improve the physical and mechanical properties of a gypsum binder / M.A. Mikheenkov // *Vestnik MGSU*. – 2009. – No. 3. – P. 173–182.
46. Volzhensky, A.V. Gypsum binders and products (technology, properties, application) // A.V. Volzhensky, A.V. Feronskaya. – M.: Stroyizdat, 1974. – 328 p.
47. Upcycling of phosphogypsum as anhydrite plaster: The positive effect of soluble phosphorus impurities / W. Cao, W. Yi, J. Peng [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 72. – 130824. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130824
48. Levashova, A.K. Influence of the nature of the plasticizer on the properties of anhydrite binder / A.K. Levashova, L.I. Sycheva // *Advances in chemistry and chemical technology*. – 2016. – Vol. 30, No. 7 (176). – P. 58–60.
49. Levashova, A.K. Study of astringent properties of phosphogypsum dehydration products / A.K. Levashova, L.I. Sycheva // *Advances in chemistry and chemical technology*. – 2015. – Vol. XXIX, No. 7. – P. 47–49.
50. Mankeevich, Ya.V. Influence of mechanical activation of phosphogypsum raw material mixture on hydration and hardening of anhydrite binder / Ya.V. Mankeevich, L.I. Sycheva // *Advances in chemistry and chemical technology*. – 2014. – Vol. 28, No. 8 (157). – P. 61–64.
51. Dependences of the strength of phosphogypsum binders on the heat treatment temperature and particle size distribution / M.G. Iglenkova, A.A. Rodina, V.A. Reshetov [et al.] // *Proceedings of the Saratov University. New episode. Series: Chemistry. Biology. Ecology*. – 2011. – Vol. 11, No. 2. – P. 60–63.
52. Leškevičienė, V. Anhydrite binder calcined from phosphogypsum / V. Leškevičienė, D. Nizevičienė // *Ceramics – Silikáty*. – 2010. – Vol. 54(2). – P. 152–159.
53. Sakovich, A.A. Processing of phosphogypsum for anhydrite binder and sulfoaluminate additive to cement / A.A. Sakovich, A.A. Mechai, M.V. Novik // *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 3. Chemistry and technology of inorganic substances*. – 2008. – Vol. 1, No. 3. – P. 134–138.
54. Novik, M.V. Obtaining high-strength waterproof estrich-gypsum for dry building mixtures / M.V. Novik, A.A. Mechai, A.A. Sakovich // *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 3. Chemistry and technology of inorganic substances*. – 2008. – Vol. 1, No. 3. – P. 139–143.

55. Singh, M. Making of anhydrite cement from waste gypsum / M. Singh, M. Garg // *Cement and Concrete Research*. – 2000. – Vol. 30(4). – P. 571–577. – DOI:10.1016/S0008-8846(00)00209-X

56. Chernysheva, N.V. Obtaining a gypsum binder from phosphogypsum of Tunisia / N.V. Chernysheva, S.V. Sverguzova, G.I. Tarasova // *Building materials*. – 2010. – No. 7. – P. 28–30.

УДК 69:519.7

DOI 10.54734/20722958_2024_1_99

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

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

ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Рассматриваются актуальные задачи строительного материаловедения: определение устойчивости материала к длительному радиационному воздействию, установление остаточной прочности строительных материалов по годам эксплуатации, параметров разрушения декоративного покрытия и др. с использованием математического аппарата временных рядов. Предлагаются результаты реализации в приложении к описанию кинетических процессов формирования физико-механических характеристик композиционных материалов со специальными свойствами.

Ключевые слова: композиционные материалы, сложные системы, идентификация, управление свойствами, временные ряды

TIME SERIES IN BUILDING MATERIALS SCIENCE

I.A. Garkina, A.M. Danilov

Current problems of building materials science are considered: determining the resistance of a material to long-term radiation exposure, establishing the residual strength of building materials by the years of operation, parameters of decorative coatings destruction, etc. using mathematical apparatus of time series. The implementation results are proposed in annex to the description of kinetic processes of formation physical and mechanical characteristics of composite materials with special properties.

Keywords: composite materials, complex systems, identification, property management, time series

Следуя словам П. Капицы: «...чем фундаментальнее закономерность, тем проще ее можно сформулировать», рассмотрим отдельный раздел высшей математики (временные ряды), важный для использования математических методов в профессиональной деятельности и представляющий существенный интерес для специалистов и научных работников. Идентификация структуры и свойств композиционных материалов [1, 2] (как сложных систем) является дуальной (сопряженной) по отношению к задаче управления системой: нельзя управлять системой, если она не идентифицирована либо заранее, либо в процессе управления. Естественно, знание результатов идентификации до начала процесса управления существенно влияет на его реализацию. Совокупность предполагаемых связей между свойствами фактически и является моделью в широком

смысле; модель может принимать разные форму и степень математической детализации (или вообще описываться без использования языка математики).

Ряд задач строительного материаловедения достаточно просто можно решить с использованием теории временных рядов [3]. Основной целью является описание, объяснение и прогнозирование поведения сложных систем, в том числе композиционных материалов [4, 5], на основе построения их математических моделей. Здесь временной ряд представляется в виде суммы четырех компонент:

- тренд или долгосрочное движение;
- колебания относительно тренда;
- сезонная компонента;
- случайная составляющая.

Одной из *целей* анализа является разложение ряда на его составляющие для отдельного изучения.

Авторегрессионная модель кинетического процесса со скользящим средним представляется в виде

$$x_t = a_1 x_{t-1} + \dots + a_p x_{t-p} + b_0 e_t + b_1 e_{t-1} + \dots + b_q e_{t-q}; \quad (1)$$

$$x_t = X(t), x_{t-p} = X(t - p \cdot \Delta t); e_t = e(t), \dots, e_{t-q} = e(t - q \cdot \Delta t);$$

Δt – шаг дискретизации.

Это выражение можно рассматривать как регрессию x_t на x_{t-1}, x_{t-2}, \dots со случайным остатком ε_t .

Из (1) после умножения на x_{t-k} и последующего усреднения получим

$$r_k = \sum_{i=1}^p a_i r_{k-i}, \quad k \geq q+1, \quad (2)$$

где $r_k = E(x_{t-k}, x_t)$, $k = 0, 1, \dots$. Таким образом, имеется только q различных коэффициентов автокорреляции (r_1, \dots, r_q) , значения которых непосредственно зависят от параметров скользящего среднего. Последнее разностное уравнение представляется в виде так называемого модифицированного уравнения Юла – Уолкера [6]

$$r_{q+k} = \sum_{j=1}^p a_j r_{q+k-j}, \quad k = \overline{1, p}. \quad (3)$$

Оценки параметров авторегрессии \hat{a}_j легко определить из (3) по вычисленным выборочным корреляционным функциям \hat{r}_j (оценки не являются эффективными).

При оценке параметров b_j скользящего среднего авторегрессионная модель со скользящим средним (1) сводится к виду

$$x_t = b_0 e_t + \sum_{j=1}^q b_j e_{t-j} \quad (4)$$

(вводится $\tilde{x}_t = x_t - \sum_{i=1}^p \hat{a}_i x_{t-i}$).

При определении \hat{a}_i из модифицированного уравнения Юла – Уолкера вместо теоретической корреляционной функции r_k подставляется эмпирическая корреляционная функция \hat{r}_k .

Справедливо:

$$\tilde{r}_k = \begin{cases} (1 + b_1^2 + \dots + b_q^2) \sigma_e^2; & k = 0, \\ (b_0 + b_1 b_{k+1} + \dots + b_{q-k} b_q) \sigma_e^2; & k = \overline{1, q}, \\ 0; & k > q; \end{cases} \quad (5)$$

$$E(\tilde{x}_k, \tilde{x}_{t-k}) = \begin{cases} 0, & k \neq 0, \\ \sigma_e^2, & k = 0. \end{cases}$$

Оценки параметров скользящего среднего и дисперсии оценок определяются из (5).

В соответствии с предыдущим имеем

$$\tilde{r}_k = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^p \hat{a}_i \hat{a}_j E(x_{t-i} x_{t-j-k}) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^p \hat{a}_i \hat{a}_j r_{k+j-i}, \hat{a}_0 = 1.$$

Приведем важные для практических приложений частные случаи авторегрессионных процессов порядка k с постоянными коэффициентами вида

$$x_t = a_1 x_{t-1} + \dots + a_p x_{t-p} + \varepsilon_t$$

(можно рассматривать как регрессию x_t на $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}$ со случайным остатком ε_t).

Для простейшего марковского процесса

$$x_t = a_1 x_{t-1} + \varepsilon_t.$$

Обобщением является авторегрессионный процесс Юла

$$x_t = a_1 x_{t-1} + a_2 x_{t-2} + \varepsilon_t$$

(как в марковском, так и в процессе Юла предполагается независимость ε_t от x_{t-1} и x_{t-2}).

Оценка коэффициента a_{h+1} для модели порядка $h+1$ определяется по оценкам $a_j(h)$ общего линейного авторегрессионного процесса порядка h с использованием рекуррентной формулы (алгоритм Левинсона – Дурбина), а правильность выбранного порядка модели – из условия

$$\alpha_m(h) \neq 0, \text{ если } \leq h;$$

$$\alpha_m(h) = 0, \text{ если } > h.$$

Составление авторегрессионной модели (АР-модели) предполагает выполнение последовательности операций:

1. Определение дискретных центрированных значений

$$\{x_t\} = \{x(\Delta t), x(2\Delta t), \dots, x(N\Delta t)\} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$$

(при использовании нецентрированных значений обязательно последующее центрирование с предварительным определением скользящих средних).

2. Вычисление оценок автоковариаций с задержкой k :

$$\hat{\gamma}_0 = M[x_t^2] = \sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t^2;$$

$$\hat{\gamma}_k = M[x_t x_{t+k}] = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} x_t x_{t+k}, \quad k = \overline{1, p}$$

(p предварительно следует задать).

3. Вычисление коэффициентов автокорреляции с задержкой k :

$$\hat{r}_k = \frac{\hat{\gamma}_k}{\hat{\gamma}_0}; \quad k = \overline{1, p}; \quad p \leq \frac{N}{4}; \quad \hat{r}_0 = 1.$$

4. Решение системы уравнений Юла – Уолкера (относительно $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_p$):

$$\begin{aligned} \hat{a}_1 + \hat{r}_1 \hat{a}_2 + \hat{r}_2 \hat{a}_3 + \dots + \hat{r}_{p-1} \hat{a}_p &= \hat{r}_1; \\ \hat{r}_1 \hat{a}_1 + \hat{a}_2 + \hat{r}_1 \hat{a}_3 + \dots + \hat{r}_{p-2} \hat{a}_p &= \hat{r}_2; \\ \hat{r}_2 \hat{a}_1 + \hat{r}_1 \hat{a}_2 + \hat{a}_3 + \dots + \hat{r}_{p-3} \hat{a}_p &= \hat{r}_3; \\ &\dots \\ \hat{r}_{p-1} \hat{a}_1 + \hat{r}_{p-2} \hat{a}_2 + \hat{r}_{p-3} \hat{a}_3 + \dots + \hat{a}_p &= \hat{r}_p. \end{aligned}$$

В матричной форме:

$$\mathbf{pA} = \mathbf{R},$$

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 1 & \hat{r}_1 & \hat{r}_2 & \dots & \hat{r}_{p-1} \\ \hat{r}_1 & 1 & \hat{r}_1 & \dots & \hat{r}_{p-2} \\ & & \dots & & \\ \hat{r}_{p-1} & \hat{r}_{p-2} & \hat{r}_{p-3} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \vdots \\ \hat{a}_p \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \\ \vdots \\ \hat{r}_p \end{bmatrix}.$$

Оценка искоемых коэффициентов \hat{a}_j определится по

$$\mathbf{A} = \mathbf{p}^{-1} \mathbf{R}.$$

Искомая АР-модель:

$$x_t = \hat{a}_1 x_{t-1} + \hat{a}_2 x_{t-2} + \dots + \hat{a}_p x_{t-p}.$$

Для АР-модели 2-го порядка

$$\begin{aligned} \hat{a}_1 &= \frac{\hat{r}_1(1-\hat{r}_2)}{1-\hat{r}_1^2}; \quad \hat{a}_2 = \frac{\hat{r}_2-\hat{r}_1^2}{1-\hat{r}_1^2}; \quad \hat{\gamma}_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t^2; \quad \hat{\gamma}_1 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} x_t x_{t+1}; \\ \hat{\gamma}_2 &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-2} x_t x_{t+2}; \quad \hat{r}_1 = \frac{\hat{\gamma}_1}{\hat{\gamma}_0}; \quad \hat{r}_2 = \frac{\hat{\gamma}_2}{\hat{\gamma}_0}. \end{aligned}$$

Отсюда искомая модель имеет вид

$$\hat{x}_t = \hat{a}_1 x_{t-1} + \hat{a}_2 x_{t-2}.$$

Определение оценок \hat{a}_{p+1} по оценкам $\hat{a}_j(p)$ осуществляется с использованием алгоритма Левинсона – Дурбина.

В частности, при $\hat{a}_3 = 0$ можно считать

$$x_t = \hat{a}_1 x_{t-1} + a_2 x_{t-2}.$$

Оценку порядка p для АР-модели можно получить из условия

$$\frac{N+p+1}{N-m-1} \hat{\sigma}^2(p) = \min_m \frac{N+m+1}{N-m-1} \hat{\sigma}^2(m), \quad m = \overline{o, L},$$

L – установленный предельный порядок модели.

Подберем полином третьего порядка к группам по семь точек. Без потери общности примем, что рассматриваются моменты

$$t = \{-3; -2; -1; 0; 1; 2; 3\}.$$

Представим искомый полином в виде

$$\tilde{u}_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3.$$

Коэффициенты полинома a_0, a_1, a_2, a_3 можно найти методом наименьших квадратов (путём минимизации):

$$I = \sum_{t=-3}^3 (\tilde{u}_t - \tilde{u}_t)^2.$$

Дифференцирование по каждому из коэффициентов даёт четыре уравнения вида

$$\sum \tilde{u}_t t^j - a_0 \sum t^j - a_1 \sum t^{j+1} - a_2 \sum t^{j+2} - a_3 \sum t^{j+3} = 0, j = 0, 1, 2, 3.$$

Поскольку суммы нечётных порядков t от -3 до $+3$ равны 0 , справедливо:

$$\begin{aligned} \sum \tilde{u}_t &= 7a_0 + 28a_2 \\ \sum t \tilde{u}_t &= 28a_1 + 196a_3 \\ \sum t^2 \tilde{u}_t &= 28a_0 + 196a_2 \\ \sum t^3 \tilde{u}_t &= 196a_1 + 1588a_3 \end{aligned}.$$

Из первого и третьего уравнений в момент времени $t = 0$

$$\sum t \tilde{u}_t = \sum t^2 \tilde{u}_t = \sum t^3 \tilde{u}_t = 0$$

имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_t = a_0 &= \frac{1}{21} \left[7 \sum_{t=-3}^3 \tilde{u}_t - \sum_{t=-3}^3 t^2 \tilde{u}_t \right] = \frac{1}{21} \left[7(\tilde{u}_{-3} + \tilde{u}_{-2} + \tilde{u}_{-1} + \tilde{u}_0 + \right. \\ &\left. + \tilde{u}_1 + \tilde{u}_2 + \tilde{u}_3) - (9\tilde{u}_{-3} + 4\tilde{u}_{-2} + \tilde{u}_{-1} + 0 + \tilde{u}_1 + 4\tilde{u}_2 + 9\tilde{u}_3) \right] = \\ &= \frac{1}{21} [-2\tilde{u}_{-3} + 3\tilde{u}_{-2} + 6\tilde{u}_{-1} + 7\tilde{u}_0 + 6\tilde{u}_1 + 3\tilde{u}_2 - 2\tilde{u}_3]. \end{aligned}$$

Следовательно, значение тренда в какой-либо точке равно средневзвешенному значению семи точек с данной точкой в качестве центральной и весами

$$\frac{1}{21} [-2; 3; 6; 7; 6; 3; -2],$$

которые в силу симметрии можно записать короче:

$$\frac{1}{21} [-2; 3; 6; 7; \dots].$$

Приведенные алгоритмы эффективно использовались при изучении формирования основных физико-механических характеристик эпоксидных радиационно-защитных композитов [7, 8] с учетом предыстории (оказалось возможным принять предельный порядок p модели равным четырём).

Выводы

Показано, что выбор методов математического моделирования композиционных материалов определяется неоднозначно: в постановке задачи заранее предполагается неопределенность.

Определена возможность решения ряда задач строительного материаловедения с использованием теории временных рядов.

На основе практического изучения временного ряда выявляются свойства ряда и определяется вероятностный механизм, порождающий этот ряд; строится модель временного ряда, определяется алгоритм предсказания будущих значений ряда на основе прошлых наблюдений; разрабатывается методика управления процессом, порождающим временной ряд.

Описание, объяснение и прогнозирование поведения сложных систем (в том числе композиционных материалов) могут рассматриваться как основа построения их математических моделей.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // *Архитектура и строительство России*. – 2020. – № 3. – С. 14.
2. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // *Эксперт: теория и практика*. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.
3. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов: монография / Р. Отнес, Р. Эноксон. – М., 1982. – 383 с.
4. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // *Journal of Basic and Applied Research International*. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
5. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Seylyaev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
6. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление: монография / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М., 1974. – 405 с.
7. Будылина, Е.А. Математические задачи системного анализа при синтезе композитов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2023. – № 1 (54). – С. 71–84.
8. Гарькина, И.А. Методы системного анализа в проектировании композитов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2020. – № 1 (42). – С. 63–68.

References

1. Korolev, E.V. Prospects for the development of construction materials science / E.V. Korolev // *Architecture and construction of Russia*. – 2020. – № 3. – P. 14.
2. Chernyshov, E.M. The problem of complexity and consistency of qualitative description and statistical reliability of quantitative assessment of the characteristics of the structure of building composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // *Expert: theory and practice*. – 2022. – № 2 (17). – P. 75–80.
3. Otnes, R. Applied analysis of time series: monograph / R. Otnes, R. Enokson. – M., 1982. – 383 p.
4. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // *Journal of Basic and Applied Research International*. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
5. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Seylyaev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
6. Box, J. Time series analysis. Forecast and management: monograph / J. Box, G. Jenkins. – M., 1974. – 405 p.
7. Budylyna, E.A. Mathematical problems of system analysis in the synthesis of composites / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – № 1 (54). – P. 71–84.
8. Garkina, I.A. Methods of system analysis in the design of composites / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – № 1 (42). – P. 63–68.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.151.5

DOI 10.54734/20722958_2024_1_105

*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

Викторов Валерий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Викторова Ольга Леонидовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@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

Viktorov Valery Vasilievith,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building structures»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Viktorova Olga Leonidovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Urban construction and
Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

ВНЕЦЕНТРЕННО НАГРУЖЕННЫЕ ФУНДАМЕНТЫ С ЧАСТИЧНЫМ ОТРЫВОМ ПОДОШВЫ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ГРУНТ

В.В. Викторов, О.Л. Викторова

Разработана методика определения напряжений в основании внецентренно нагруженных фундаментов с учетом возможности частичного отрыва подошвы по различным вариантам распределения давления на основание. Применение этой методики позволяет более точно определять напряжения под подошвой внецентренно нагруженных фундаментов с учетом возможного варианта распределения давления на основание при частичном отрыве подошвы фундамента.

Ключевые слова: фундамент, подошва, напряжения, внецентренное нагружение, частичный отрыв подошвы, расчет, методика

OFF-CENTER LOADED FOUNDATIONS WITH PARTIAL SEPARATION OF THE SOLE. DETERMINATION OF THE MAXIMUM PRESSURE ON THE GROUND

V.V. Viktorov, O.L. Viktorova

A method for determining stresses in the base of non-centrally loaded foundations has been developed taking into account the possibility of partial separation of the sole according to various variants of pressure distribution on the base. The use of this technique makes it possible to determine

the stresses under the sole of off-center loaded foundations more accurately, taking into account the possible distribution of pressure on the base with partial separation of the sole of the foundation.

Keywords: foundation, sole, stresses, off-center loading, partial separation of the sole, calculation, methodology

Для зданий с фундаментами на естественном основании размер подошвы фундаментов назначается в зависимости от механических свойств основания и действующей на фундамент нагрузки в соответствии с требованиями СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Ось равнодействующей нагрузки может проходить через центр фундамента (случай центрально нагруженного фундамента) либо находиться на некотором удалении от центра фундамента, называемом эксцентриситетом (случай внецентренно нагруженного фундамента). При проектировании фундаментов, в процессе их расчета, определяются требуемые размеры подошвы фундамента в плане. При этом среднее давление под подошвой фундамента не должно превышать расчетного сопротивления грунта основания, максимальное угловое давление под подошвой фундамента не должно превышать расчетного сопротивления грунта основания больше, чем на 50 %.

Фактический характер распределения давления под подошвой фундамента зависит от многих факторов. К таким факторам можно отнести жесткостные характеристики подошвы фундамента, механические характеристики грунтов основания, характер напластования этих грунтов, размеры подошвы и др. Учет реального распределения давления под подошвой представляет собой достаточно сложную инженерную задачу. Для упрощения решения этой задачи СП 22.13330.2016 допускает использовать в расчетах гипотезу бесконечно большой изгибной жесткости плиты подошвы столбчатых фундаментов. В этом случае характер распределения давления под их подошвой будет проходить по линейному закону.

При использовании гипотезы большой изгибной жесткости плиты подошвы фундаментов в случае центрального их нагружения давление под подошвой будет распределяться равномерно. Напряжения в основании могут быть вычислены как отношение вертикальной нагрузки в уровне низа фундамента к площади его подошвы.

Под подошвой внецентренно нагруженных фундаментов давление будет распределяться по линейному закону в зависимости от величины эксцентриситета равнодействующей нагрузки. Для внецентренно нагруженных фундаментов, имеющих эксцентриситет нагрузки, действующий в одном направлении, когда равнодействующая нагрузки проходит через одну из осей симметрии подошвы фундамента (на оси x или на оси y), максимальные и минимальные напряжения в основании вычисляются по формуле

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W},$$

где N – вертикальная сила в уровне низа фундамента; A – площадь подошвы фундамента; M – изгибающий момент в уровне низа фундамента; W – момент сопротивления подошвы фундамента.

Для внецентренно нагруженных фундаментов, имеющих эксцентриситет в двух направлениях (равнодействующая нагрузки не проходит через оси x или y), угловые напряжения в основании вычисляются по формуле

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y},$$

где M_x и M_y – изгибающие моменты в уровне низа фундамента вокруг соответствующих осей; W_x и W_y – моменты сопротивления подошвы фундамента вокруг соответствующих осей.

Приведенные формулы для определения давления под подошвой внецентренно нагруженных фундаментов справедливы только в том случае, если минимальное давлe-

ние больше нуля и фундамент оказывает давление на основание всей площадью подошвы.

Характер представленных формул предполагает возможность возникновения отрицательных значений давления под подошвой фундамента, которые соответствуют появлению растягивающих напряжений в зоне контакта фундамент – грунт. Однако растягивающие напряжения в основании в зоне контакта его с фундаментом образоваться не могут. Грунт и зона контакта грунта с фундаментом воспринимать растягивающие напряжения не способны, и при возникновении растягивающих напряжений в указанной зоне произойдет частичный отрыв фундамента от основания. Давление на основание будет передаваться только через часть подошвы фундамента. Площадь опирания фундамента на грунт уменьшится, справедливость формул, представленных выше, нарушится, и данные формулы будут некорректны.

Для фундамента, имеющих эксцентриситет вертикальной нагрузки в одном направлении, отрыв подошвы начнет происходить, когда эксцентриситет нагрузки e превысит значение, равное $1/6$ от длины фундамента ($e \geq l/6$), или при относительном эксцентриситете $\varepsilon = e/l = 1/6$; здесь l – длина подошвы фундамента в направлении действия эксцентриситета нагрузки.

Существующие нормы проектирования оснований и фундамента в некоторых случаях допускают возникновение частичного отрыва под подошвой фундамента, ограничивая относительный эксцентриситет нагрузки величиной, равной $e/l = 1/4$.

Для определения максимального давления под подошвой фундамента при относительном эксцентриситете $\varepsilon > 1/6$ максимальное давление на основание вычисляется по иной формуле, отличной от приведенных выше:

$$\sigma_{\max} = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot b \cdot (l/2 - e)}$$

Зависимость выведена в предположении того, что давление на основание распределяется только частью подошвы фундамента. Эпюра давления имеет треугольный характер. Размеры участка фундамента, передающего давление, принимаются таким образом, чтобы ось равнодействующей от внешней нагрузки проходила через центр тяжести эпюры давления. Максимальные значения напряжений принимаются таким образом, чтобы объем эпюры давления численно был равен величине продольной силы, действующей на фундамент.

Для фундамента, имеющих эксцентриситет нагрузки в двух направлениях, отрыв подошвы начнет происходить при сумме относительных эксцентриситетов нагрузки, равной $1/6$. Зависимость можно представить следующим образом:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y = \frac{e_l}{l} + \frac{e_b}{b} = \frac{1}{6},$$

где $\varepsilon_x = \frac{e_l}{l}$ – относительный эксцентриситет нагрузки вокруг оси x ; $\varepsilon_y = \frac{e_b}{b}$ – относительный эксцентриситет нагрузки вокруг оси y .

В существующих нормах проектирования определение максимального давления под подошвой фундамента при действии нагрузки с эксцентриситетом в двух направлениях и частичным отрывом подошвы не рассматривается. Хотя в практике проектирования легких одноэтажных зданий со стальным каркасом такая ситуация встречается часто. Стальные каркасы зданий проектируются в соответствии с СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» с минимально возможным расходом металла и имеют относительно небольшой вес. Высота здания при этом может быть значительной. При действии горизонтальных ветровых нагрузок на каркас на фундамент может передаваться большой изгибающий момент, который совместно с небольшой вертикальной нагрузкой создает значительный эксцентриситет, а при изменении направления ветра возникает эксцентриситет, действующий в двух направлениях.

Для определения максимального давления под подошвой внецентренно нагруженных фундаментов нами была предложена расчетная модель [1], где напряжения под подошвой фундаментов распределяются по линейному закону, ось равнодействующей от нагрузки проходит через центр тяжести объема эпюры напряжений. Объем эпюры напряжений под подошвой фундамента численно равен вертикальной нагрузке, действующей в уровне подошвы фундамента.

При эксцентричной нагрузке с эксцентриситетом в двух направлениях и возможным отрывом фундамента возможны три случая расчета – сжатая зона фундамента в виде треугольника, сжатая зона фундамента в виде трапеции, сжатая зона фундамента в виде пятиугольника. Возможные случаи распределения давления представлены на рис. 1. В [1] рассмотрен один из возможных случаев отрыва подошвы фундамента, а именно при сжатой зоне давления в виде четырехугольника. В настоящей статье описываются все три случая работы фундамента с частичным отрывом подошвы.

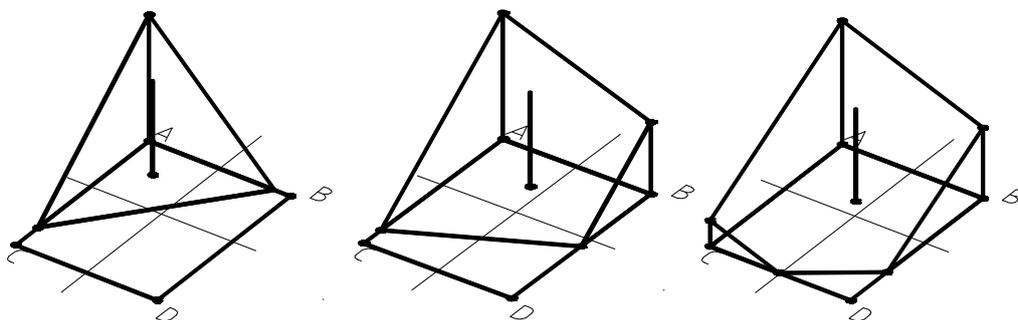


Рис. 1. Возможные случаи распределения давления на основание при частичном отрыве подошвы фундамента

При сжатой зоне в виде треугольника растянутая зона представляет собой пятиугольник. Эпюра давления под подошвой фундамента представляет собой прямоугольную трехгранную пирамиду. Схема распределения давления под подошвой фундамента приведена на рис. 2.

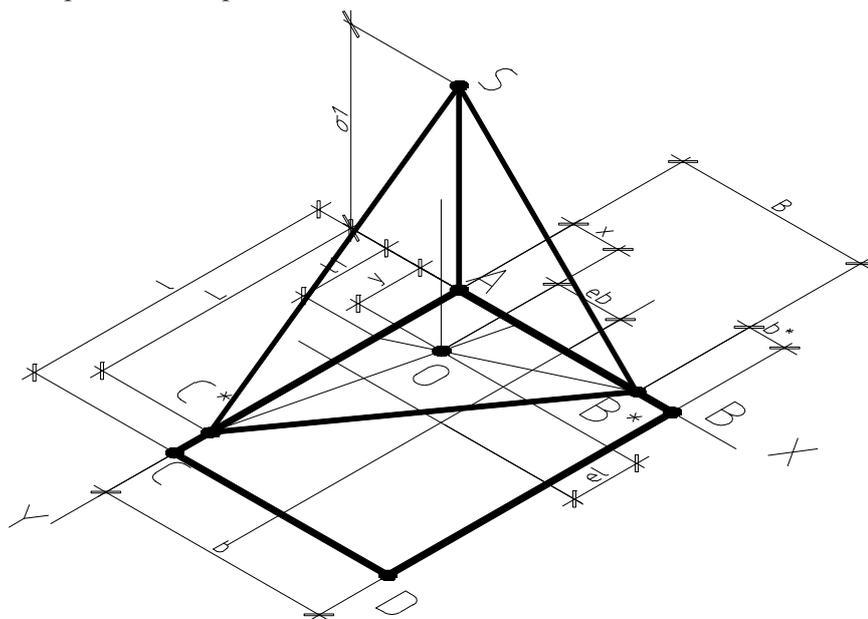


Рис. 2. Схема распределения напряжений под подошвой фундамента при треугольной эпюре давления

Положение проекции центра тяжести такой пирамиды (точка «О») вычисляется по формулам:

$$x = 1/4 \cdot B; \quad y = 1/4 \cdot L,$$

где B и L – размеры основания пирамиды давления.

Расстояния x и y равны: $x = b/2 - e_b$ и $y = l/2 - e_l$.

Введем понятие относительного эксцентриситета относительно половины длины и ширины фундамента:

$$\varepsilon_b = e_b / (b/2) \text{ и } \varepsilon_l = e_l / (l/2).$$

Значения подставим в формулу

$$x = b/2 \cdot (1 - \varepsilon_b) \quad \text{и} \quad y = l/2 \cdot (1 - \varepsilon_l).$$

Получим размеры основания пирамиды давления:

$$B = 4 \cdot x = 2 \cdot b \cdot (1 - \varepsilon_b);$$

$$L = 4 \cdot y = 2 \cdot l \cdot (1 - \varepsilon_l).$$

По характеру формул можно сделать вывод, что размеры основания треугольной пирамиды давления не зависят от величины нагрузки, а зависят от величины относительного эксцентриситета.

Максимальные напряжения под подошвой фундамента численно будут равны объему пирамиды давления:

$$\sigma_1 = V = 1/6 \cdot B \cdot L = \frac{2}{3} \cdot b \cdot l \cdot (1 - \varepsilon_b) \cdot (1 - \varepsilon_l).$$

Рассмотренная схема справедлива при треугольной форме сжатой зоны при значениях относительного эксцентриситета $\varepsilon_b > 0,5$ и $\varepsilon_l > 0,5$.

При сжатой зоне в виде четырехугольника растянутая зона также представляет собой четырехугольник [1]. Эпюра давления под подошвой фундамента представляет собой усеченную пирамиду. Пирамида имеет треугольное основание. Объем усеченной пирамиды вычисляется по формуле

$$V = \frac{h}{3} \cdot (f_1 + f_2 + \sqrt{f_1 \cdot f_2});$$

здесь f_1 и f_2 – площади нижнего и верхнего оснований пирамиды; h – высота пирамиды.

Центр тяжести усеченной пирамиды расположен на линии, соединяющей центры тяжести оснований, и на высоте, вычисляемой по формуле

$$y_0 = \frac{h}{4} \cdot \frac{f_1 + 2 \cdot \sqrt{f_1 \cdot f_2} + 3f_2}{f_1 + \sqrt{f_1 \cdot f_2} + f_2}.$$

Площадь нижнего основания пирамиды численно равна половине произведения максимального углового напряжения под подошвой на длину сжатой части подошвы:

$$f_1 = \frac{\sigma_1 \cdot l_1}{2}.$$

Площадь верхнего основания пирамиды численно равна половине произведения углового напряжения под подошвой на длину сжатой части подошвы:

$$f_2 = \frac{\sigma_2 \cdot l_2}{2}.$$

Поскольку усеченная пирамида ABB^*CS является частью полной пирамиды ABB^*CS (рис. 3). Соотношения сторон верхнего и нижнего оснований пирамиды будут равны между собой. Обозначим это соотношение буквой α :

$$\alpha = \sigma_2 / \sigma_1 = l_2 / l_1.$$

Соотношение площадей верхнего и нижнего оснований будет равно:

$$\alpha^2 = f_2 / f_1, \text{ или } f_2 = \alpha^2 \cdot f_1.$$

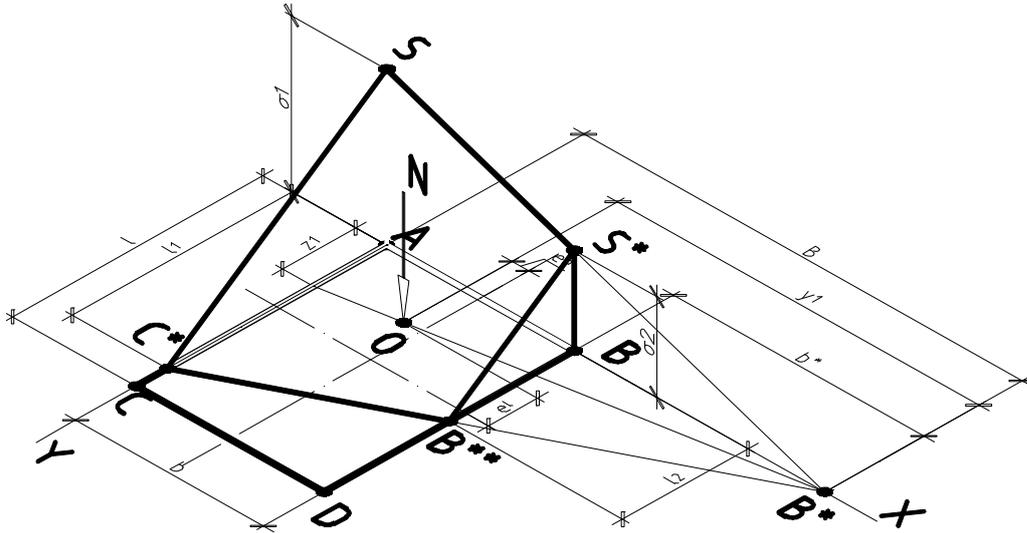


Рис. 3. Схема распределения напряжений под подошвой фундамента при четырехугольной эпюре давления

Высота h рассматриваемой пирамиды $S^*BB^*SAC^*$ будет равна ширине фундамента b . Ось равнодействующей вертикальной нагрузки будет проходить через центр тяжести рассматриваемой пирамиды. Это расстояние будет равно:

$$y_0 = \frac{b}{2} - e_b.$$

Тогда формула для вычисления положения центра тяжести пирамиды примет следующий вид:

$$\frac{b}{2} - e_b = \frac{b}{4} \cdot \frac{f_1 + 2 \cdot \sqrt{f_1 \cdot \alpha^2 \cdot f_1} + 3 \cdot \alpha^2 \cdot f_1}{f_1 + \sqrt{f_1 \cdot \alpha^2 \cdot f_1} + \alpha^2 \cdot f_1} = \frac{b}{4} \cdot \frac{1 + 2 \cdot \alpha + 3 \cdot \alpha^2}{1 + \alpha + \alpha^2}.$$

Если вместо эксцентриситета действия нагрузки подставить относительный эксцентриситет $\epsilon_b = \frac{e}{b/2}$, то формулу можно привести к виду

$$\frac{b}{2} - e_b = 2 - 2 \cdot \epsilon_b = \frac{1 + 2 \cdot \alpha + 3 \cdot \alpha^2}{1 + \alpha + \alpha^2},$$

а с дальнейшими арифметическими преобразованиями – к квадратному уравнению $(2 \cdot \epsilon_b + 1) \cdot \alpha^2 + (2 \cdot \epsilon_b) \cdot \alpha + (2 \cdot \epsilon_b - 1) = 0$.

При решении квадратного уравнения будет получен следующий результат:

$$\alpha = \frac{\sqrt{1 - 3 \cdot \epsilon_b^2} - \epsilon_b}{1 + 2 \cdot \epsilon_b}.$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что соотношение сторон оснований усеченной пирамиды – эпюры распределения давлений – не зависит от величины нагрузки, а зависит только от величины относительного эксцентриситета нагрузки в направлении ширины фундамента.

Длину сжатой части подошвы фундамента l_1 можно вычислить исходя из того, что центр тяжести усеченной пирамиды лежит на линии, соединяющей центры тяжести ее оснований.

Эти длины могут быть вычислены как

$$l_1 = 3 \cdot z_1 = 3 \cdot \left(\frac{l}{2} - e_l \right) \cdot \frac{B}{y_1};$$

$$l_2 = \alpha \cdot l_1.$$

Расстояния B и y_1 в приведенных выражениях могут быть найдены по следующим формулам:

$$B = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot b;$$

$$b^* = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot b;$$

$$y_1 = b^* + b/2 + e_b;$$

Максимальные напряжения под подошвой можно определить исходя из равенства объема эпюры давлений вертикальной продольной силе.

$$N = V = \frac{h}{3} \cdot (f_2 + f_1 + \sqrt{f_2 \cdot f_1}).$$

Выполнив подстановку $h = b$, $f_2 = \alpha \cdot f_1$ и $f_2 = \sigma_1 \cdot l_1 / 2$, получим:

$$N = V = \frac{h}{3} \cdot f_2 \cdot (1 + \alpha + \alpha^2) = b \cdot \sigma_1 \cdot l_1 \cdot (1 + \alpha + \alpha^2) / 6.$$

Из полученной формулы находим величины угловых напряжений эпюры давлений:

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot N}{b \cdot l_1 \cdot (1 + \alpha + \alpha^2)},$$

$$\sigma_2 = \alpha \cdot \sigma_1.$$

Рассмотренная схема справедлива при четырехугольной форме сжатой зоны при значениях относительного эксцентриситета $\epsilon_x > 0,5$ и $\epsilon_y < 0,5$ или $\epsilon_x < 0,5$ и $\epsilon_y > 0,5$.

При сжатой зоне в виде пятиугольника растянутая зона представляет собой треугольник. Эпюра давления под подошвой фундамента представляет собой пирамиду, усеченную с двух сторон. Пирамида давления имеет пятиугольное основание. Схема распределения давления под подошвой фундамента приведена на рис. 4.

Базовая неусеченная пирамида AC^*B^*S объемом V включает в себя объемы дважды усеченной пирамиды давления (V_1) и двух малых пирамид $BB^*B^{**}S^{**}$ (V_2) и $CC^*C^{**}S^{**}$ (V_3), основания которых выходят за пределы площади фундамента (см. рис. 4).

Объем базовой пирамиды можно определить по формуле $V = V_1 + V_2 + V_3$.

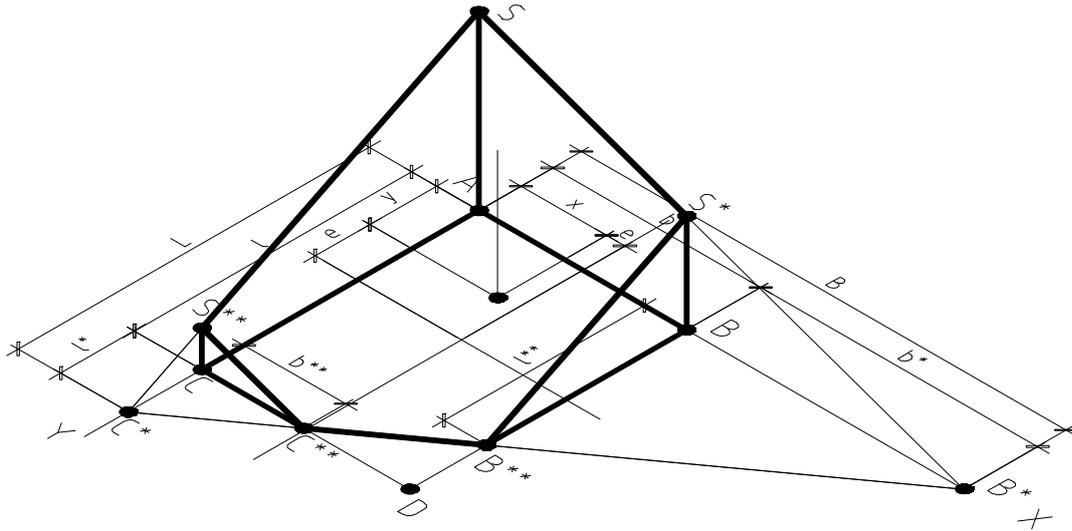


Рис. 4. Схема распределения напряжений под подошвой фундамента при пятиугольной эпюре давления

Очевидно, что статический момент пирамиды относительно начала координат будет равен сумме статических моментов отдельных тел, составляющих пирамиду:

$$V \cdot x = V_1 \cdot x_1 + V_2 \cdot x_2 + V_3 \cdot x_3;$$

$$V \cdot y = V_1 \cdot y_1 + V_2 \cdot y_2 + V_3 \cdot y_3;$$

здесь $x, y; x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3$ – координаты центров тяжести рассматриваемых геометрических тел.

Объем дважды усеченной пирамиды давления может быть вычислен по формуле $V_1 = V - V_2 - V_3$, а координаты ее центра тяжести – по формулам:

$$x_1 = \frac{V \cdot x - V_2 \cdot x_2 - V_3 \cdot x_3}{V_1};$$

$$y_1 = \frac{V \cdot y - V_2 \cdot y_2 - V_3 \cdot y_3}{V_1}.$$

Если обозначить $\beta = b^* / B$, а $\lambda = l^* / L$ (B и L – размеры основания большой базовой пирамиды AC^*B^*S ; $b^* = B - b$ и $l^* = L - l$ – размеры оснований малых пирамид, находящихся за пределами подошвы фундамента), то объем усеченной пирамиды давления может быть вычислен как

$$V_1 = V - \beta^3 \cdot V - \lambda^3 \cdot V = (1 - \beta^3 - \lambda^3) \cdot V.$$

Координаты центров тяжести неусеченных пирамид следуют из их геометрии. Формулы для их расчета будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= 1/4 \cdot B; \\ x_2 &= b + 1/4 \cdot b^*; \\ x_3 &= 1/4 \cdot b^{**}; \\ y &= 1/4 \cdot L; \\ y_2 &= l + 1/4 \cdot l^*; \\ y_3 &= 1/4 \cdot l^{**}; \end{aligned}$$

здесь $b^* = \beta \cdot B$; $b^{**} = \lambda \cdot B$; $l^* = \lambda \cdot L$; $l^{**} = \beta \cdot L$.

Координаты центра тяжести пирамиды давления могут быть вычислены по формулам:

$$x_1 = \frac{V \cdot x - V_2 \cdot x_2 - V_3 \cdot x_3}{V_1} = \frac{V \cdot b \cdot (1 - 4 \cdot b_3 + 3 \cdot b_4 - l_4)}{4 \cdot (1 - b) \cdot (1 - b_3 - l_3) \cdot V} = \frac{b \cdot (1 - 4 \cdot b_3 + 3 \cdot b_4 - l_4)}{4 \cdot (1 - b) \cdot (1 - b_3 - l_3)},$$

$$y_1 = \frac{V \cdot y - V_2 \cdot y_2 - V_3 \cdot y_3}{V_1} = \frac{V \cdot l \cdot (1 - 4 \cdot l_3 + 3 \cdot l_4 - b_4)}{4 \cdot (1 - l) \cdot (1 - b_3 - l_3) \cdot V} = \frac{l \cdot (1 - 4 \cdot l_3 + 3 \cdot l_4 - b_4)}{4 \cdot (1 - l) \cdot (1 - b_3 - l_3)}.$$

Проекция центра тяжести пирамиды давления совпадает с осью равнодействующей действующей нагрузки; поэтому $x_1 = b/2 - e_x$ и $y_1 = l/2 - e_y$, где e_x и e_y – эксцентриситеты действия нагрузки в направлении осей x и y .

Введем понятие относительного эксцентриситета нагрузки:

$$\varepsilon_x = e_x / (b/2) \text{ и } \varepsilon_y = e_y / (l/2).$$

После подстановки значений центров тяжести и преобразования формул получим систему уравнений:

$$\varepsilon_x = 1 - \frac{b \cdot (1 - 4 \cdot b_3 + 3 \cdot b_4 - l_4)}{2 \cdot (1 - b) \cdot (1 - b_3 - l_3)},$$

$$\varepsilon_y = 1 - \frac{l \cdot (1 - 4 \cdot l_3 + 3 \cdot l_4 - b_4)}{2 \cdot (1 - l) \cdot (1 - b_3 - l_3)},$$

где неизвестными являются величины β и λ .

В данном случае геометрические размеры основания пирамиды давления зависят не от величины нагрузки, а от величины относительного эксцентриситета.

Система уравнений может быть решена существующими численными методами.

По вычисленным значениям β и λ определяются размеры основания большой пирамиды B и L и объем единичной пирамиды давления $V_{\text{ед}}$ (при высоте пирамиды AS , равной 1):

$$B = \frac{b}{(1 - b)}; L = \frac{l}{(1 - l)};$$

$$V_{\text{ед}} = 1/6 \cdot B \cdot L \cdot (1 - \beta^3 - \lambda^3).$$

Максимальные угловые напряжения (в т. A) под подошвой фундамента будут равны высоте пирамиды давления при ее объеме, численно равном величине вертикальной силы, действующей на фундамент:

$$\sigma_1 = N / V_{\text{ед}}.$$

Угловые напряжения под подошвой фундамента в точках B и C соответственно будут равны: $\sigma_2 = \sigma_1 \cdot \beta$ и $\sigma_3 = \sigma_1 \cdot \lambda$.

Рассмотренная схема справедлива при пятиугольной форме сжатой зоны при значениях относительного эксцентриситета $\varepsilon_x < 0,5$; $\varepsilon_y < 0,5$ и $\varepsilon_x + \varepsilon_y > 1/3$.

При расчете по любой из трех приведенных схем распределения давления под подошвой фундаментов максимальные угловые значения давлений не должны превышать расчетного сопротивления грунта для угловых точек, равного $1,4R$ (R – расчетное сопротивление грунта, вычисляемое в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016).

Вычисленные длины сжатой части подошвы фундамента l_1 и l_2 позволяют определить площадь сжатой части подошвы фундамента, которая в соответствии с СП 20.13330.2016 должна составлять не менее 75 % всей площади фундамента.

Размеры отрываемой части подошвы фундамента позволят оценить вес грунта на обрезках фундамента сжатой и отрываемой частей и выполнить его конструирование в соответствии с СП 63.13330.2018.

Таким образом, используя разработанную методику, можно более точно выполнять расчет и конструирование внецентренно нагруженных фундаментов с учетом возможности частичного отрыва подошвы.

Выводы

1. Параметры зоны возможного отрыва под подошвой внецентренно нагруженного фундамента зависят не от величины вертикальной нагрузки, а от величины относительного эксцентриситета нагрузки.
2. Приведены способы определения формы основания пирамиды давления в зависимости от величины относительных эксцентриситетов нагрузки.
3. Показана возможность оценки величины максимальных сжимаемых напряжений в зависимости от формы и размера отрываемой части подошвы фундамента.
4. Методика позволяет конструировать внецентренно нагруженные фундаменты каркасных зданий с учетом возможности частичного отрыва подошвы с различными геометрическими формами отрыва.

Список литературы

1. Викторова, О.Л. Методика расчета внецентренно нагруженных столбчатых фундаментов с частичным отрывом подошвы /О.Л. Викторова, В.В. Викторов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4(41). – С.136–145.

References

1. Viktorova, O.L. Methodology for calculating off-center loaded columnar foundations with partial separation of the sole. /O.L. Viktorova, V.V. Viktorov // Regional architecture and engineering. – 2019. – №4(41). – P.136–145.

УДК 694.1

DOI 10.54734/20722958_2024_1_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

Карпов Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: Karpov5656@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

Karpov Vladimir Nikolayevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building Constructions»
E-mail: Karpov5656@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ ПОЛНОСБОРНОГО КРУПНОПАНЕЛЬНОГО ДЕРЕВЯННОГО ДОМА

В.Н. Карпов

Приведены результаты исследования пространственной работы полносборного крупнопанельного деревянного дома, заключающиеся в выявлении его действительной работы в местах взаимного пересечения стеновых панелей друг с другом и в местах крепления их к фундаментам. Были произведены расчеты дома как пространственной коробки при действии ветровых нагрузок, неравномерных осадок фундаментов. Рассмотрены различные варианты внешних воздействий, определены расчетные усилия в опорных и стыковых связях. Даны рекомендации по обеспечению надежности дома в процессе эксплуатации с учетом особенностей его пространственной работы.

Ключевые слова: полносборный крупнопанельный деревянный дом, пространственная работа, ветровая нагрузка, осадка фундаментов, стеновая панель, расчетная схема, варианты внешнего воздействия, сопряжения панелей, опорные и стыковые связи, условия эксплуатации

STUDYING SPATIAL WORK OF A FULLY PREFABRICATED LARGE PANEL WOODEN HOUSE

V.N. Karpov

The results of a study of spatial work of a fully prefabricated large-panel wooden house are presented, which consists of identifying actual operation in the places where the wall panels intersect with each other and in the places where they are attached to the foundations. Calculations have been carried out for the house as a spatial box under the action of wind loads, uneven settlement of panels and foundations. Various options of external influences are considered, and the calculated forces in support and butt connections are determined. Recommendations are given to ensure the reliability of the house during operation, taking into account the peculiarities of its spatial operation.

Keywords: fully prefabricated large-panel wooden house, spatial work, wind load, settlement of foundations, wall panel, design diagram, options for external influence, panel interfaces, support and butt connections, operating conditions

В настоящее время в стране идет интенсивное строительство жилых домов в рамках национальных проектов, других государственных и региональных программ, в том числе возводятся фельдшерско-акушерские пункты, дома культуры, библиотеки, отделения «Почта России» и др. Уже с 2023 года Президент РФ поручил использовать малоэтажные деревянные дома заводского изготовления для расселения аварийного жилья, а правительству – поддержать промышленное производство деревянного домостроения и отечественной деревообработки в условиях свертывания европейского рынка сбыта леса [<https://rossaprimavera.ru/news/23766400>]. При этом планируется более широко применять технологии деревянного домостроения в целом, использовать типовые проекты зданий, конечно, с соблюдением требований безопасности

[<https://tass.ru/nedvizhimost/17021867>]. Завершается выполнение 14 научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, посвящённых механической, сейсмической и пожарной безопасности объектов из дерева.

В данной работе рассматриваются некоторые вопросы механической безопасности деревянного дома, который собирается из небольшого числа крупных клееных панелей размером на всю стену. Их конструкция представляет собой ребристую систему, состоящую из двух обшивок из древесностружечных плит и несущего деревянного каркаса. Ввиду того что панели крупные, монтаж дома можно осуществить за один день, что является достоинством зданий подобного типа. Кроме того, они не требуют устройства массивных фундаментов. В комплект полносборного крупнопанельного деревянного дома кроме стеновых панелей входит определенное число крупных конструктивных элементов (панели перекрытия, кровельные щиты, элементы стропильной системы). Панели перекрытия и стеновые панели соединяются между собой с помощью болтов.

В ряде работ достаточно подробно описаны результаты исследования действительной работы панелей стен, перекрытий и покрытия (кровельных щитов), включая натурные испытания конструкций [1, 2, 3]. Указанные исследования проведены на нагрузки и усилия, действующие в плоскости каждой панели. Однако в процессе эксплуатации крупнопанельных домов имеет место действие на них ряда воздействий, не совпадающих с основной рабочей плоскостью несущих панелей. К таким воздействиям можно отнести ветровые нагрузки, неравномерные просадки оснований и фундаментов, температурно-влажностные воздействия, а также усилия, вызванные неточностями изготовления конструкций и их монтажа. Для восприятия таких усилий необходимо обеспечить пространственную работу конструктивных элементов дома путем надежного соединения их в местах взаимного сопряжения и крепления к фундаментам. Надежность пространственной работы дома существенным образом зависит от рабочих связей, находящихся в узлах взаимного сопряжения панелей стен, перекрытия и перегородок. В полносборных деревянных домах такими связями служат металлические болты. Был произведен расчет дома как пространственной коробки.

В процессе исследований ставилась задача выяснить действительную работу полносборного крупнопанельного дома в местах взаимного пересечения панелей друг с другом и крепления их к фундаментам, определить расчетные усилия в рабочих связях и дать рекомендации по обеспечению надежности в процессе пространственной работы дома на действие ветровых нагрузок, неравномерных осадок панелей и фундаментов, а также неточностей изготовления и монтажа. При этом расчетная модель дома рассматривалась как пространственная система, состоящая из взаимно ортогональных стержневых элементов.

Исходя из поставленных целей исследований учтем, что для реальной конструктивной схемы дома излишняя детализация расчетной схемы не повышает достоверность полученных результатов, а ведет лишь к неоправданному увеличению объема исходной информации, повышению трудоемкости расчета. Поэтому расчетная схема выбрана такая, которая позволяет при ограниченном числе элементов упростить расчет и в то же время отразить действительную картину работы дома. В связи с этим при выборе расчетной схемы было решено исключить стропильную систему дома и перекрытие, а для детального рассмотрения оставить только наружные стены и одну внутреннюю с условиями их фактического прикрепления к фундаменту. Стропильная система и перекрытие в этом случае рассматриваются как средство передачи внешней нагрузки на нижележащие панели дома. Стеновые панели в расчетной схеме приняты абсолютно жесткими в своей плоскости и при работе на кручение. Однако они обладают конечной изгибной жесткостью из плоскости, вдоль своей продольной оси. Каждая стена опирается на два опорных стержня. Кроме того, имеются горизонтальные опорные стержни, обеспечивающие неизменяемость расчетной схемы. Между собой панели в каждом сопряжении соединяются пятью стержнями: один вертикальный и четыре горизонтальных (по два взаимно перпендикулярных стержня в верхней и в нижней зонах стен). Описанная расчетная схема дома показана на рис. 1.

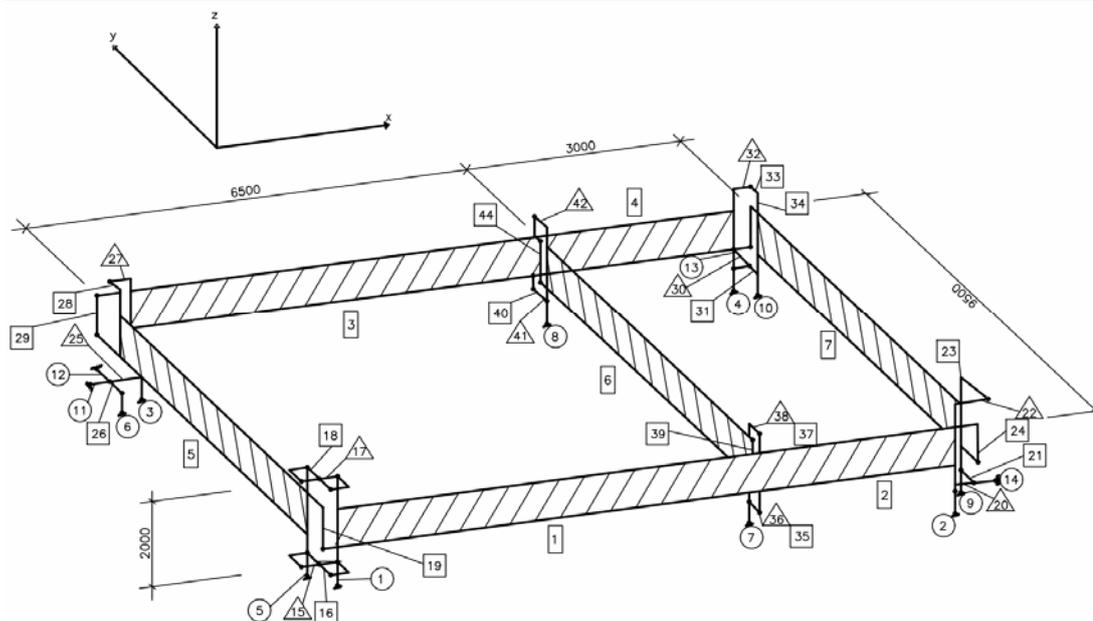


Рис. 1. Расчетная схема дома

Элементы, моделирующие стеновые панели, на рис. 1 заштрихованы. Стеновые панели, параллельные оси X , разбиты на два участка. Остальные стеновые панели имеют один участок. В каждом участке рассматриваются три сечения: два по концам и одно в середине его длины. Таким образом, в элементах, работающих на изгиб, рассматривается 21 сечение. На представленных рисунках приняты условные обозначения. Нумерация участков элементов, работающих на изгиб, приведена в прямоугольниках, нумерация опорных стержней – в кружках, при этом стержни с 1 по 10 – вертикальные, с 11 по 14 – горизонтальные. Как указывалось выше, в каждом сопряжении элементов расчетной схемы, моделирующих стеновые панели, имеется пять стержней. Два из них моделируют болтовые соединения панелей. Они расположены в горизонтальной плоскости, что препятствует взаимному смещению панелей в направлении болтов. Номера этих стержней помещены в треугольники. Остальные три стержня препятствуют взаимному смещению панелей в направлении, перпендикулярном направлению болтов, причем два стержня расположены в горизонтальной плоскости, один – в вертикальной. Номера этих стержней помещены в квадраты. На рис. 1 показано размещение стержней для сопряжения участков № 1 и № 5 наружных стен. Остальные сопряжения стен выполняются аналогично.

На рис. 2 и 3 показаны все горизонтальные стержни соответственно в нижнем и в верхнем уровнях.

Податливость стержней, моделирующих болтовое соединение, обеспечивается как податливостью самих болтов, так и деформативностью участка древесины, включенной в работу болтами в зоне соединения. Поскольку жесткость самих болтов оказывается значительно выше жесткости включенного в работу участка древесины, деформацией болтов пренебрегаем и учитываем лишь деформацию древесины при сжатии ее под болтами.

Учитывая, что выбор характеристик стержней является условным, провели исследование влияния жесткости стержней на исследуемые величины (усилия в стержнях, изгибающие моменты в сечениях, вертикальные смещения наружных стен в местах опирания). Для этой цели все расчеты по различным вариантам загрузки были выполнены дважды, при различных значениях жесткостей рассматриваемых стержней. Сначала все стержни наделялись характеристиками, соответствующими реальным, затем жесткость стержней (помечены на рис. 1 в квадратах) была взята на порядок ниже.

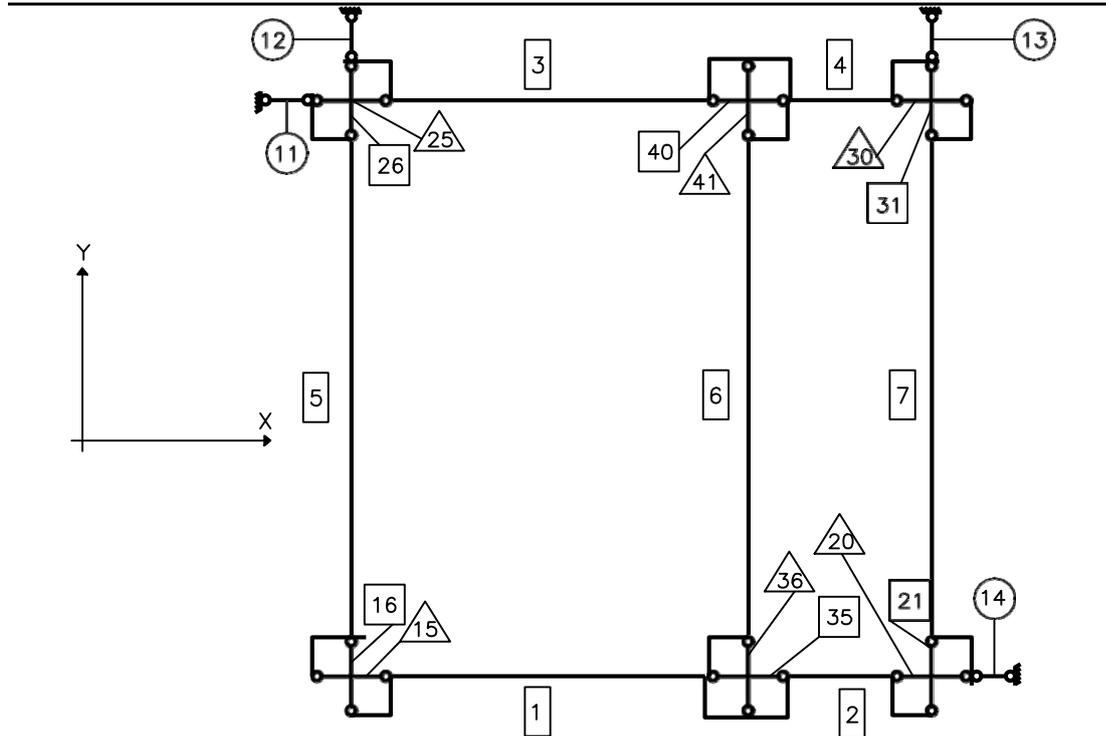


Рис. 2. Схема размещения нижних горизонтальных стержней

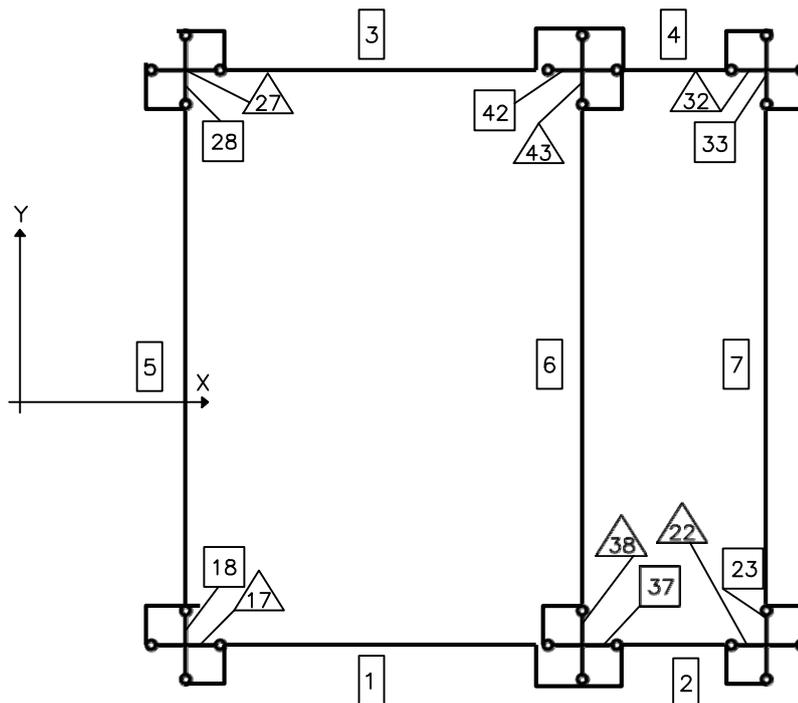


Рис. 3. Схема размещения верхних горизонтальных стержней

Все нагрузки, действующие на дом, можно подразделить на горизонтальные (ветровые) и вертикальные (нагрузка от собственного веса конструкций, снеговая и полезные). Кроме указанных нагрузок дом может испытывать воздействия, не предусмотренные нормальными условиями эксплуатации. К таким воздействиям можно отнести просадку грунтов, неравномерную осадку фундамента, пучение грунта.

Для исследования влияния указанных факторов было рассмотрено одиннадцать вариантов воздействий на расчетную модель дома.

По первому варианту в качестве воздействия рассматривалось смещение стержня №7 на 1 см, что соответствует смещению одного угла внутренней стеновой панели.

По второму варианту рассматривалось смещение стержней №7 и №8 на 1 см, что соответствует осадке всей внутренней стеновой панели.

По третьему варианту рассматривалось смещение стержня №1 на 1 см, что соответствует смещению одного угла наружной стеновой панели.

По четвертому варианту рассматривалось смещение стержней №1 и №5 на 1 см, что соответствует смещению угла дома.

По пятому варианту рассматривалось смещение стержней №2 и №9 на 1 см, что соответствует смещению другого угла дома.

По шестому варианту рассматривалось смещение стержней №2, №9, №4 и №10, что соответствует смещению двух смежных углов дома.

По седьмому варианту рассматривалось нагружение вертикальной нагрузкой, равной 1 кН/м (100 кг/м), одной наружной стены (участки №1 и №2 на рис. 1).

По восьмому варианту рассматривалось действие ветровой нагрузки вдоль оси X. При этом участок №5 стеновой панели испытывает давление ветра для II ветрового района (0,336 кН/м² – по расчету).

Участок №7 стеновой панели испытывает давление 0,21 кН/м².

По девятому варианту рассматривалось действие ветровой нагрузки вдоль оси Y. При этом участки №1 и №2 стеновой панели испытывают давление 0,336 кН/м², участки №3 и №4 – 0,21 кН/м².

По десятому варианту рассматривалось действие вертикальной нагрузки, равной 1,0 кН/м², на стеновые панели, параллельные оси X (участки №1, №2, №3, и №4), причем стержень №1 выключился из работы. Последнее достигалось тем, что жесткость этого стержня задавалась на несколько порядков меньшей, чем у других стержней.

По одиннадцатому варианту рассматривалось действие единичной вертикальной нагрузки, как и по десятому варианту, но в условиях, когда не работают стержни №1 и №5, что соответствует выключению из работы фундамента под одним из углов дома.

Для каждого варианта внешнего воздействия определялись внутренние усилия во всех стержнях (44 стержня), изгибающие моменты в сечениях стеновых панелей (21 сечение), перемещения вертикальных опор наружных стен (8 опор). Результаты расчета усилий в стержнях в местах сопряжения наружных стен на участках 1 и 5, а также 3 и 5 представлены в таблице.

Усилия в стержнях системы, Н

Номера стержней	Вариант нагружения										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-2266	-2257	13530	6406	-4140	1544	-4730	734,6	1,920	-0,035	-0,053
5	-2378	-7,100	-7125	3791	-1413,6	4,860	-14,89	2,310	395,1	-2506	-0,035
15	-11,99	0	10420	10450	-10440	0	0,025	-249,4	0,007	2641	5571
16	-5635	0	22,33	8964	-3329	0	0	0	-1518	7,80	3139
17	11,99	0	-10420	-10450	10440	0	-0,025	-3741	-0,007	-3641	-5571
18	5635	0	-22,33	-8964	3329	0	0	0	-1521	-7,80	-3139
19	-0,352	7,10	7135	-8,26	8,61	-4,86	14,89	-2,31	1,24	2509	1325
3	0,927	-2257	-5665	-5693	5683	1544	-0,014	731,3	-1,920	-6711	-7764
6	2370	-7,100	-27,20	-3789	1418	4,86	0	2,310	-395,1	-24,40	-1345
11	0	0	0	0	0	0	0	6982	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	-6982		0
25	11,99	0	-10420	-10450	10440	0	0	3242	-0,007	-3641	-5571
26	5635	0	-22,33	-8964	3329	0	0	0	-3403	-7,8	-3139
27	-11,99	0	10420	10450	-10440	0	0,015	-249,4	0,007	3641	5571
28	-5635	0	22,33	8965	-3329	0	0	0	364,5	7,80	3139
29	-7,456	-7,10	-17,80	-6,01	13,47	4,86	0	2,30	1,24	-21,12	-20,27

Для удобства проведения анализа полученных значений усилий все стержни были разделены на три группы в зависимости от характера их назначения:

1) опорные стержни с № 1 по № 14, отражающие опорное давление панелей на фундамент;

2) горизонтальные стержни № 15, 17, 20, 22, 25, 27, 30, 32, 36, 38, 41, 43, имитирующие работу болтов в стыках панелей;

3) горизонтальные стержни № 16, 18, 21, 23, 26, 28, 31, 33, 35, 37, 40, 42 и вертикальные стержни № 19, 24, 29, 34, 39, 44, имитирующие усилия взаимодействия панелей в местах их взаимного сопряжения.

Проведенный анализ работы каждой группы связей на рассматриваемые воздействия, а также выполненные расчеты позволили сделать следующие выводы:

1. Результаты расчета достаточно хорошо и правильно описывают действительную работу дома с учетом пространственного включения в работу всех его панелей. Рассмотренные для практических случаев расчета виды воздействий (11 вариантов) дают основания для выявления наиболее неблагоприятных загружений и условий эксплуатации дома.

2. Наиболее опасными воздействиями на дом в процессе его эксплуатации являются просадки отдельных его углов или панелей. В этом случае в работу включаются практически все опорные и стыковые (межпанельные) связи, воспринимающие при этом довольно значительные усилия.

3. Просадка в целом всей стены или двух параллельных стен вызывает меньшие усилия в связях, чем просадки, отмеченные в п.2. При этом ряд связей, как опорных, так и стыковых (между панелями), или не работают, или испытывают незначительные усилия.

По результатам исследований были разработаны рекомендации:

1. В целях уменьшения усилий в соединениях панелей между собой и с фундаментом необходимо не допускать вертикальных смещений панелей друг относительно друга, вызванных неточностями изготовления конструкций, установки болтов, отклонениями от горизонтальной плоскости цокольного перекрытия и направляющих опорных реек для панелей. Суммарные отклонения от горизонтального уровня не должны превышать 5 мм.

2. При расчете панелей стен на вертикальные нагрузки можно не учитывать пространственную работу всего дома, рассчитывая каждую панель отдельно на свою долю нагрузки.

3. Для более полного включения панелей в пространственную работу дома необходимо не допускать ослабления болтов в стыковых сопряжениях панелей, вызванных усушкой, просадкой и т.п. в процессе его эксплуатации, для чего периодически следует производить подтяжку соединительных болтов.

Список литературы

1. Вдовин, В.М. Полносорный деревянный дом из крупных промышленных панелей: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 148 с.

2. Вдовин, В.М. Несущие панели с применением древесностружечных плит для малоэтажного домостроения: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 144 с.

3. Вдовин, В.М. Экспериментально-теоретические исследования промышленных панелей полносорных домов: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов. – Пенза: ПГУАС, 2020. – 120 с.

References

1. Vdovin, V.M. Full-length wooden house from large industrial panels: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov. – Penza: PGUAS, 2015. – 148 p.

2. Vdovin, V.M. The bearing panels with use of chipboard for low-rise housing: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov. – Penza: PGUAS, 2014. – 144 p.

3. Vdovin, V.M. Experimental and theoretical studies of industrial panels of prefabricated houses: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov. – Penza: PGUAS, 2020. – 120 p.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 519.87: 697.956

DOI 10.54734/20722958_2024_1_121

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

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

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

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

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

*Автономная некоммерческая
образовательная организация высшего
профессионального образования
«Сколковский институт науки
и технологий»*

*Autonomous non-profit educational
organization of Higher Professional Education
«Skolkovo Institute of Science and
Technology»*

Россия, 121205, г. Москва, Территория
Инновационного Центра
«Сколково», Большой бульвар д.30, стр.1,
тел. +7 (495) 280 14 81

Russia, 121205, Moscow, Territory of the
Skolkovo Innovation Center, 30, building 1,
Bolshoi boulevard,
tel.: +7 (495) 280 14 81

Кошев Николай Александрович,
кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель
E-mail: nikolay.koshev@gmail.com

Koshev Nikolay Aleksandrovich,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Senior lecturer
E-mail: nikolay.koshev@gmail.com

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г.Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09

Penza State university
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 36-82-09

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационное
обеспечение управления и производства»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

Ponomareva Inna Konstantinovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Information Support
Management and Production»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПРИ ГОРЕНИИ СВЕЧЕЙ В ХРАМЕ В УСЛОВИЯХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ВЫТЯЖКИ ВОЗДУХА

В.В. Кузина, Н.А. Кошев, И.К. Пономарева, А.Н. Кошев

Приводятся математические модели и численные эксперименты по исследованию распределения технического углерода (копоти и сажи) в условиях принудительной вертикальной вытяжки и горизонтального движения воздуха. Для расчета параметров

исследуемых процессов составлен вычислительный алгоритм, реализованный на языке программирования Python, что позволило визуализировать исследуемые конвективные потоки.

Ключевые слова: тепловой источник, конвективный поток, диффузия, технический углерод, копоть, сажа, математическое моделирование, источник горения

CALCULATION OF CONVECTIVE DIFFUSION OF CARBON BLACK BY THE BURNING OF CANDLES IN THE TEMPLE IN THE CONDITIONS OF VERTICAL AIR EXTRACTION

V.V. Kuzina, N.A. Koshev, I.K. Ponomareva, A.N. Koshev

The authors present mathematical models and numerical experiments based on them to study the distribution of carbon black (soot and carbon black) in the conditions of forced vertical exhaust. To calculate the parameters of the processes under study, a computational algorithm, implemented in the Python programming language has been compiled, which allowed to visualize the investigated convective flows.

Keywords: heat source, convective flow, diffusion, carbon black, soot, mathematical modeling, church candle, worship hall

В [1] представлена разработанная методика измерения массовой концентрации копоти и сажи при сжигании свечей и расчета воздухообмена для их ассимиляции в залах богослужения соборов, храмов и церквей с учетом имеющейся нормативной базы. Там же приведены результаты экспериментальных измерений количества сажи, образующейся при сгорании свечей различного размера за определенные временные интервалы. Показана необходимость использования вытяжных устройств для удаления продуктов горения и улучшения санитарного состояния атмосферы помещения.

Очевидно, что большое значение имеет не только общее количество образующихся копоти и сажи, но и их распределение в пространстве помещения в зависимости от конвективных потоков внутреннего воздуха.

В работах [2, 3] рассмотрены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований конвективно-диффузионного распространения технического углерода (копоти и сажи) при горении свечей в помещении богослужения. Показано, в частности, что конвективная составляющая конвективной диффузии копоти и сажи в ряде случаев является преобладающей и при наличии горизонтального движения воздуха происходит существенное загрязнение большого объема помещения техническим углеродом. Очевидно, что для улучшения экологической и санитарной обстановки в зале богослужения необходимо применять принудительную вытяжную вентиляцию воздуха с помощью вертикального вытяжного устройства в виде зонта, позволяющего улавливать и удалять значительное количество копоти и сажи за пределы замкнутого пространства помещения (рис. 1). При этом важной остается задача моделирования и расчета конвективно-диффузионного распространения технического углерода за пределы области принудительной вытяжки отработанного воздуха с целью определения режимов работы вытяжного устройства.

Для моделирования конвективно-диффузионных процессов и распространения примеси в замкнутой трехмерной области традиционно используется классическое дифференциальное уравнение [4]:

$$D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial}{\partial x} (Cv_1) - \frac{\partial}{\partial y} (Cv_2) - \frac{\partial}{\partial z} (Cv_3) = 0, \quad (1)$$

где $C = C(x, y, z)$ – концентрация загрязняющей примеси в единице объема воздуха; v_1, v_2, v_3 – компоненты вектора скорости воздушного потока $v(x, y, z)$; D – эффективный коэффициент диффузии.

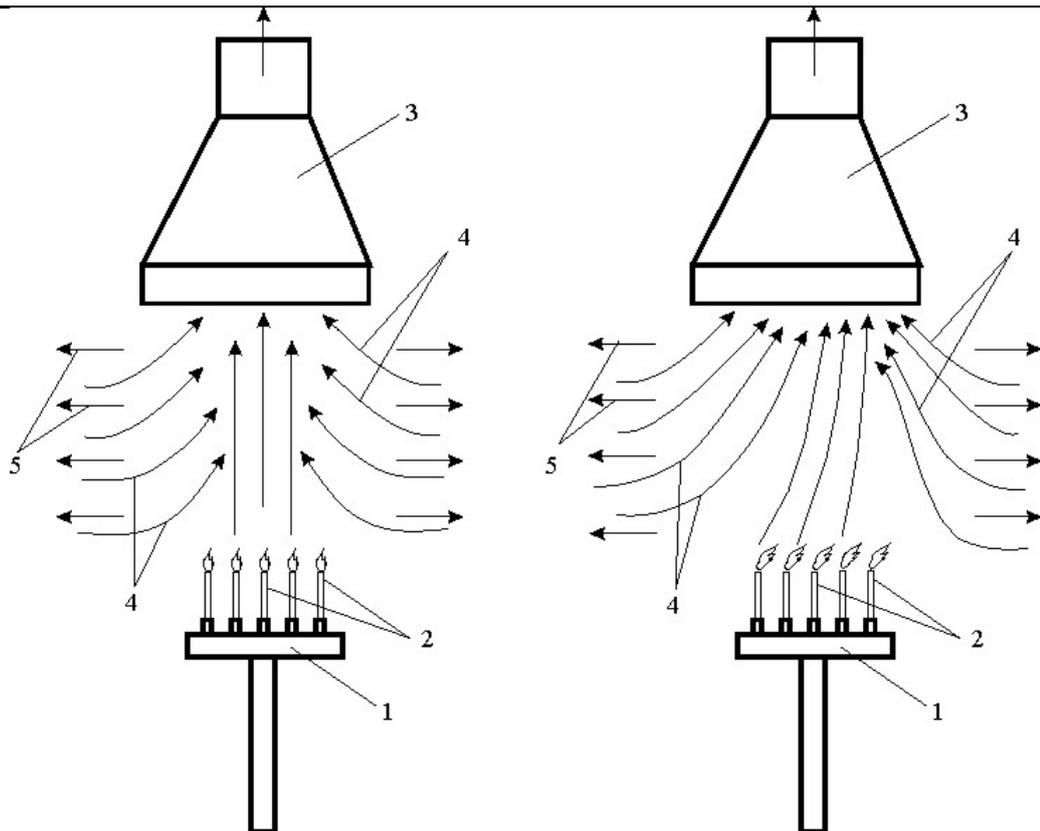


Рис. 1. Схематичное изображение конвективных и диффузионных потоков, создаваемых точечными тепловыми источниками без горизонтального движения воздуха (а) и при его наличии (б):

1 – подсвечник; 2 – горящие свечи; 3 – вытяжной зонт;
4, 5 – конвективные и диффузионные потоки, соответственно

Величина коэффициента диффузии в большинстве случаев представляет собой некоторую эффективную скалярную величину, не зависящую от координаты, что позволяет вынести эту константу за знак дифференцирования, а вектор скорости может быть зависим от координат точки, в которой он измеряется. Из постановки задачи и расположения источника горения принимается допущение, при котором расчетная область представляется плоским прямоугольником, на одной (нижней) стороне которого расположен источник горения, а на противоположной – вытяжное отверстие (рис. 2).

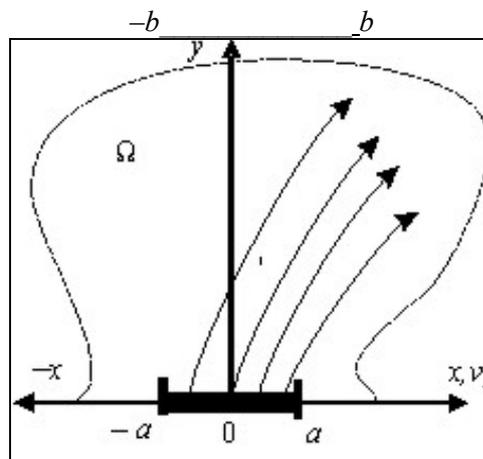


Рис. 2. Вид расчетной области: источник горения постоянной мощности, действующий на участке нижней границы $[-a, a]$ плоского сечения ограниченного пространства и вытяжное отверстие на участке верхней границы $[-b, b]$

В случае нестационарной конвективной диффузии в плоской воздушной среде помещения, обусловленной вертикальной вентиляцией, распространение технического углерода (копоти и сажи) от постоянно горящего источника определяется как диффузионной, так и конвективной составляющей. При этом в ряде случаев неправомерно пренебрегать зависимостью скорости вертикального воздушного потока от выбора точки измерения, то есть от координаты по оси Oy . В рассматриваемом случае распределение концентрации сажи, в зависимости от времени и координат точки на плоскости, описывается следующим нестационарным уравнением конвективной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + v \nabla C + C \nabla v, \quad (2)$$

где $v = (v_x, v_y)$ – вектор скорости движения воздушной смеси; ∇ – оператор дивергенции вектора.

В первом приближении будем считать, что горизонтальной составляющей вектора скорости движения воздуха можно пренебречь и $v = v_y, v_x = 0$. Тогда уравнение (2) упрощается к виду:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + C \frac{\partial v_y}{\partial y}. \quad (3)$$

Скорость воздушного потока и скорость движения вверх сажи, при её вертикальной вытяжке, в общем случае не являются одинаковыми из-за действия на частицы копоти и сажи силы тяжести. Добавив в правую часть уравнения (3) еще одно слагаемое, отражающее оседание взвешенных частиц со скоростью w , получим:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + C \frac{\partial v_y}{\partial y} - Cw. \quad (4)$$

Размеры и вес каждой частицы незначительны: в первом приближении воздействием силы тяжести на образующуюся при горении сажу можно пренебречь.

На рис. 3, 4 представлены результаты расчетов, полученные при решении задач моделирования распределения технического углерода, учитывающих отдельно наличие вертикального и горизонтального движения воздуха.

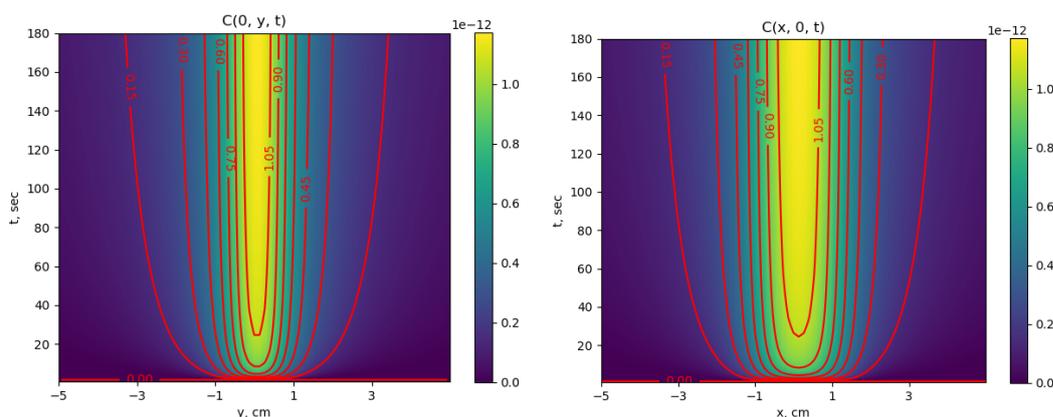


Рис. 3. Вид плоской диффузии технического углерода без учета конвекции в плоскости (y, t) , (x, t) вертикального сечения пространства

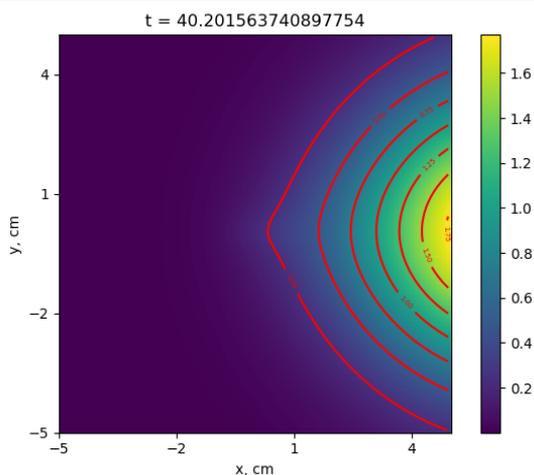


Рис. 4. Распределение конвективной диффузии продуктов горения в плоскости (x,y) вертикального сечения пространства без учета вертикального движения воздуха

Как видим:

- без наличия горизонтального движения воздуха распределение копоти и сажи в горизонтальном направлении существенно значительнее, чем в вертикальном;
- при наличии горизонтального движения воздуха происходит существенное смещение распределения копоти и сажи в направлении движения воздуха.

Из этого можно заключить, что в первом случае происходит существенное загрязнение воздуха в ограниченном пространстве, окружающем источник горения, а при наличии горизонтального движения наблюдается загрязнение значительно более обширной области помещения.

Можно утверждать, что для улучшения санитарного состояния воздуха в помещении с открытыми источниками горения необходимо использовать дополнительные очистные устройства и устройства для улавливания и удаления технического углерода, образующегося в процессе горения открытых точечных источников.

Закономерности конвективной диффузии распределения технического углерода при наличии вертикального движения воздуха (вытяжки) без учета горизонтального движения воздуха описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + v_y \frac{\partial C}{\partial y}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \begin{cases} p(x, \tau) & \text{при } -a \leq x \leq a, \\ 0 & \text{при } x \notin [-a, a]. \end{cases} \quad (6)$$

Результаты расчетов по модели (5) с краевым условием (6) представлены на рис. 5.

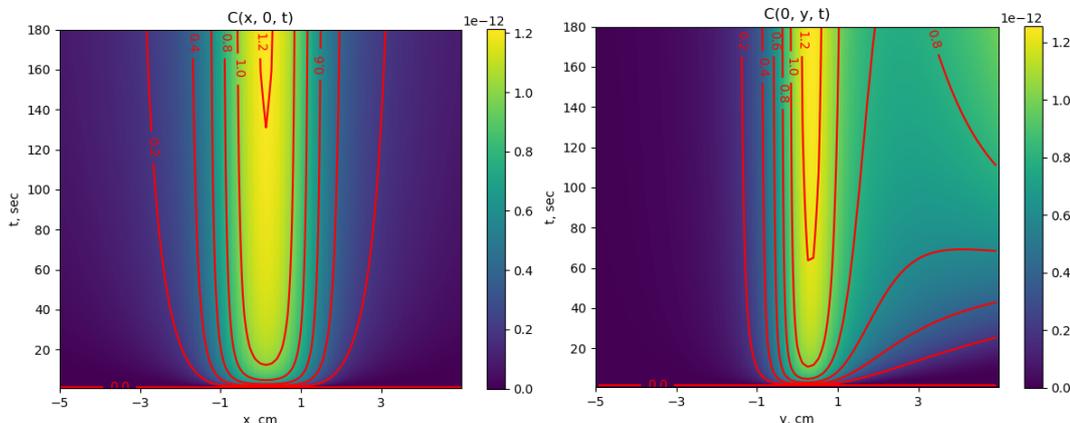


Рис. 5. Распределение конвективной диффузии продуктов горения в плоскости (x,y) вертикального сечения пространства при наличии вытяжки воздуха, обеспечивающей вертикальное движение воздуха со скоростью 0,2 см/с

Из рис. 3–5 видно, что обеспечение вытяжки воздуха над объектом горения даже с незначительной скоростью 0,2 см/с положительно влияет на степень как вертикального, так и горизонтального распределения образующихся копоти и сажи, что благоприятно для санитарного состояния воздуха в помещении.

Очевидно, что особый интерес представляет математическое моделирование распределения сажи при наличии вытяжного устройства, обеспечивающего вертикальное движение воздуха в присутствии горизонтального движения воздуха (горизонтальное перемещение внутреннего воздуха). В этом случае задача моделирования и математическая модель значительно усложняются, так как решаемая задача должна рассматриваться в трехмерном пространстве: времени (t) и декартовых координатах – горизонтальной (x) и вертикальной (y) осях. Приведем математическую модель диффузионно-конвективного распределения технического углерода для этого случая.

В соответствии с предыдущими замечаниями (уравнение (1), краевое условие (6)) моделирующее дифференциальное уравнение выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + v \nabla C + c \nabla v, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \begin{cases} p(x, \tau) & \text{при } -a \leq x \leq a, \\ 0 & \text{при } x \notin [-a, a]. \end{cases} \quad (8)$$

Посредством замены искомой функции c новой неизвестной функцией G , так что

$$c = G(x, y, t) \varphi_s(x, y) \varphi_t(t),$$

$$\varphi_s = \exp\left(-\frac{v_x}{2D}x - \frac{v_y}{2D}y\right), \varphi_t = \exp\left(-\frac{|v|^2}{4D}t\right),$$

задача преобразуется к виду, удобному для поиска решения с использованием преобразования Фурье со специальным ядром [4, с. 492]. При этом решение представимо в интегральной форме следующего вида:

$$G(x, y, t) = \frac{h}{4\pi a^2} \int_0^t \frac{d\tau}{(t-\tau)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} d\xi \int_0^{+\infty} d\eta (y+\eta) f(\xi, \tau) \exp\left[-h\eta - \frac{(x-\xi)^2 + (y+\eta)^2}{4a^2t}\right]. \quad (9)$$

Здесь $a^2=D$, $h=v_x/2a^2$, $f(x,t)=(2D/v_y)\varphi_s^{-1}(x,0)\varphi_t^{-1}(t)p^+(x,t)$; функция $p^+(x,t)$ определена в области поиска решения $[-B,B] \times [0,B]$ – дополненная нулями функция $p(x,t)$ из выражения (8).

На рис. 6 представлены результаты расчетов по описанной математической модели и уравнению (9) при следующих значениях параметров: мощность источника горения (мг/с) $p(x,t) = 1$, $x \in [-a,a]$; коэффициент диффузии (см/с) $D = 10^{-3}$; расчетная область $-1 \leq x \leq 1$; $-1 \leq y \leq 1$; $10^{-6} \leq t \leq 100$, при этом x, y измеряются в метрах, а время – в секундах; источник горения находится в области $[-5, 5]$ см; плотность расчетной сетки: $50 \times 50 \times 300$ по осям x, y, t соответственно.

Представленные результаты расчетов на основе математического моделирования позволяют сделать практические выводы:

1. При сравнимых скоростях вертикального и горизонтального движения воздуха ($v_x = v_z = 10^{-2}$) происходят пропорциональное размытие пятна сажи вверх и смещение его в сторону движения воздуха.

2. Когда горизонтальная скорость движения воздуха значительно меньше вертикальной ($v_x = 10^{-3}$; $v_z = 10^{-2}$), наблюдается существенное размытие сажи вверх и малозначимое в сторону движения воздуха.

3. При недостаточной вытяжке, по сравнению с горизонтальным движением ($v_x = 10^{-2}$; $v_z = 10^{-3}$), пятно сажи смещается в сторону и незначительно вверх.

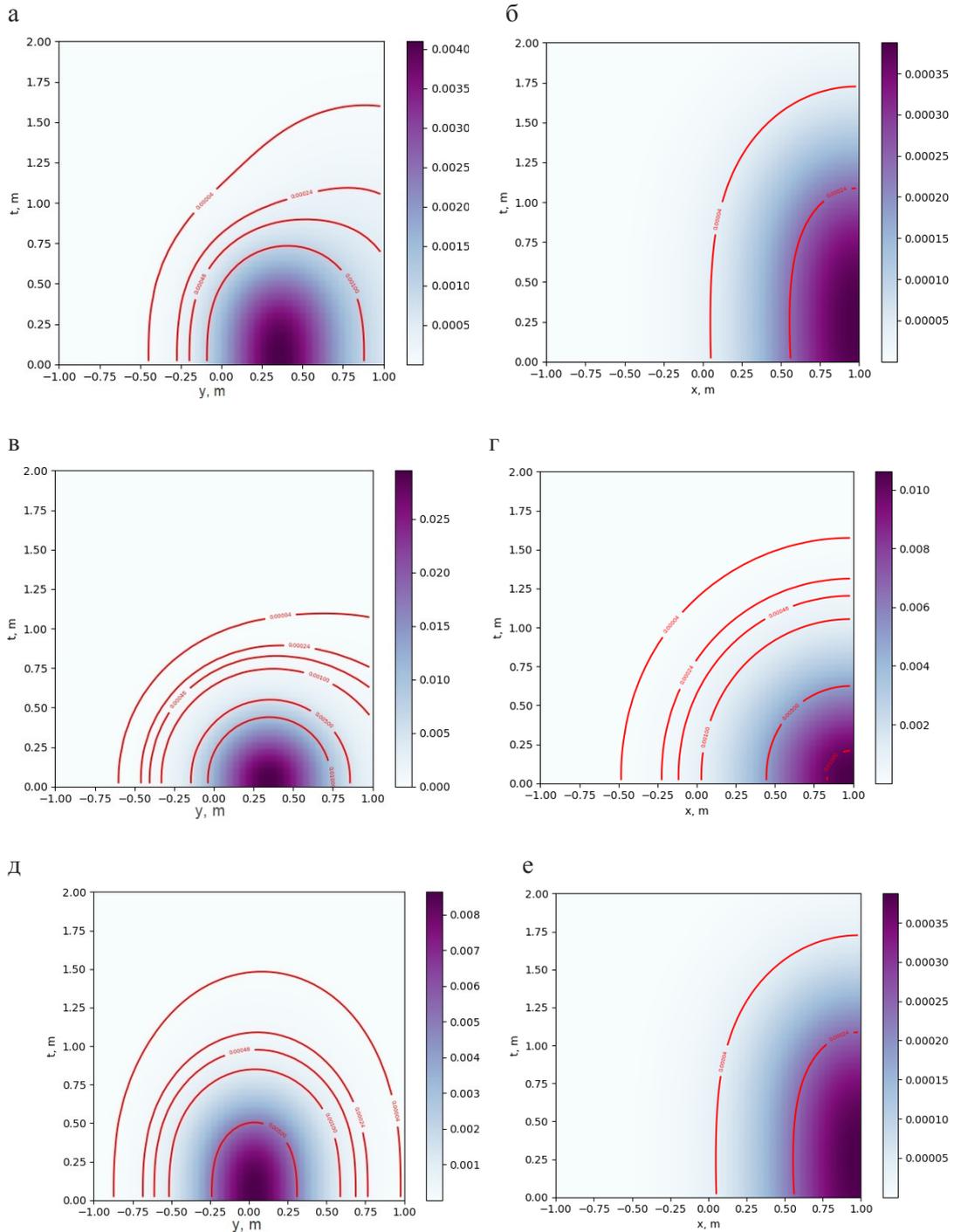


Рис. 6. Распределение сажи во времени по осям Oy (а, в, д) и Ox (б, г, е) при различных соотношениях скоростей горизонтального и вертикального движения воздуха (см/с):
 а, б – $v_x = v_z = 10^{-2}$; в, г – $v_x = 10^{-2}$; $v_z = 10^{-3}$; д, е – $v_x = 10^{-3}$, $v_z = 10^{-2}$

Сделанные выводы свидетельствуют о том, что режимы местной вытяжной вентиляции над множеством горящих на подставке свечей должны быть научно обоснованы. В частности, можно предположить, что для обеспечения эффективной работы вертикальной вытяжки воздуха ее мощность должна быть таковой, чтобы скорость вертикального движения воздуха была сравнимой или большей, чем скорость горизонтального потока воздуха.

В данной работе рассмотрены разработанные математические модели и результаты проведенных численных исследований распределения копоти и сажи в условиях естественной диффузионной конвекции и принудительной вертикальной вытяжки как без учета горизонтального движения воздуха, так и при горизонтальной составляющей конвективного переноса сажи.

Для точного расчета количества технического углерода, выделяющегося из открытого источника горения в замкнутом помещении, а не только интенсивности его распределения в горизонтальной плоскости области горения необходимо рассматривать трехмерную модель конвективной диффузии копоти и сажи при сгорании определенного вещества, в частности, при горении свечей в зале богослужения. При этом важное значение имеет также точность определения параметров, коэффициентов и констант, участвующих в математическом описании процесса горения.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Будак, Б.М. Сборник задач по математической физике / Б.М. Будак, А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. – 4-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 689 с.
5. Еремкин, А.И. Разработка и апробация методики расчета воздухообмена на основе определения концентрации сажи и копоти в воздухе при сгорании церковных свечей в православных культовых сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева // Приволжский научный журнал. – 2022. – № 2. – С. 119–127.

References

1. Eremkin, A.I. Theoretical and experimental studies to determine the mass concentration of soot and soot in the air of worship halls / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva [et al.] // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1. – P. 84–87.
2. Kuzina, V.V. Mathematical modeling of passive impurity transfer processes in a limited space / V.V. Kuzina, A.N. Koshev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No 4(33). – P. 133–141.
3. Kuzina, V.V. Mathematical modeling of the distribution of convective flow over compactly located point heat sources / V.V. Kuzina, A.N. Koshev, A.I. Eremkin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No 1(50). – P. 75–80.
4. Budak, B.M. Collection of problems on mathematical physics / B.M. Budak, A.A. Samarsky, A.N. Tikhonov. – 4th ed., ispr. – M.: FIZMATLIT, 2004. – 689 p.
5. Eremkin, A.I. Development and approbation of a method for calculating air exchange based on determining the concentration of soot and soot in the air during the combustion of church candles in Orthodox religious buildings / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva // Volga Scientific Journal. – 2022. – No. 2. – P. 119–127.

УДК 698

DOI 10.54734/20722958_2024_1_129

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

Аверкин Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Петрова Ксения Александровна,
магистрант кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

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

Eremkin Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Averkin Aleksandr Grigorevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat and Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Petrova Kseniya Aleksandrovna,
Master student of the department «Heat and
Ventilation»

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

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ЗАКОНОМЕРНОСТЬ РАЗВИТИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО, ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО, НАСТИЛАЮЩЕГОСЯ ПОТОКА ВДОЛЬ ВНУТРЕННЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова

Актуальность исследования связана с сохранением историко-культурного наследия в культовых православных сооружениях. В период богослужения в зале сжигаются церковные свечи, в результате горения которых выделяются копоть и сажа, оседающие на убранстве, в результате ему наносится непоправимый ущерб. Для придания убранству прежнего привлекательного вида требуются значительные затраты на реставрационные работы. Установлено, что воздух, загрязненный продуктами горения свечей, тепловыми потоками от нагретой поверхности, переносится в объем помещения. Одним из источников нагретой поверхности в зале богослужения является отопительный прибор, образующий конвективные потоки. Исследовались закономерности движения и разработана модель развития пристенного, плоского, полуограниченного, настилающегося конвективного потока от отопительного прибора вдоль охлажденной вертикальной поверхности стены.

Авторами предложено устройство, устанавливаемое над отопительным прибором, в виде горизонтальной направляющей с профилем внутри в виде дуги для обеспечения отклонения загрязненного конвективного потока от стены вовнутрь помещения. Разработана модель развития отклоненного, плоского, свободного конвективного потока. Экспериментально определены значения температуры на внутренней поверхности наружной системы для сравнения с условием отклонения потока и при его вертикальном движении. Для случая с отклонением потока установлено, что температура на внутренней поверхности стены выше температуры точки росы. Доказано, что приме-

няемое устройство обеспечивает устойчивое отклонение загрязненного потока от стены и размещенного на ее поверхности убранства. Это позволяет сохранить историко-культурное наследие и сократить затраты на реставрационные работы.

Ключевые слова: климатизация, температура точки росы, температура воздуха, скорость воздуха, температура внутренней поверхности стены, конвективный поток, отопительный прибор, убранство, церковная свеча, копоть и сажа, храм, полуограниченный, настилающийся поток, модель развития конвективного потока, реставрация, структура конвективного потока

CONVECTIVE HEAT TRANSFER AND REGULARITY OF DEVELOPMENT OF VERTICAL, SEMI-LIMITED OVERLAYING FLOW ALONG THE INNER VERTICAL SURFACE OF THE OUTER FENCE

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova

The relevance of the study is related to the preservation of historical and cultural heritage in Orthodox religious buildings. During the service, church candles are burned in the hall, as a result of combustion soot and carbon beach are released, settling on the decoration, causing irreparable damage to it. To give the decoration its former attractive appearance, significant costs for restoration work are required. It has been established that polluted air, products of burning candles, and heat flows from a heated surface, is transferred into the room. One of the sources of the heated surface in the worship hall is a heating device that generates convective currents. In this work, the patterns of movement are studied and a model for the development of a near-wall, flat, semi-limited overlying convective flow from a heating device along a cooled vertical wall surface is developed.

The authors have developed a device above the heating device in the form of a horizontal guide with a profile inside in the form of an arc to ensure the deflection of contaminated convective flow from the wall into the interior of the room. A model for the development and deviation of a flat, free convective flow has been developed. The temperature values on the inner surface of the external system were determined experimentally for comparison with the condition of flow deflection and with its vertical deflection. For the case with flow deflection, it was found that the temperature on the inner surface of the wall is higher than the dew point temperature. It has been proven that the device used ensures a stable deflection of the contaminated flow from the wall and the decoration placed on its surface. It allons to preserve the historical and cultural heritage and reduce the costs of restoration work.

Keywords: climatization, dew point temperature, air temperature, air speed, internal surface temperature, convective flow, heating device, decoration, church candle, soot and carbon beach, temple, semi-confined, overlapping flow, convective flow development model, restoration, convective structure flow

Климатизация в залах богослужения православных культовых сооружений осуществляется системами вентиляции и кондиционирования, а также с применением большого количества отопительных приборов, установленных возле наружных стен и под окнами. Конструктивной особенностью православных сооружений является наличие в зале высоких наружных стен и охлажденных поверхностей остекления. Установлено, что независимо от периода года температура на внутренней поверхности наружных ограждений $t_{вн}$, °С, ниже температуры внутреннего воздуха $t_{в}$, °С.

Наряду с этим в период богослужения в зале сжигаются лампадное масло в большом количестве и церковные свечи, расположенные на подсвечниках и в руках прихожан. В результате горения свечей выделяются теплота, влага, копоть, сажа и углекислый газ, которые тепловыми воздушными потоками разносятся в объеме помещения, настилаются на стены и храмовое убранство. Установлено, что загрязненный тепловой поток от нагретых поверхностей отопительных приборов поднимается вверх, настилается на внутреннюю поверхность наружной стены и на расположенные на ней иконы, живопись, фрески, золочение и другое убранство, которое приобретает неприглядный внешний вид, требует значительных финансовых затрат на проведение реставрационных работ.

В ходе исследования развития конвективного потока (рис. 1) предложено решение перенаправить восходящий конвективный поток от стены вовнутрь помещения (рис. 2),

что позволит исключить обтекание стены и церковного убранства загрязненным воздухом.

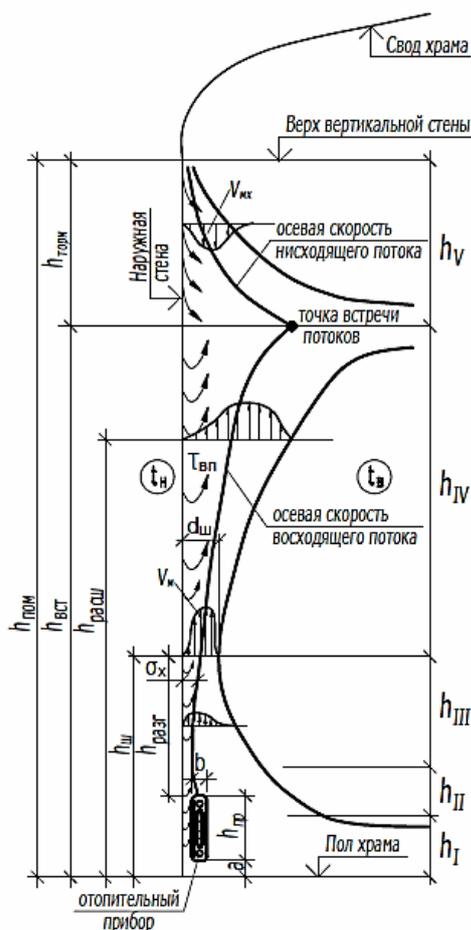


Рис. 1. Модель развития плоского пристенного, нагретого, полуограниченного, настилающегося конвективного потока от отопительного прибора вдоль вертикальной охлажденной поверхности наружного ограждения:

h_I – пассивный участок; h_{II} – активный участок; h_{III} – разгонный участок; h_{IV} – участок расширения; h_V – застойный участок, b – ширина отопительного прибора; a – высота установки отопительного прибора над полом; $h_{разг}$ – высота разгонного участка потока, $h_{ш}$ – расстояние от пола до шейки потока; $h_{расш}$ – высота участка расширения потока; $h_{встр}$ – расстояние до встречи восходящего и нисходящего потоков; $h_{пом}$ – высота помещения

Для реализации предлагаемого авторами решения рассмотрены закономерности развития вертикальной, плоской, полуограниченной конвективной струи воздуха, образующейся вдоль охлажденной внутренней поверхности наружной стены при $t_{вп} < t_{в}$. Предполагается, что конвективная струя воздуха образуется от локальной нагретой поверхности отопительного прибора, установленного в зале богослужения возле наружной стены и под остеклением. Закономерности развития вертикальной струи воздуха вдоль нагретой и охлажденной поверхностей исследованы Абрамовичем Г.Н., Богословским В.Н., Зельдовичем Я.Б., Кочевым А.Г., Лыковым А.В., Михеевым М.А., Талиевым В.Н., Шепелевым И.А. и др.

Рассмотрим случай, когда конвективный поток образуется от нагретого тела в виде поверхности отопительного прибора. При этом тело условно можно представить как объемную форму, имеющую высоту $h_{пр}$, м, ширину $b_{пр}$, м, и длину $L_{пр}$, м. В верхней части отопительный прибор имеет форму прямоугольника площадью $L_{пр} \cdot b_{пр}$ и является началом образования восходящего конвективного потока. Если отопительный прибор расположен около охлажденной поверхности ограждения, то конвективный поток настилается на его поверхность. Такой поток принято называть плоским, настилающимся и полуограниченным.

Модель развития полуограниченного, плоского, настилающегося конвективного потока, ограниченного с одной стороны охлажденной поверхностью, представлена на рис. 1. Конвективный поток, поднимающийся над отопительным прибором, условно допустимо разделить на пять зон.

При построении модели и оценке развития неизотермического, пристенного, нагретого, полуограниченного, настилающегося конвективного потока вдоль внутренней охлажденной поверхности наружной стены использовались известные фундаментальные основы и закономерности процессов течения потоков воздуха от нагретых поверхностей и вентиляционных струй. Проведенный анализ восходящего конвективного потока от нагретой поверхности отопительного прибора, состоящего из пяти характерных участков высотой h_I , h_{II} , h_{III} , h_{IV} , h_V (см. рис. 1), которые отличаются друг от друга изменением расхода воздуха L_k , м³/ч, температурой t_k , °С, скоростью v_k , м/с, и характером ламинарного и турбулентного течения.

На пассивном участке высотой h_I наблюдается незначительное подтекание прилегающего воздуха L_k , м³/ч, к поверхности нагрева отопительного прибора при низких v_k , м/с, и t_k , °С. Далее происходит подтекание воздуха к поверхности нагрева относительно прибора под углом 90°, в результате усиливается интенсивность течения потока на высоте h_{II} , образуется активный участок. Затем нагретый отопительным прибором конвективный поток воздуха образует разгонный участок высотой h_{III} , который настиляется на внутреннюю поверхность наружного ограждения. Высота разгонного участка h_{III} равна высоте участка разгона $h_{разг}$ и ограничивается высотой, равной $h_{разг}=1,5h_{пр}$. Ускорение движения конвективного потока на разгонном участке приводит к образованию узкой части сечения – «шейки» – потока с максимальной скоростью движения воздуха v_m , м/с, диаметром шейки $d_{ш}$, м, и $h_{ш}$, м (см. рис. 1). Затем на участке h_{IV} , м, конвективный поток начинает монотонно расширяться за счет подтекания с одной стороны плоского потока прилегающего загрязненного воздуха из помещения и далее встречается с ниспадающим потоком на высоте $h_{встр}$, м, и растворяется в окружающем воздухе помещения.

Ниспадающий поток за счет охлажденной поверхности верхней части стены образуется на уровне ниже потолка зала богослужения, в зоне создания воздушной «тепловой подушки», т.е. в зоне торможения высотой $h_{торм}=0,12 h_{пом}$. Возникновение зоны торможения является особенностью конвективного потока возле охлажденной поверхности и зависит от расстояния, температуры и снижения скорости воздуха в верхней части охлажденного ограждения.

На холодной внутренней поверхности стены при $t_{в.м.}<t_{в}$ сверху образуется гравитационный поток, направленный вниз, а нагретый движется вверх. Эти два потока – нагретый поступает снизу и охлажденный сверху со скоростью $v_{мх}$, м/с, – в начале встречи взаимодействуют между собой в зоне $h_{встр}=0,88 h_{пом}$. При этом происходит торможение движения восходящего конвективного потока. Если высота встречи восходящего и нисходящего потоков $h_{встр}\geq h_{пом}$, конвективный поток достигает верха ограждения; если $h_{встр}<0$, ниспадающий конвективный поток достигает низа ограждения.

Во всех вариантах точка встречи двух потоков занимает промежуточное положение (см. рис. 1). При слиянии восходящего и нисходящего потоков образуется общий поток воздуха, который может быть направлен перпендикулярно к поверхности ограждения, а также как в верхнюю, так и в нижнюю зону помещения. Важно создать температурные условия, исключая движение смешанного потока вниз, во избежание переохлаждения поверхности стены и нижней зоны помещения.

Известно, что режим течения в настилающемся потоке является турбулентным, а около поверхности образуются пограничные слои: ламинарный подслой и пристенный турбулентный. Размеры пограничных слоев значительно меньше размеров внешнего пограничного слоя (см. рис. 1).

Для расчета неизотермического конвективного потока предлагается использовать известное уравнение для определения профиля скорости v , м/с, и избыточной

температуры воздуха $t_{изб}$, °С, в любой точке поперечного сечения конвективного потока в виде экспоненты:

$$v = v_m \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{cx} \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$t_{изб} = t_m \left[-\frac{\delta}{2} \left(\frac{y}{cx} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где v и $t_{изб}$ – скорость и избыточная температура воздуха в произвольной точке конвективного потока; v_m и t_m – максимальные скорость и избыточная температура воздуха на оси конвективного потока; y – расстояние по нормали до произвольной точки в сечении потока; c и δ – экспериментальные постоянные; x – расстояние по горизонтали до произвольной точки в сечении потока.

Настилающийся, полуограниченный конвективный поток от отопительного прибора оказывает положительное воздействие, обеспечивая температуру на внутренней поверхности наружной стены $t_{в.п.}$, °С, выше температуры точки росы $t_{т.р.}$, °С. В то же время конвективный поток, загрязненный продуктами сгорания церковных свечей в виде копоти и сажи, настилается на поверхности стен и церковного убранства в зале богослужения.

Известно, что после 10 лет эксплуатации храмов убранство в зале богослужения предлагается подвергать «отмывке», затраты на которую составляют 5-10 % от стоимости первоначальной росписи. При длительной, от 20 лет и более, эксплуатации храмов и залов богослужения убранство приобретает неприглядный внешний вид из-за налипания смолянистой копоти и сажи на поверхностях. Требуются значительные затраты, около 20-30 % от стоимости первоначальной росписи, на реставрационные работы. Практика показала, что стоимость работ достигает от 20 до 60 тыс.руб. за 1 м² площади реставрации.

Для решения проблемы сохранности убранства от загрязнения в зале богослужения авторами разработано устройство для улавливания и удаления продуктов сгорания церковных свечей в местах их образования в сочетании с системой местной механической вытяжной вентиляции¹.

В целях более эффективного решения проблемы ликвидации загрязнений авторами предложено устройство над отопительным прибором в виде горизонтальной направляющей конвективного потока внутри с профилем в форме дуги².

Условная модель развития отклоненного плоского, нагретого, свободного конвективного потока от отопительного прибора в зоне вертикальной охлажденной поверхности наружной стены представлена на рис. 2.

При данном устройстве профиль восходящего конвективного потока от нагретой поверхности отопительного прибора с горизонтальной направляющей внутри по дуге приведен на рис. 2.

Устройство с горизонтальной направляющей обеспечивает отклонение восходящего, загрязненного конвективного потока от внутренней поверхности стены в сторону помещения более чем на 40 см, при этом угол отклонения осевой скорости потока от вертикали α достигает 38°. Это расстояние и угол отклонения препятствуют загрязненному потоку воздуха настилаться на внутреннюю поверхность стен и убранства зала над отопительным прибором. Данный поток формируется классическим способом и состоит, как и предыдущий настилающийся, из пяти аналогичных

¹ Способ сбора и отвода дыма, копоти, сажи при сгорании свечей от группы подсвечников, установленных в храмах, соборах и других культовых сооружениях: патент на изобретение 2773457 С1, 03.06.2022 / Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А., Багдасарян А.Г.; заявка № 2021115913 от 01.06.2021.

² Чугунный секционный радиатор с направляющей: патент на полезную модель 214332 U1, 21.10.2022 / Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К.; заявка № 2022114945 от 01.06.2022.

участков высотой h_I , h_{II} , h_{III} , h_{IV} , h_V (см. рис. 2), которые имеют различные расход, температуру и скорость воздуха в поперечном сечении потока. Характер формирования потока на указанных участках соответствует физическим закономерностям для пристенного, полуограниченного, настилающегося потока, приведенного на рис. 1 в зонах $h_{разг}$, h_{III} , $h_{расш}$, $h_{встр}$, $h_{пом}$. Отличие состоит в том, что в связи с отклонением потока от стены подтекание прилегающего воздуха к потоку происходит с двух сторон, как со стороны помещения, так и со стороны поверхности стены. В этом случае по мере движения скорость потока снижается, а количество воздуха увеличивается более интенсивно, чем в предыдущем случае, и скорость потока всего участка h_{IV} составляет от 0,2 до 0,3 м/с.

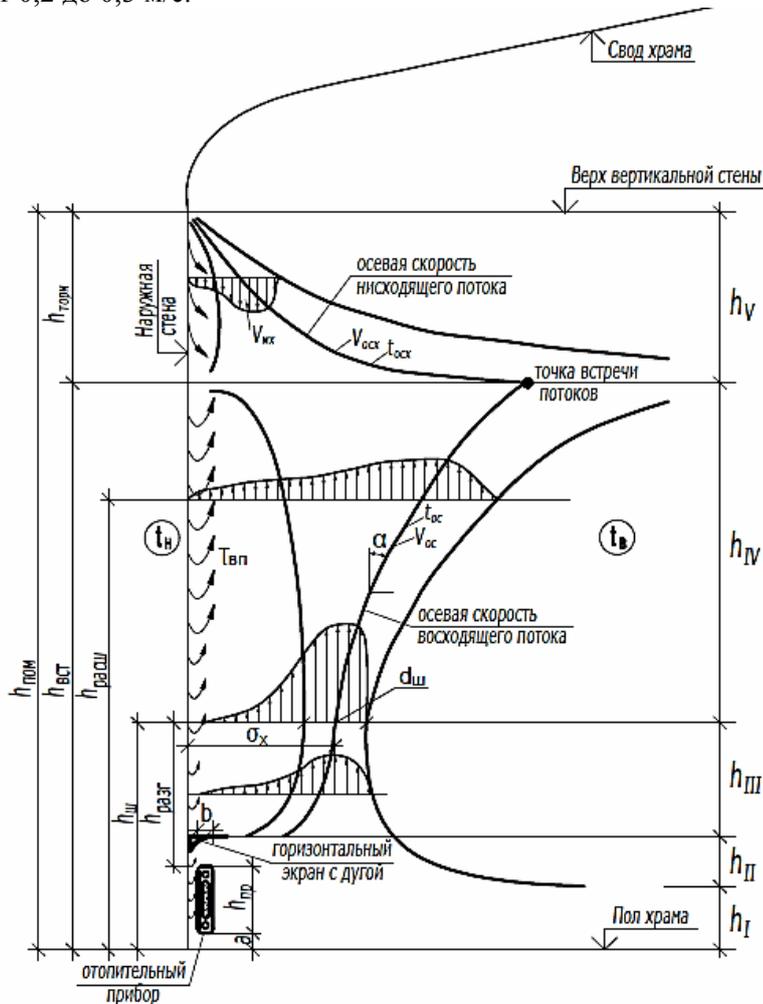


Рис. 2. Модель развития отклоненного, плоского, нагретого, свободного конвективного потока от отопительного прибора возле вертикальной охлажденной поверхности наружного ограждения:

h_I – пассивный участок; h_{II} – активный участок; h_{III} – разгонный участок; b – ширина отопительного прибора; a – высота установки отопительного прибора над полом; $h_{пр}$ – высота отопительного прибора; $h_{разг}$ – высота разгонного участка; $h_{ш}$ – расстояние от пола до шейки потока; $h_{расш}$ – высота участка расширения потока; $h_{встр}$ – расстояние до встречи восходящего и нисходящего потоков; $h_{пом}$ – высота помещения; δ_x – расстояние от внутренней поверхности стены до осевой скорости потока

Для случая с отклоненным конвективным потоком воздуха проведены экспериментальные сравнительные исследования влияния потока, отклоненного до 38° от вертикали, на изменение температуры на внутренней поверхности стены $t_{в.п.}$, $^\circ\text{C}$, в сравнении с $t_{в.п.}$, $^\circ\text{C}$, при настилающемся конвективном потоке от отопительного прибора.

Измерение температуры $t_{в.п.}$, $^\circ\text{C}$, производилось в Храме святых апостолов Петра и Павла в г. Пензе с использованием тепловизора типа Testo для двух вариантов – с горизонтальной направляющей с дугой на внутренней поверхности и без направ-

ляющей. В первом варианте формировался отклоненный, а при втором – насти-
лающийся конвективный поток.

Результаты измерений $t_{в.п.}, ^\circ\text{C}$, для двух вариантов приведены на рис. 3 (а,б), а
численные значения температуры – в таблице.

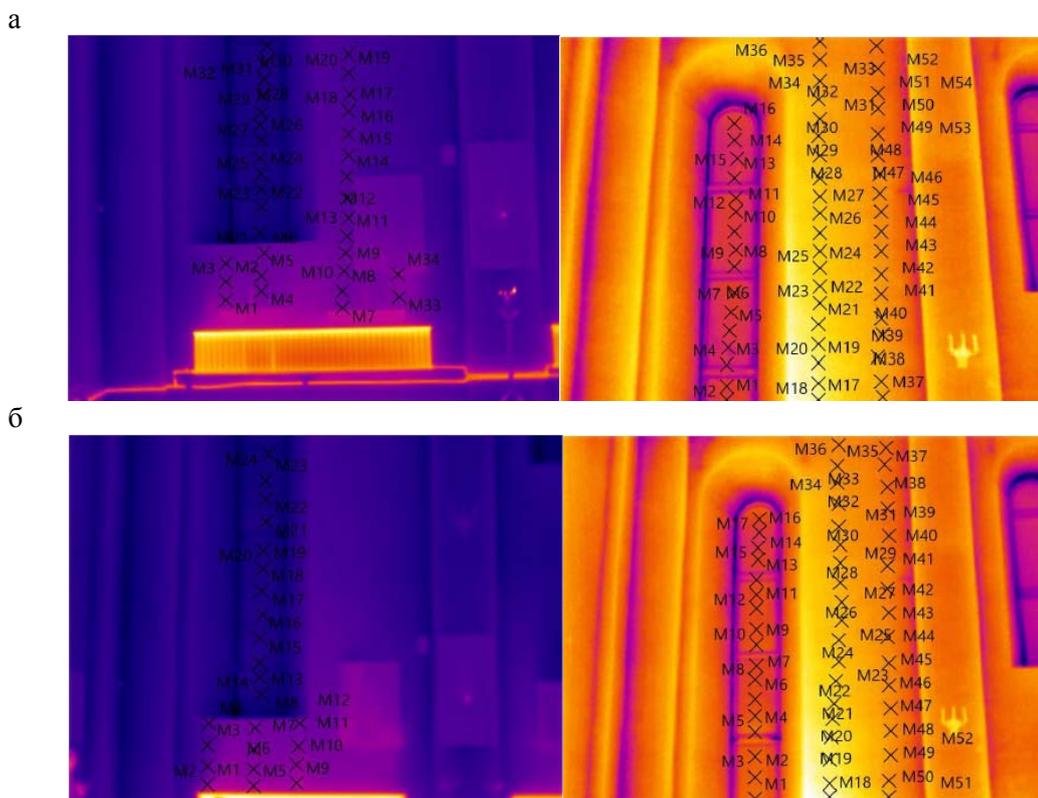


Рис. 3. Температура на внутренней поверхности наружной стены в точках измерения:
а – при наличии горизонтальной направляющей с дугой внутри; б – без направляющей

Среднестатистические численные значения температуры на внутренней поверхности
наружной стены, $t_{в.п.}, ^\circ\text{C}$, в точках замера

		Численные значения $t_{в.п.}, ^\circ\text{C}$, в точках замера с горизонтальной направляющей																																		
Точка замера	Значение $t_{в.п.}, ^\circ\text{C}$	7	8	9	10	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35													
		17,7	16,8	16,0	15,0	13,5	13,3	13,1	13,0	12,7	12,6	12,5	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,7	11,5	11,3	10,9	10,3													
		Численные значения $t_{в.п.}, ^\circ\text{C}$, в точках замера без направляющей																																		
Точка замера	Значение $t_{в.п.}, ^\circ\text{C}$	9	10	11	12	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35													
		20,1	18,4	17,2	16,1	14,3	13,8	13,7	13,6	13,5	13,3	13,2	13,1	13,0	12,9	12,8	12,8	12,8	12,7	12,6	12,5	12,4	12,2													

Проведенный анализ численных значений $t_{в.п.}, ^\circ\text{C}$ (см. таблицу) позволяет выявить
закономерность изменения температуры по высоте внутренней поверхности наружной
стены (рис. 4).

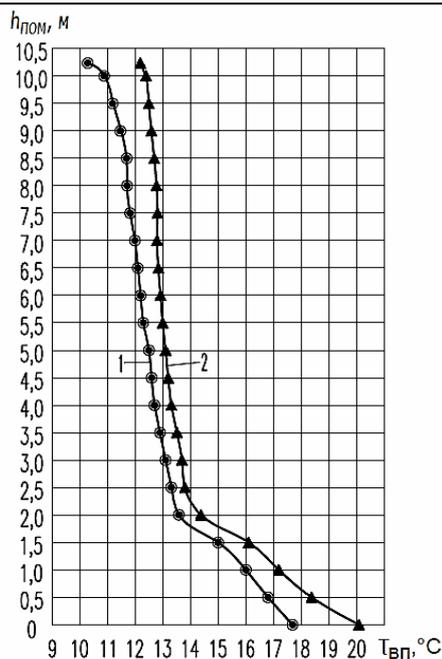


Рис. 4. График изменения температуры на внутренней поверхности наружной стены при настиляющемся и отклоненном конвективном потоке:

1 – с установкой горизонтальной направляющей с дугой внутри; 2 – без направляющей

Анализ закономерности изменения $t_{в.п.}$, °C, по высоте внутренней стены показал, что по мере удаления от отопительного прибора по вертикале $t_{в.п.}$, °C, снижается и более интенсивно по мере приближения к верхней части стены, в зоне торможения конвективного потока.

В то же время установлено, что при отклонении нагретого конвективного потока от стены до 40 см температура на ее поверхности остается выше температуры точки росы и составляет $t_{т.р.} = 12-13$ °C. Это подтверждает эффективность применения разработанного устройства, обеспечивающего отклонение конвективного потока от внутренней поверхности стены.

В результате проведенного анализа профиля скоростей и температуры воздуха в поперечном сечении конвективного потока, температуры на внутренней поверхности наружной стены, модели развития нагретых конвективных потоков от отопительного прибора можно сделать вывод, что способ применения горизонтальной направляющей воздушного потока с профилем по дуге обеспечивает устойчивое отклонение загрязненного потока воздуха от внутренней поверхности стены над отопительным прибором и размещенных на ней элементов убранства, что позволяет сохранить историко-культурное наследие и обеспечить сокращение затрат на реставрационные работы.

Список литературы

1. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
2. Кочев, А.Г. Создание температурных условий в православных храмах / А.Г. Кочев, М.М. Соколов, В.А. Уваров // Приволжский научный журнал. – 2023. – № 3. – С. 58–65.
3. Боровицкий, А.А. Исследования закономерностей взаимодействия воздушных потоков в вытяжном зонте / А.А. Боровицкий, С.В. Угарова // Актуальные проблемы современного строительства: межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – С.55–58.
4. Еремкин, А.И. Комплексное решение локализации загрязнений в процессе сгорания церковных свечей в православных сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Авер-

кин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2. – С. 104–116.

5. Еремкин, А.И. Инженерные системы поддержания микроклимата православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – № 1. – С. 87–91.

6. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012005.

7. Еремкин, А.И. Теоретические основы и рекомендации по созданию местной вытяжной вентиляции продуктов сгорания свечей в зале богослужения / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, В.А. Леонтьев, К.А. Петрова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1. – С. 195–202.

8. Кочев, А.Г. Определение температуры конвективных потоков у внутренних поверхностей ограждающих конструкций православных храмов / А.Г. Кочев, М.М. Соколов // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – № 25. – С. 243–249.

9. Кочев, А.Г. Физико-математическое описание естественной конвекции в помещениях православных храмов / А.Г. Кочев, М.М. Соколов // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 2. – С. 78–85.

10. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.

References

1. Bogoslovsky, V.N. Construction thermophysics (thermophysical fundamentals of heating, ventilation and air conditioning) / V.N. Theological. – M.: Higher School, 1982. – 415 p.

2. Kochev, A.G. Creation of temperature conditions in Orthodox churches / A.G. Kochev, M.M. Sokolov, V.A. Uvarov // Volga Scientific Journal. – 2023. – No. 3. – P. 58–65.

3. Borovitsky, A.A. Research into the patterns of interaction of air flows in an exhaust hood / A.A. Borovitsky, S.V. Ugarova // Current problems of modern construction: interuniversity. Sat. scientific tr. – St. Petersburg: St. Petersburg State University of Civil Engineering, 2010. – P. 55–58.

4. Eremkin, A.I. A comprehensive solution for localizing pollution during the combustion of church candles in Orthodox buildings / A.I. Eremkin, A.G. Aeverkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova, A.A. Mishin, A.V. Mochalov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2. – P. 104–116.

5. Eremkin, A.I. Engineering systems for maintaining the microclimate of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova // Education and science in the modern world. Innovations – 2021. – No. 1. – P. 87–91.

6. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012005.

7. Eremkin, A.I. Theoretical foundations and recommendations for creating local exhaust ventilation of candle combustion products in the worship hall / A.I. Eremkin, A.G. Aeverkin, I.K. Ponomareva, V.A. Leontiev, K.A. Petrova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1. – P. 195–202.

8. Kochev, A.G. Determination of the temperature of convective flows near the internal surfaces of enclosing structures of Orthodox churches / A.G. Kochev, M.M. Sokolov // Construction and technogenic safety. – 2022. – No. 25. – P. 243–249.

9. Kochev, A.G. Physico-mathematical description of natural convection in the premises of Orthodox churches / A.G. Kochev, M.M. Sokolov // Volga Scientific Journal. – 2012. – No. 2. – P. 78–85.

10. Shepelev, I.A. Aerodynamics of indoor air flows / I.A. Shepelev. – M.: Stroyizdat, 1978. – 144 p.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2024_1_138

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.,
тел.: (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 ТЕХНОЛОГИЯ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, ПРЕДУСМАТРИВАЮЩАЯ ВВЕДЕНИЕ ФЛОТОРЕАГЕНТОВ В ВИДЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский

Обоснована целесообразность использования в процессах гидродинамического диспергирования водовоздушной смеси флотореагента, эжектируемого в воздушный поток, поступающий в вихревое гидродинамическое устройство (ВГДУ) в виде мелкодисперсной аэрозоли. Получены математические зависимости, описывающие процесс гидродинамического диспергирования водовоздушной смеси, применяемой в технологических схемах флотационной очистки сточных вод. Показано, что при осаждении мелкодисперсных капель аэрозоля флотореагента на внутреннюю поверхность воздушных пузырьков существенно изменяются ее физико-химические свойства и не происходит вторичного загрязнения очищаемых сточных вод.

Ключевые слова: флотореагент, мелкодисперсные аэрозоли, гидродинамическое диспергирование, турбулентные пульсации скорости, флотационная очистка, водовоздушная смесь

A NEW TECHNOLOGY OF FLOTATION WASTEWATER TREATMENT, PROVIDING INTRODUCTION OF FLOTATION REAGENTS IN THE FORM OF FINE AEROSOLS

S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinskiy

The expediency of using a flotation agent ejected into an air stream entering a vortex hydrodynamic device (VGDU) in the form of a finely dispersed aerosol in the processes of hydrodynamic dispersion of a water-air mixture is substantiated. Mathematical dependences

describing the process of hydrodynamic dispersion of a water-air mixture used in technological schemes of flotation wastewater treatment are obtained. It is shown that when fine droplets of aerosol of the flotation agent are deposited on the inner surface of the air bubbles, its physico-chemical properties change significantly and secondary contamination of the treated wastewater does not occur.

Keywords: flotation agent, fine aerosols, hydrodynamic dispersion, turbulent velocity pulsations, flotation purification, water-air

В настоящее время для предотвращения загрязнения открытых водоемов токсичными компонентами хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод широко используются разнообразные технологии адсорбционно-пузырькового разделения (АПР), применяемые в процессах флотационной очистки. Технологии АПР мало зависят от седиментационных свойств загрязняющих веществ и определяются седиментационными свойствами образующихся флотокомплексов «пузырек воздуха – частица загрязнения», что позволяет существенно интенсифицировать процессы отделения из сточных вод содержащихся в них загрязнений. Эффективность очистки сточных вод методами АПР зависит от интенсивности протекания процессов физико-химического взаимодействия поверхности диспергированной газовой фазы ($D_{ГФ}$) с извлекаемыми из сточных вод загрязнениями и от процессов отделения образующихся флотокомплексов в виде концентрированного пенного продукта (флотошлама) [1].

Существующие способы получения диспергированной газовой фазы ($D_{ГФ}$) подразделяются на два основных вида:

- 1) выделение мелкодисперсных пузырьков из пересыщенного газом водного раствора;
- 2) подача газа в объем обрабатываемой жидкости и последующее диспергирование образующихся газовых пузырьков.

При подаче в поток жидкости газовой фазы образуется движущаяся газожидкостная смесь, содержащая пузырьки газа. Флотационная очистка сточных вод предусматривает получение воздушной дисперсии в воде под воздействием турбулентных пульсаций скорости потока воды ΔV , м/с, на пузырьки воздуха, имеющие размеры (диаметр) d , м.

Интенсивные турбулентные пульсации скорости потока газожидкостной смеси генерируются в процессе ее обработки в гидродинамических устройствах специальной конструкции. В последнее время для диспергирования пузырьков воздуха в потоке водовоздушной смеси широкое распространение получили вихревые гидродинамические устройства (ВГДУ) [2]. В турбулентном потоке водовоздушной смеси, обрабатываемом в ВГДУ, формируется широкий спектр пульсаций скорости потока, имеющих различные масштабы, λ , м. Турбулентные пульсации скорости потока жидкости, имеющие масштаб λ , м, величина которого сопоставима с размерами пузырька воздуха d , м ($\lambda \approx d$), воздействуют на пузырек, в результате чего он перемещается относительно жидкости на расстояние λ , м, со скоростью ΔV , м/с.

Перемещение пузырька воздуха относительно жидкости возможно только при сопоставимости масштабов турбулентных пульсаций скорости λ и пузырька d . Турбулентные пульсации скорости потока большего масштаба ($\lambda \gg d$) будут просто передвигать пузырек с прилегающим к нему объемом жидкости из одной точки в другую точку потока. Наименьшим масштабом обладают турбулентные пульсации потока жидкости нулевого масштаба λ_0 , при котором происходит диссипация (рассеивание) энергии, потока в виде тепла. Наименьший масштаб турбулентных пульсаций потока, при котором происходит рассеивание его энергии, принято называть внутренним масштабом турбулентности λ_0 и определять его величину по формуле

$$\lambda_0 = \sqrt[4]{\frac{V_C^3}{\epsilon_T}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где ν_C – кинематический коэффициент вязкости потока, $\text{м}^2/\text{с}$; ϵ_T – удельная секундная диссипация энергии потока, $\text{Вт}/\text{кг}$; $\text{м}^2/\text{с}^3$.

Величина удельной секундной диссипации энергии потока водовоздушной смеси ϵ_T , $\text{Вт}/\text{кг}$; $\text{м}^2/\text{с}^3$, может быть определена как отношение величины энергии, рассеиваемой в процессе обработки потока в ВГДУ, E_p , Дж, к продолжительности процесса обработки Δt , с, и к массе потока M , кг:

$$\epsilon_T = \frac{E_p}{\Delta t M} = \frac{W_C \Delta P}{\Delta t W_C \rho_C} = \frac{\Delta P}{\Delta t \rho_C} = \frac{Q_C \Delta P}{W_V \rho_C}, \text{ м}^2/\text{с}^3; \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{с}), \quad (2)$$

где W_C – объем водовоздушной смеси, прошедшей за время Δt , с, через ВГДУ, м^3 ; ΔP – перепад давлений на входе и выходе в ВГДУ, Па; ρ_C – плотность потока водовоздушной смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; Q_C – расход обрабатываемой водовоздушной смеси, $\text{м}^3/\text{с}$; W_V – объем ВГДУ, м^3 .

Под воздействием турбулентных пульсаций скорости потока пузырек воздуха диаметром d , м, перемещается относительно жидкости со скоростью ΔV , м/с, в результате чего на него действует сила гидродинамического давления $F_{ГД}$, Н.

$$F_{ГД} = \frac{\pi d^2}{4} \zeta \rho \frac{\Delta V^2}{2}, \text{ Н}, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Действие силы гидродинамического давления $F_{ГД}$ на пузырек сферической формы уравновешивается действием силы поверхностного натяжения $F_{ПН}$.

$$F_{ПН} = \chi \sigma = \pi d \sigma, \text{ Н}, \quad (4)$$

где χ – смоченный периметр поперечного сечения пузырька воздуха, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха, $\text{Н}/\text{м}$; $\text{Дж}/\text{м}^2$.

При некотором критическом значении $F_{ГД}$ действие силы гидродинамического давления не может быть скомпенсировано действием силы поверхностного натяжения $F_{ПН}$, в результате чего происходит дробление пузырька воздуха.

Величина элементарной работы, совершаемой в процессе перемещения пузырька воздуха относительно жидкости, может быть определена как

$$\Delta A_{ПН} = F_{ПН} \Delta l = F_{ПН} \Delta V \Delta t, \text{ Дж}, \quad (5)$$

где Δl – величина перемещения пузырька воздуха относительно жидкости, м.

Величина элементарной мощности при перемещении пузырька воздуха относительно жидкости на расстояние Δl , м:

$$\Delta N_{ПН} = \frac{\Delta A_{ПН}}{\Delta t} = \frac{F_{ПН} \Delta V \Delta t}{\Delta t} = \pi d \sigma \Delta V, \text{ Дж}/\text{с}, \text{ Вт}. \quad (6)$$

Масса элементарного объема жидкости, перемещаемого пузырьком воздуха диаметром d на расстояние $\Delta l = \Delta V \Delta t$:

$$M = \frac{\pi d^2}{4} l \rho = \frac{\pi d^2}{4} \Delta V \Delta t \rho, \text{ кг}. \quad (7)$$

В этом случае величина удельной секундной диссипации энергии может быть определена как

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta A_{\text{ПН}}}{\Delta t M} = \frac{\pi d \sigma \Delta V \Delta t}{\Delta t} \frac{4}{\pi d^2 \Delta V \Delta t \rho} = \frac{4\sigma}{d\rho \Delta t}, \text{ м}^2/\text{с}^3. \quad (8)$$

Величина элементарного времени Δt , с:

$$\Delta t = \frac{E_{\text{П}}}{\Delta N_{\text{ПН}}}, \quad (9)$$

где $E_{\text{П}}$ – величина энергии силы поверхностного натяжения пузырька воздуха, Дж,

$$E_{\text{П}} = f\sigma = \pi d^2 \sigma, \text{ Дж}; \quad (10)$$

здесь $f = \pi d^2$ – площадь поверхности пузырька воздуха, м^2 .

Из (6), (9) и (10) имеем

$$\Delta t = \pi d^2 \sigma \frac{1}{\pi d \sigma \Delta V} = \frac{d}{\Delta V}, \text{ с}. \quad (11)$$

Подставив (11) в формулу (8), получим:

$$\varepsilon_T = \frac{4\sigma}{d\rho} \frac{\Delta V}{d} = \frac{4\sigma}{d^2 \rho} \Delta V, \text{ м}^2/\text{с}^3. \quad (12)$$

Откуда

$$\varepsilon_T^2 = 16 \frac{\sigma^2}{d^4 \rho^2} \Delta V^2, \text{ м}^4/\text{с}^6. \quad (13)$$

Из условия $F_{\text{ГД}} = F_{\text{ПН}}$ имеем

$$\frac{\pi d^2}{4} \zeta \rho \frac{\Delta V^2}{2} = \pi d \sigma, \text{ Н} \quad (14)$$

Откуда

$$\Delta V^2 = \frac{8}{d_{\text{П}}} \frac{\sigma}{\zeta \rho}, \text{ м/с}. \quad (15)$$

Подставив (15) в формулу (13), получим:

$$\varepsilon_T^2 = \frac{128}{\zeta} \frac{\sigma^3}{d^5 \rho^3}, \text{ м}^4/\text{с}^6. \quad (16)$$

Откуда

$$d = \left(\frac{128}{\zeta} \right)^{1/5} \left(\frac{\sigma^3}{\varepsilon_T^2 \rho^3} \right)^{1/5} = K_{\text{ГД}} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{0,6} \frac{1}{\varepsilon_T^{0,4}}, \text{ м}, \quad (17)$$

где $K_{\text{ГД}} = \left(\frac{128}{\zeta} \right)^{1/5}$ – коэффициент, величина которого зависит от гидродинамических условий процесса диспергирования водовоздушной смеси в ВГДУ.

В работе М.А. Евилевича, Л.Н. Брагинского «Оптимизация биохимической очистки сточных вод», вышедшей в 1979 г., предлагается при расчете среднего диаметра

капель эмульсии d , м, в турбулентном потоке жидкости принимать в формуле (17) величину коэффициента $K_{ГД} = 0,13$.

В соответствии с формулой (17) при постоянных значениях $K_{ГД}$, ρ и ϵ_T величина минимальных диаметров пузырьков воздуха, образующихся в водовоздушной смеси в процессе диспергирования, будет пропорционально зависеть от значения коэффициента поверхностного натяжения в степени 0,6.

В процессе всплывания группы пузырьков воздуха, а также при движении водовоздушной смеси постоянно происходят столкновения пузырьков, в результате которого протекают процессы:

1) Дробление пузырьков, в результате которого суммарный объем воздуха не изменяется $\Delta W_{П} = \text{const}$, м³, а суммарная площадь поверхности раздела фаз «вода – воздух» $\sum f$, м², увеличивается.

2) Слияние (коалесценция) пузырьков, в результате которого суммарный объем воздуха не изменяется ($\sum W_{П} = \text{const}$, м³), а суммарная площадь поверхности раздела фаз «вода – воздух» $\sum f$, м², уменьшается.

3) Упругое столкновение пузырьков, в результате которого остаются постоянными суммарный объем воздуха $\Delta W_{П} = \text{const}$, м³, и суммарная площадь поверхности раздела фаз «вода – воздух» $\sum f = \text{const}$, м².

Полная удельная поверхностная энергия пузырька воздуха при уменьшении его диаметра остается неизменной, и ее величина определяется равенством [3]

$$E_f = \frac{E}{f} = \sigma + q_T + G_\phi + G_\mu = \sigma + TS_T + C_f \frac{\phi^2}{2} + \sum_{i=1}^n \mu_i N_i = 0,118 = \text{const}, \text{ Дж/м}^2, \quad (18)$$

где E и E_f – соответственно полная поверхностная и полная удельная поверхностная энергия пузырька воздуха, Дж и Дж/м²; f – площадь поверхности пузырька воздуха, м²; σ – коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха (удельная механическая поверхностная энергия), Дж/м²; q_T – скрытая теплота образования поверхности раздела фаз, Дж/м²; T – абсолютная температура, К; S_T – температурный коэффициент ($S_T = 0,000159$ Дж/(м²·К)); G_ϕ – удельная поверхностная энергия электрического заряда поверхности раздела фаз, Дж/м²; C_f – удельная электрическая емкость единицы поверхности раздела фаз «вода – воздух», Ф/м²; ϕ – потенциал двойного электрического слоя поверхности пузырька, В; G_μ – удельная поверхностная энергия веществ, адсорбированных на поверхности пузырька, Дж/м²; μ_i – химический потенциал i -го компонента, адсорбировавшегося на поверхности пузырька, Дж/моль; N_i – число молей i -го компонента, адсорбировавшегося на единице площади поверхности пузырька воздуха, моль/м²; n – число химических компонентов, адсорбированных на поверхности пузырька, шт.

В соответствии с формулой (18) при всплывании пузырька воздуха в чистой воде величина удельной поверхностной энергии веществ, адсорбированных на поверхности пузырька σ_μ , Дж/м², равна нулю, а снижение величины коэффициента поверхностного натяжения пузырька воздуха (его удельной поверхностной механической энергии) σ , Дж/м², происходящее при уменьшении диаметра d , компенсируется увеличением удельной поверхностной энергии электрического заряда поверхности раздела фаз G_ϕ , Дж/м² (повышением величины потенциала двойного электрического

слоя поверхности пузырька φ , V) при постоянном значении величины избыточного давления внутри пузырька ΔP , Па.

В соответствии с формулой (18) снизить величину коэффициента поверхностного натяжения σ , Дж/м², и за счет этого существенно интенсифицировать процесс диспергирования пузырьков воздуха можно, добавляя в обрабатываемую в ВГДУ водовоздушную смесь химические соединения (флотореагенты), способные адсорбироваться на поверхности раздела фаз «вода – воздух» и повышать величину удельной поверхностной энергии G_{μ} , Дж/м². Флотореагенты не только позволяют повысить степень диспергирования обрабатываемой в ВГДУ водовоздушной смеси, но и обеспечивают повышение эффективности флотационной очистки сточных вод. По своему назначению флотореагенты подразделяются на три основных класса:

1) Флотореагенты-собиратели (коллекторы) – химические соединения, гидрофобизирующие поверхность пузырьков воздуха и позволяющие повысить прочность образующихся флотокомплексов «пузырек воздуха – частица загрязнения». Флотореагенты-собиратели, как правило, представляют собой дифильные полярно-химические соединения полярная часть которых обладает сродством к поверхности извлекаемых дисперсных частиц загрязнений. В зависимости от состава и структуры полярной части ионогенные флотореагенты-собиратели подразделяются на анионные флотореагенты, гидрофобизирующий ион которых является анионом, и катионные флотореагенты, гидрофобизирующий ион которых является катионом.

2) Флотореагенты-пенообразователи (вспениватели) – органические химические соединения, представляющие собой поверхностно-активные вещества, предназначенные для повышения устойчивости образующегося пенного слоя.

3) Флотореагенты-регуляторы (модификаторы) – химические соединения, позволяющие повысить степень селективности флотационного извлечения тех или иных видов дисперсных частиц.

При использовании флотореагентов в процессе флотационной очистки происходит вторичное загрязнение очищаемых сточных вод. Сотрудниками Пензенского государственного университета архитектуры и строительства был разработан новый способ флотационной очистки сточных вод, позволяющий предотвратить вторичное их загрязнение в процессе введения флотореагента.

В соответствии с предлагаемым способом флотационной очистки сточных вод флотореагент вводится в воздушный поток в виде мелкодисперсной аэрозоли, в процессе формирования и диспергирования воздушных пузырьков он осаждается на их внутренней поверхности и не загрязняет очищаемые сточные воды.

Принципиальная схема флотационной очистки сточных вод, предусматривающая введение флотореагента в виде мелкодисперсных аэрозолей, представлена на рисунке.

Схема флотационной очистки работает следующим образом.

Исходные сточные воды подаются в трубчатую распределительную систему 2 флотатора 1. Очищенные сточные воды собираются сборной трубчатой системой 5 и выводятся из корпуса флотатора 1. Часть расхода очищенных сточных вод поступает в насос 10, перекачивающий рециркуляционный поток очищенных сточных вод. Величина расхода рециркуляционного потока контролируется расходомером 8. Из насоса 10 рециркуляционный поток очищенных сточных вод под напором поступает в эжектирующее вихревое гидродинамическое устройство (ВГДУ) 9. ВГДУ подсасывает воздух из атмосферы, расход которого контролируется с помощью расходомера 11. Компрессор 14 подает сжатый воздух в пневмораспылительное устройство 12, куда также из бака 13 поступает водный раствор флотореагента. Образующаяся в пневмораспылительном устройстве 12 мелкодисперсная аэрозоль с диаметром капель $d = 2 - 5$ мкм подается в поток воздуха, засасываемый в ВГДУ 9. Образующаяся в ВГДУ 9 водовоздушная смесь поступает в трубчатую распределительную систему 3. Перегородка 4 делит объем флотатора 1 на две камеры. В первой камере происходит образование флотореагентов «пузырек воздуха – частица загрязнителя», во второй

отстойной камере образовавшиеся флотокомплексы отделяются от очищенных сточных вод. Пенный слой сгребается скребковым механизмом 7 в боковой карман 6.

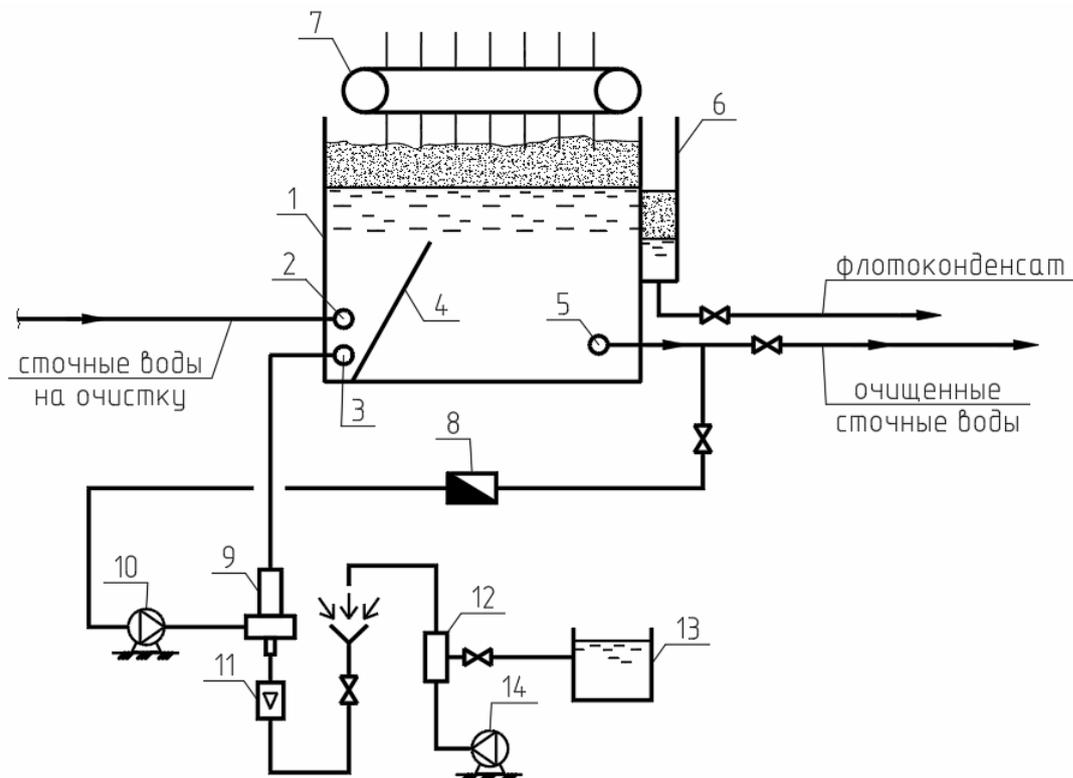


Схема флотационной очистки сточных вод, предусматривающая введение флотореагента в виде мелкодисперсных аэрозолей:

- 1 – корпус флотатора; 2 – трубочная распределительная система исходных сточных вод;
 3 – трубочная распределительная система водовоздушной смеси; 4 – перегородка флотатора;
 5 – сборная трубочная система; 6 – боковой карман флотатора; 7 – скребковый механизм;
 8 – расходомер; 9 – эжектирующее вихревое гидродинамическое устройство (ВГДУ);
 10 – насос, перекачивающий рециркуляционный поток очищенных сточных вод;
 11 – расходомер; 12 – пневмораспылительное устройство; 13 – бак с водным раствором флотореагента; 14 – компрессор

Предложенная новая схема флотационной очистки сточных вод позволит получить мелкодисперсную водовоздушную смесь в процессе гидродинамического диспергирования газовой фазы в ВГДУ, существенно повысить качество очищенных сточных вод за счет использования флотореагента, вводимого в воздушный поток в виде мелкодисперсных аэрозолей с диаметром капель $d = 2 - 5$ мкм, и при этом предотвратить вторичное загрязнение сточных вод используемым флотореагентом.

Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Интенсификация напорной флотационной очистки сточных вод за счет вторичного введения во флотационный объем крупнодисперсной водовоздушной смеси / С.Ю. Андреев, А.М. Шиляев, С.В. Степанов, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №1 – С. 93–101.
2. Андреев, С.Ю. Экспериментальные исследования процесса работы вихревого гидравлического азратора / С.Ю. Андреев, А.И. Шеин, Н.Е. Курносков, Д.П. Алексеев // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2 – С. 142–152.
3. Андреев, С.Ю. Теоретический анализ свойств динамической двухфазной дисперсионной системы «вода – воздух» / С.Ю. Андреев, Н.Н. Ласьков, М.И. Яхкинд, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4 – С. 128–136.

References

1. Andreev, S.Yu. Intensification of pressure flotation wastewater treatment due to the secondary introduction of a coarse water-air mixture into the flotation volume / S.Yu. Andreev, A.M. Shilyaev, S.V. Stepanov, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1 – P. 93–101.
2. Andreev, S.Yu. Experimental studies of the process of operation of a vortex hydraulic aerator / S.Yu. Andreev, A.I. Shein, N.E. Kurnosov, D.P. Alekseev // Regional architecture and engineering. – 2022. – No.2 – P. 142–152.
3. Andreev, S.Yu. Theoretical analysis of the properties of a dynamic two-phase dispersion system «water – air» / S.Yu. Andreev, N.N. Laskov, M.I. Yakhkind, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2021. – No.4. – P. 128–136.

УДК 697.341

DOI 10.54734/20722958_2024_1_146

Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет (ПИНПУ)

Россия, 614990, г.Пермь,
Комсомольский пр., д. 29,
тел. 8(342)219-82-37

Романова Татьяна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогазоснабжение,
вентиляция и водоснабжение,
водоотведение»
E-mail: botinkin@yandex.ru

Белоглазова Татьяна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогазоснабжение,
вентиляция и водоснабжение,
водоотведение»
E-mail: tabelglazova@yandex.ru

Perm National Research Polytechnic
University

Russia, 614990, Perm,
29, Komsomolsky Prospekt,
tel. 8(342)219-82-37

Romanova Tatyana Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Heat and Gas supply,
ventilation and water supply»
E-mail: botinkin@yandex.ru

Beloglazova Tatyana Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Heat and Gas supply,
ventilation and water supply»
E-mail: tabelglazova@yandex.ru

ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ

Т.Н. Романова, Т.Н. Белоглазова

Рассмотрены вопросы эффективного управления системой теплоснабжения с учетом социальных, технологических и экономических факторов. Предложена модель управления системой теплоснабжения города на основе энергетических и информационных ресурсов для группы объектов, имеющих общие особенности по климатическим условиям, численности населения и сходную структуру системы теплоснабжения.

Ключевые слова: эффективность; управление; теплоснабжение; теплосеть; тариф; экономическая эффективность

ENERGY INFORMATION MODEL OF HEATING SUPPLY MANAGEMENT

T.N. Romanova, T.N. Beloglazova

The article deals with the issues of effective management of the heat supply system taking into account social, technological and economic factors. The aim of the work is to develop a model for managing the city's heat supply system based on energy and information resources for a group of objects that have common features in terms of climatic conditions, population and a similar structure of the heat supply system.

Keywords: efficiency; management; heating supply system; heating network; tariff; economic efficiency

В последние три десятилетия в России система управления теплоснабжением находилась в условиях изменения экономических и правовых отношений. Формирование и развитие теплоснабжения территории находятся под влиянием климатических, геологических, экономических, социально-культурных, технологических факторов. Для стабильного экономического развития регионов с учетом взаимодействия различных факторов необходимо обеспечить эффективное управление системой теплоснабжения. Для этой цели предлагается использовать энергоинформационную модель управления. Системы теплоснабжения – один из элементов инженерной инфраструктуры, обеспечивающей условия для жизни населения. Технологические закономерности функционирования систем теплоснабжения рассмотрены во взаимосвязи с планами развития территорий. Исследование направлено на выявление

механизмов управления повышением технологической и экономической эффективности систем теплоснабжения как базового и стабилизирующего фактора развития региональной экономики.

Сложившаяся структура инженерных систем (ИС), таких, как теплоснабжение и газоснабжение территорий, создавалась в условиях плановой экономики; вопросы развития ИС отражали потребности общества в условиях вновь возводимого жилья, роста промышленного производства, растущих потребностей за счет внутреннего производства и потребления.

Для крупных городов России имеют место характерные общие закономерности в сложившейся структуре теплоснабжения. Системы централизованного теплоснабжения (СЦТ) в городах с продолжительностью отопительного периода более 200 суток являются основными. Источниками тепловой энергии являются существующие крупные технологические объекты на основе комбинированной выработки тепла (ТЭЦ), промышленные, районные и индивидуальные котельные. Технологический цикл выработки, транспортирования и потребления тепловой энергии для территорий имеет общие закономерности функционирования [1–5]. Но при этом есть и особенности, которые при планировании развития территорий предусматривают различные варианты систем теплоснабжения [6, 7].

Модели энергоинформационного развития ИС территорий при технико-экономическом обосновании необходимо применять на более широком уровне, не ограничиваясь усовершенствованием технических устройств. Новые экономические условия определяют взаимоотношения между элементами структуры системы и приводят к формированию новых механизмов управления ИС на основе существующих технологических объектов [8, 9].

Несмотря на то, что долгосрочный характер планирования осложняется неопределенностью информации о дальнейшем развитии территорий, существующие системы теплоснабжения показали высокую устойчивость при изменении нормативно-правовой базы и экономических условий. Но при этом, в связи со старением элементов ИС, как физическим, так и моральным, происходит постоянное обновление отдельных элементов структуры системы теплоснабжения.

Для рационального использования накопленного потенциала и технологического опыта различных периодов функционирования необходимо повышать эффективность механизмов административного управления ИС теплоснабжения. При этом требуется объективная оценка эффективности работы самой административной системы управления на основе объективных показателей, отвечающих потребностям системы теплоснабжения при устойчивом развитии экономики регионов страны. Примеры внедрения эффективных механизмов управления показывают, что необходимо не только обобщать накопленный опыт, но и рассматривать альтернативные варианты при планировании развития территорий.

Совершенствование инженерной инфраструктуры на основе энергетически эффективных технологий в системе теплоснабжения показывает большой диапазон возможных решений [10–12].

Технологические особенности функционирования ИС территорий имеют тенденцию монопольного управления. Централизация управления имеет свои преимущества и недостатки. СЦТ обеспечивают значительный потенциал для эффективного использования энергии органического топлива в комбинированном цикле выработки тепловой и электрической энергии. Централизованное управление позволит обеспечить планирование развития на долгосрочный период [13–15]. СЦТ не исключают интеграцию с возобновляемыми источниками энергии как элементами повышения эффективности теплоснабжения потребителей.

Структура технологического комплекса СЦТ в настоящее время разделена на основе балансовой принадлежности элементов. Это разграничение определяет сферу владения тепловыми сетями (ТС), тепловыми источниками (ТИ) и теплоснабжающими установками различных владельцев и влечет дополнительные затраты ресурсов при управлении [16]. Увеличение структуры административного управления

снижает эффективность, влияет на продолжительность процесса принятия решения. Один из механизмов управления связан с определением тарифов, которые обеспечивают функционирование системы теплоснабжения и платежеспособный спрос на тепловую энергию. Принятие тарифов без обоснованного анализа их влияния на систему в целом может привести к негативным результатам.

Поэтому в энергоинформационной модели управления теплоснабжением эффективность заключается в снижении технологических потерь теплоносителя, взаимодействии элементов структуры теплоснабжения с минимальными затратами времени и информационных ресурсов в рамках нормативных и правовых требований.

Для крупных промышленных городов как объектов исследования можно выявить общие характерные тенденции развития ИС теплоснабжения.

Для городов с количеством жителей от 800 до 1500 тыс. и продолжительностью отопительного периода от 200 до 230 суток система теплоснабжения имеет ряд общих признаков. Анализ данных программ комплексного развития и схем теплоснабжения нескольких крупных городов представлен в таблице.

Характеристики городских систем теплоснабжения

Характеристики	Город					
	Екатеринбург	Пермь	Тюмень	Челябинск	Уфа	Самара
Население, тыс. чел.	1493,75	1055,40	807,40	1213,90	1493,75	1156,66
Отопительный период, сутки	230	225	225	218	213	203
Количество комбинированных источников выработки тепловой энергии	8	4	2	5	5	5
Количество источников выработки тепла (котельные)	65	78	87	106	52	241
Протяженность тепловых сетей в двухтрубном исчислении, км	1425,50	1205,70	873,30	1296,72	1425,50	1133,76
Количество тепловых сетей, требующих замены, м	10442,50	14500,0	32,9 % ветхие сети	9676,30	10442,50	394980
Количество тепловой энергии для производственных процессов, Гкал/ч	3063,53	1509,00	876,99	4517,50	3063,53	581,274
Количество тепловой энергии для теплоснабжения, Гкал/ч	3800,00	2694,00	2870,81	3299,50	3800,00	4735,41

Во-первых, несколько крупных ТИ комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, таких, как теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и источники выработки тепловой энергии – котельные. ТЭЦ обеспечивают в настоящее время основную долю нагрузки на теплоснабжение промышленных и коммунальных

потребителей. Ведомственные и прочие котельные в балансе нагрузок рассмотренных объектов имеют меньшую долю по отношению к ТЭЦ. Во-вторых, ТС многоэтажной жилой застройки, административно-бытовой, социальной застройки, а также промышленных предприятий на территории, как правило, обслуживаются крупными территориальными компаниями. Потребителями тепловой энергии с целью отопления, вентиляции и горячего водоснабжения (ГВС) являются промышленные и жилые объекты. Промышленная нагрузка связана с технологией и существенно зависит от планов экономического развития региона, спроса на продукцию производства, из чего и определяется объем и неравномерность потребления тепловых ресурсов. Нагрузка на отопление и вентиляцию носит сезонный характер. Годовой расход на отопление зависит от климатических факторов. Нагрузка на ГВС зависит от благоустроенности квартир, а неравномерность потребления определяется суточными и сезонными колебаниями. Управляющие компании осуществляют оперативное управление объектами потребления в жилых домах. Управление ИС территорий, как показывает опыт, имеет свои особенности в различных социально-экономических моделях развития экономики. Элементы управляющей структуры системой теплоснабжения представлены на рис. 1.



Рис. 1. Региональная структура управления системой теплоснабжения

Технологическая структура состоит из элементов системы теплоснабжения, связанных материальными потоками и экономическими договорными отношениями. Основные свойства системы (технологичность, надежность, безопасность) характеризуются конкретными показателями. Показатели, которые находят отражение в нормативной и правовой базе, являются основой формирования правовых и экономических отношений. В энергоинформационной модели управления они определяют условия принятых решений и обеспечивают оценку результата. Экономические критерии определяют эффективность системы теплоснабжения и управления. Для систем теплоснабжения рассматривают общественную и коммерческую эффективность.

Общественная и коммерческая эффективность определяется исходя из нормативных значений для заданных параметров при использовании экологически безопасных технологий.

При определении общественной эффективности оцениваются инвестиции в проект, затраты и результаты, не включающие прямые финансовые интересы его участников.

Коммерческая эффективность учитывает финансовые затраты и результаты участников проекта.

В основу энергоинформационной модели положена теория графов. Процесс управления можно представить в виде узлов и граней. Для данной модели в зависимости от уровня иерархии узел представлен как отдельным техническим объектом,

так и зоной теплоснабжения конкретного источника. Грань представляет процесс взаимодействия и поток ресурсов для конкретного мероприятия. Каждая грань в модели управления характеризуется определенным временем и увязывается с потоками ресурсов в виде поставок теплоносителя и платежей за ресурсы для рассмотренного примера. На рис. 2 представлен пример модуля модели для оценки радиуса действия сети для зоны теплоснабжения.

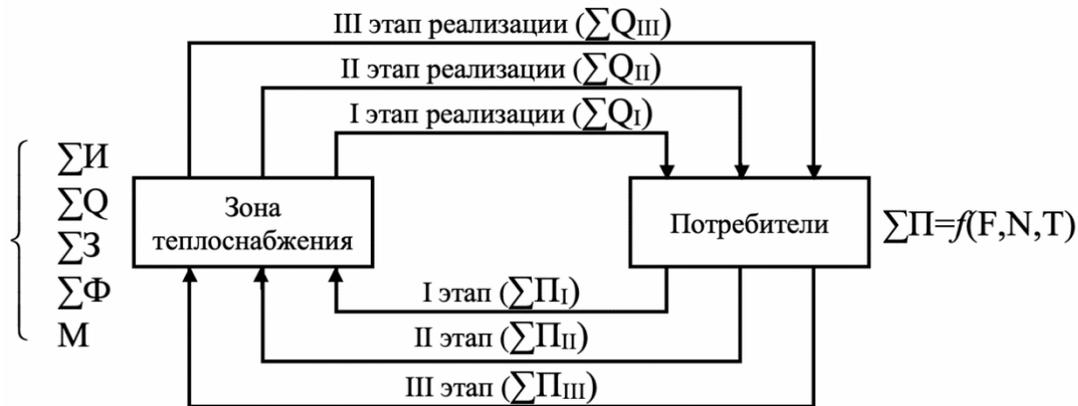


Рис. 2. Энергоинформационная модель для оценки радиуса действия зоны теплоснабжения:

$\Sigma И$ – инвестиции в реконструкцию, модернизацию, строительство, руб.;
 ΣQ – количество транспортируемой энергии; Гкал/год; $\Sigma З$ – текущие затраты, руб./год;
 $\Sigma Ф$ – поступления оплаты потребителей за энергию и подключение мощностей, руб./год; M – материальная характеристика, ед.м.х.

Потребитель представлен в виде узла, для которого определена площадь зоны теплоснабжения F , м²; N – это количество потребителей, T – тариф за транспортировку, руб./Гкал, $Q_{\text{год}}$ – количество фактически потребленной энергии, Гкал/год. Финансовые ресурсы от потребителей поступают в виде оплаты фактически потребленной энергии и присоединенной тепловой нагрузки. В модели учитывается тот факт, что технологические мероприятия, связанные с реконструкцией и модернизацией системы, определяются из максимальных часовых расходов. Экономические эффекты в результате мероприятий относятся к годовым значениям, осредненным, например, для отопления по температуре отопительного периода.

Эффективный радиус действия тепловой сети ЦСТ, исходя из удельной материальной характеристики на единицу присоединенной тепловой нагрузки принятого в качестве показателя для зоны теплоснабжения, определяется как

$$m_{hh} = \frac{M_h}{Q_h^{\max}},$$

где m_{hh} – удельная материальная характеристика тепловой сети на единицу присоединенной нагрузки, (м·м)/(Гкал/ч); M_h – материальная характеристика тепловой сети, м·м (определяется как сумма произведений диаметра (м) на длину (м) по участкам тепловой сети); Q_h^{\max} – присоединенная расчетная часовая тепловая нагрузка, Гкал/ч.

На основе данного показателя можно установить зону эффективного радиуса действия ТС для конкретного ТИ.

Для крупных городов России сохраняются тенденции, связанные с низкой эффективностью систем теплоснабжения; сохраняется высокий износ ТС, несмотря на рост темпов их замены на современном этапе. Объективным фактором является значительная протяженность городских ТС (более тысячи километров в двухтрубном исчислении) и низкая плотность жилой застройки. Системы теплоснабжения имеют сложившуюся структуру, при которой расположение крупных источников теплоснабжения

осуществлялось исходя из расположения промышленных зон и обеспечения санитарно-защитных зон.

Эффективный радиус действия тепловой сети СЦТ применяется в модели для обоснования тепловых потерь либо тарифов. Также данный показатель для конкретного объекта используется для выбора места размещения де-централизованных источников теплоснабжения.

При использовании газового топлива уменьшается количество вредных выбросов, повышается коэффициент полезного действия установок. Наличие системы газораспределения, появление высокотехнологичных котельных модульного типа, развитие нормативно-правовой базы способствуют развитию децентрализованного теплоснабжения [17].

В последнее десятилетие значительно увеличилось количество ведомственных и индивидуальных котельных. Котельные, как правило, располагаются в зонах, где имеет место дефицит тепловой мощности. Но есть объекты, которые выбирают децентрализованный источник на основе технико-экономических показателей [18].

Осредненный удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии СЦТ для города Перми составил 176,35 кг у.т./Гкал. Для ведомственных и индивидуальных котельных данный показатель – 167,08 кг у.т./Гкал. Разница составляет 5,5 %. При дополнительных потерях в ветхих ТС эта величина увеличивается и находит свое отражение в текущих затратах.

Снижение промышленного потребления в результате экономических изменений приводит к снижению эффективности источников теплоснабжения. Возможность регулирования расхода теплоносителя у абонентов позволяет уменьшать затраты потребителя, но не отвечает интересам теплогенерирующих и сетевых компаний. Основным механизмом управления теплоснабжением является система тарифов за тепловую энергию и тепловую мощность. Регулирование тарифов осуществляется на основе нормативно-правовой базы; обоснование тарифов требует оценки коммерческой деятельности организаций.

Одним из направлений практического использования энергоинформационной модели является анализ обоснования и реализации инвестиционных программ, планово-предупредительных ремонтов, проектно-сметной документации, контроль реально выполненных работ на объектах.

Важнейшую функцию в вопросе реализации целевых программ выполняют контролирующие и координирующие подразделения системы управления. Однако отсутствие технологических критериев, связанных с механизмами управления, не дает объективную оценку эффективности менеджмента в системе теплоснабжения. При этом наилучший механизм управления будет сочетаться с уменьшением обращений граждан с жалобами, снижением аварийности в системах теплоснабжения, повышением надежности и технологичности, снижением тепловых потерь.

Внедрение цифровых технологий способствует эффективности управления системой теплоснабжения [19]. Методы картографирования как источника информации (рис. 3) на основе экономических критериев применимы для оценки зоны действия централизованного теплоснабжения [14, 20–22].

Анализ схем теплоснабжения городов России показывает, что существует разница в расчетной и договорной нагрузке системы теплоснабжения в целом по муниципальным территориям. Договорные значения превышают расчетные для некоторых рассмотренных объектов (например, для Перми отношение расчетной нагрузки к договорной составило 71 %, для Челябинска – 74 %). В условиях неопределенности информации по перспективному подключению потребителей и при некотором повышении температуры отопительного периода объективно на ряде ТИ имеет место избыточная тепловая мощность. Избыточная тепловая мощность источников теплоснабжения приводит к снижению эффективности использования топлива. На основе энергоинформационной модели управления возможно решение данной задачи, так как увязываются технологические и экономические показатели. Рациональная загрузка тепловой мощности может быть обеспечена, в том числе, и

системой выгодных тарифов на электрическую энергию для подключенных потребителей в зоне действия тепловых электрических станций. Задача по формированию системы тарифов с учетом дифференцированного подхода для управления системой теплоснабжения с целью повышения эффективности загрузки мощности централизованных источников тепла на основе комбинированной выработки также решается с помощью энергоинформационной модели.

При реализации мероприятий по повышению тепловой эффективности зданий, внедрению регулирования потребления тепловой энергии будет наблюдаться уменьшение удельной нагрузки на теплоснабжение жилых объектов. Но с учетом нового и реконструируемого жилого строительства в целом положительным фактором в развитии городских территорий будет являться увеличение общего потребления тепловой энергии. Такие факторы, как повышение средней температуры отопительного периода, наличие развитой системы газораспределения создают условия для децентрализации теплоснабжения. Рациональное сочетание централизованных и децентрализованных систем теплоснабжения для каждого объекта исследования носит индивидуальный характер. Методы анализа при выборе решения основаны на определении экономических критериев [17].

Для многих стран отмечено повышение роли СЦТ, как с целью повышения управляемости и стабильности городской инфраструктуры, так и для решения задачи реализации стратегии декарбонизации [23]. При управлении инженерной инфраструктурой городов России учитываются мировые тенденции по рациональному использованию преимуществ СЦТ. В системе теплоснабжения на разных уровнях внедряется системный подход на базе не только технологических, но и организационно-экономических методов управления. Одним из необходимых условий эффективного управления теплоснабжением является обеспечение платежеспособного потребительского спроса.

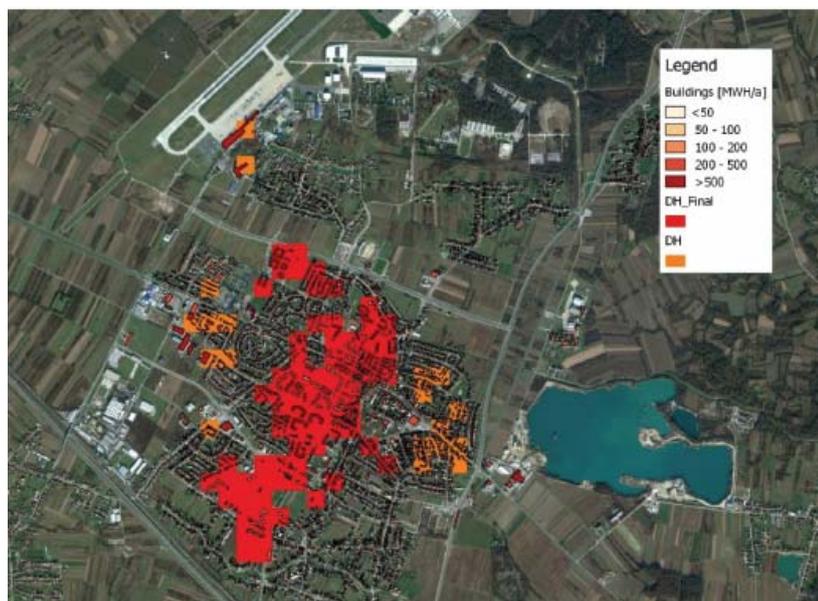


Рис. 3. Результат определения территории для будущего развития централизованной системы теплоснабжения [14]

Стабильное развитие инженерных систем обеспечивает условия для социального и технико-экономического развития регионов России. Существующие системы теплоснабжения в России показали свою надежность в период реформ социальных и экономических отношений. Субъективный фактор управления призван обеспечить технологическую модернизацию СЦТ в рамках повышения экономической эффективности при производстве и транспорте тепловой энергии, социальные гарантии получения качественных услуг для населения. С этой целью анализ функционально-планировочного зонирования территорий по плотности нагрузки на теплоснабжение в рамках исследования области применения энергоинформационной модели обеспечит

рациональное сочетание систем централизованного и децентрализованного теплоснабжения.

Один из основных механизмов, который наиболее широко используется в управлении системой теплоснабжения, – тарифное регулирование. Современная система тарифов требует дифференцированного подхода к потребителям, подключенным к источникам комбинированной выработки и котельным. Тарифы на тепловую энергию необходимо рассматривать взаимосвязано с тарифами на электрическую энергию, удельной жилой площадью отопления на человека, возможностью индивидуального и группового регулирования. Предлагаемая современная модель формирования тарифов на основе альтернативной котельной не отвечает задачам энергетической эффективности, поскольку в исследовании выявлено, что удельные затраты на выработку тепловой энергии от децентрализованных источников меньше, чем от СЦТ. Таким образом, имеет место противоречие предлагаемой модели роста тарифов от СЦТ до значения условной «альтернативной котельной».

Энергоинформационная модель предлагается для оценки сбалансированного и обоснованного управления системой теплоснабжения. Модель имеет многофакторный характер, поэтому в рамках ее применения определяется взаимосвязь как технологических решений, так и экономических и административных методов управления.

Список литературы

1. Mazhar, A.R. A state of art review on the district heating systems / A.R. Mazhar, S. Liu, A. Shukla // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 96. – P. 420–439. – DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.005.
2. Orlov, M.E. Improving urban district heating systems and assessing the efficiency of the energy usage therein / M.E. Orlov, V.I. Sharapov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 891. – P. 012161. – DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012161.
3. Vasile, L. Centralised district heating systems: Reality and perspectives / L. Vasile, C. Mihail // *2017 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2017 – Proceedings* : 11, Iasi, 11–13 October 2017. Vol. 2017-January. – Iasi, 2017. – P. 571–574. – DOI: 10.1109/SIELMEN.2017.8123389.
4. Planning of district heating regions in Estonia / A. Volkova, E. Latõšov, K. Lepiksaar, A. Siirde // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. – 2020. – Vol. 27, No. Special Issue. – P. 5–16. – DOI: 10.5278/ijsepm.3490.
5. Capone, M. Multi-objective optimization of district energy systems with demand response / M. Capone, E. Guelpa, V. Verda // *Energy*. – 2021. – Vol. 227. – P. 120472. – DOI: 10.1016/j.energy.2021.120472.
6. Zajacs, A. Assessment of development scenarios of district heating systems / A. Zajacs, A. Borodinecs // *Sustainable Cities and Society*. – 2019. – Vol. 48. – P. 101540. – DOI: 10.1016/j.scs.2019.101540.
7. The status of 4th generation district heating: Research and results / H. Lund, P.A. Østergaard, M. Chang [et al.] // *Energy*. – 2018. – Vol. 164. – P. 147-159. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206.
8. Копытова, Е. D. Revisiting the Development of Cooperation Between the State, Business, and Society in Addressing Territorial Development Issues / E.D. Копытова // *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. – 2017. – Vol. 10, No. 5. – P. 197–215. – DOI: 10.15838/esc.2017.5.53.14.
9. Postnikov, I. Methods and models of ensuring reliability of district heating systems with prosumers / I. Postnikov, V. Stennikov // *E3S Web of Conferences*, Bishkek, 11–15 сентября 2017 года. Vol. 25. – Bishkek: EDP Sciences, 2017. – P. 02009. – DOI: 10.1051/e3sconf/20172502009.
10. Gitelman, L.D. Sustainable Energy for Smart City / L.D. Gitelman, M.V. Kozhevnikov, L.A. Adam // *International Journal of Energy Production and Management*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 343–353. – DOI: 10.2495/EQ-V4-N4-343-353.

11. Østergaard, P. A. Editorial – Smart district heating and energy system analyses / P. A. Østergaard, H. Lund // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. – 2017. – Vol. 13. – P. 1–4. – DOI: 10.5278/ijsepm.2017.13.1.
12. Еремкин, А.И. Методика исследования надежности и энергетической эффективности систем теплоснабжения / А.И. Еремкин, Е.Г. Ежов, В.А. Леонтьев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2021. – № 2(47). – С. 109–117.
13. Комбинированная система теплоснабжения с ТЭЦ и локальными тепловыми насосами / М.Л. Шит, А.А. Журавлев, Д.М. Суворов, В.М. Сущих // *Проблемы региональной энергетики*. – 2020. – № 1(45). – С. 81–93. – DOI: 10.5281/zenodo.3713430.
14. Heat demand mapping and district heating grid expansion analysis: Case study of Velika Gorica / H. Dorotić, T. Novosel, N. Duić, T. Pukšec // *E3S Web of Conferences, Polanica-Zdroj, 13–15 September 2017*. – Polanica-Zdroj, 2017. – P. 01021. – DOI: 10.1051/e3sconf/20171901021.
15. Аверьянова, О.В. Энергосбережение в тепловых сетях за счет параметров теплоносителя / О.В. Аверьянова // *Инженерно-строительный журнал*. – 2009. – № 5(7). – С. 43–46.
16. Ben Amer-Allam, S. Scenarios for sustainable heat supply and heat savings in municipalities – The case of Helsingør, Denmark / S. Ben Amer-Allam, M. Münster, S. Petrović // *Energy*. – 2017. – Vol. 137. – P. 1252–1263. – DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.091.
17. Белоглазова, Т.Н. Экономическое обоснование технических решений с учетом срока реализации проекта / Т.Н. Белоглазова, Т.Н. Романова // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 11–5. – С. 906–910.
18. A novel dynamic simulation model for the thermo-economic analysis and optimisation of district heating systems / G. Barone, A. Buonomano, A. Palombo, C. Forzano // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 220. – P. 113052. – DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113052.
19. Shan, X. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions / X. Shan, P. Wang, W. Lu // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 203. – P. 686–695. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.081.
20. Design of district heating networks in built environments using GIS: A case study in Vitoria-Gasteiz, Spain / M. Lumbreras, G. Diarce, K. Martin-Escudero [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 349. – P. 131491. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131491.
21. An automated GIS-based planning and design tool for district heating: Scenarios for a Dutch city / J. Maria Jebamalai, M. Van Den Broek, K. Marlein [et al.] // *Energy*. – 2019. – Vol. 183. – P. 487–496. – DOI: 10.1016/j.energy.2019.06.111.
22. Stennikov, V. Optimization of the district heating zones / V. Stennikov, E. Mednikova, I. Postnikov // *MATEC Web of Conferences : electronic edition, Irkutsk, 26–27 апреля 2018 года*. Vol. 212. – Irkutsk: EDP Sciences, 2018. – P. 02005. – DOI: 10.1051/mateconf/201821202005.
23. Shkarovskiy, A. Increasing the efficiency of heat load control in centralized heating networks / A. Shkarovskiy, A. Kolienco, V. Turchenko // *Architecture and Engineering*. – 2021. – Vol. 6, No. 3. – P. 29–41. – DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-3-29-41

References

1. Mazhar, A.R. A state of art review on the district heating systems / A.R. Mazhar, S. Liu, A. Shukla // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 96. – P. 420–439. – DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.005.
2. Orlov, M.E. Improving urban district heating systems and assessing the efficiency of the energy usage therein / M.E. Orlov, V.I. Sharapov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 891. – P. 012161. – DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012161
3. Vasile, L. Centralised district heating systems: Reality and perspectives / L. Vasile, C. Mihail // *2017 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems*,

SIELMEN 2017 – Proceedings : 11, Iasi, 11–13 October 2017. Vol. 2017-January. – Iasi, 2017. – P. 571–574. – DOI: 10.1109/SIELMEN.2017.8123389.

4. Planning of district heating regions in Estonia / A. Volkova, E. Latõšov, K. Lepiksaar, A. Siirde // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. – 2020. – Vol. 27, No. Special Issue. – P. 5–16. – DOI: 10.5278/ijsepm.3490

5. Capone, M. Multi-objective optimization of district energy systems with demand response / M. Capone, E. Guelpa, V. Verda // *Energy*. – 2021. – Vol. 227. – P. 120472. – DOI: 10.1016/j.energy.2021.120472.

6. Zajacs, A. Assessment of development scenarios of district heating systems / A. Zajacs, A. Borodinecs // *Sustainable Cities and Society*. – 2019. – Vol. 48. – P. 101540. – DOI: 10.1016/j.scs.2019.101540.

7. The status of 4th generation district heating: Research and results / H. Lund, P.A. Østergaard, M. Chang [et al.] // *Energy*. – 2018. – Vol. 164. – P. 147–159. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206.

8. Kopytova, E.D. Revisiting the Development of Cooperation Between the State, Business, and Society in Addressing Territorial Development Issues / E.D. Kopytova // *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. – 2017. – Vol. 10, No. 5. – P. 197–215. – DOI: 10.15838/esc.2017.5.53.14.

9. Postnikov, I. Methods and models of ensuring reliability of district heating systems with prosumers / I. Postnikov, V. Stennikov // *E3S Web of Conferences*, Bishkek, 11–15 сентября 2017 года. Vol. 25. – Bishkek: EDP Sciences, 2017. – P. 02009. – DOI: 10.1051/e3sconf/20172502009.

10. Gitelman, L.D. Sustainable Energy for Smart City / L.D. Gitelman, M.V. Kozhevnikov, L.A. Adam // *International Journal of Energy Production and Management*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 343–353. – DOI: 10.2495/EQ-V4-N4-343-353.

11. Østergaard, P.A. Editorial – Smart district heating and energy system analyses / P.A. Østergaard, H. Lund // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. – 2017. – Vol. 13. – P. 1–4. – DOI: 10.5278/ijsepm.2017.13.1.

12. Eremkin, A.I. Methodology for the study of reliability and energy efficiency of heat supply systems / A.I. Eremkin, E.G. Yezhov, V.A. Leontiev // *Regional architecture and construction*. – 2021. – № 2(47). – P. 109–117.

13. Combined heat supply system with thermal power plants and local heat pumps / M.L. Sheet, A.A. Zhuravlev, D.M. Suvorov, V.M. Sushikh // *Problems of regional energy*. – 2020. – № 1(45). – P. 81–93. – DOI: 10.5281/zenodo.3713430.

14. Heat demand mapping and district heating grid expansion analysis: Case study of Velika Gorica / H. Dorotić, T. Novosel, N. Duić, T. Pukšec // *E3S Web of Conferences*, Polanica-Zdroj, 13–15 September 2017. – Polanica-Zdroj, 2017. – P. 01021. – DOI: 10.1051/e3sconf/20171901021.

15. Averyanova, O.V. Energy saving in thermal networks due to the parameters of the coolant / O.V. Averyanova // *Engineering and Construction Magazine*. – 2009. – № 5(7). – P. 43–46.

16. Ben Amer-Allam, S. Scenarios for sustainable heat supply and heat savings in municipalities – The case of Helsingør, Denmark / S. Ben Amer-Allam, M. Münster, S. Petrović // *Energy*. – 2017. – Vol. 137. – P. 1252–1263. – DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.091.

17. Beloglazova, T.N. Economic justification of technical solutions taking into account the project implementation period / T.N. Beloglazova, T.N. Romanova // *Fundamental research*. – 2016. – № 11–5. – P. 906–910.

18. A novel dynamic simulation model for the thermo-economic analysis and optimisation of district heating systems / G. Barone, A. Buonomano, A. Palombo, C. Forzano // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 220. – P. 113052. – DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113052.

19. Shan, X. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions / X. Shan, P. Wang, W. Lu // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 203. – P. 686–695. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.081.

-
20. Design of district heating networks in built environments using GIS: A case study in Vitoria-Gasteiz, Spain / M. Lumbreras, G. Diarce, K. Martin-Escudero [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 349. – P. 131491. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131491.
 21. An automated GIS-based planning and design tool for district heating: Scenarios for a Dutch city / J. Maria Jebamalai, M. Van Den Broek, K. Marlein [et al.] // *Energy*. – 2019. – Vol. 183. – P. 487–496. – DOI: 10.1016/j.energy.2019.06.111
 22. Stennikov, V. Optimization of the district heating zones / V. Stennikov, E. Mednikova, I. Postnikov // *MATEC Web of Conferences* : electronic edition, Irkutsk, 26–27 april 2018. Vol. 212. – Irkutsk: EDP Sciences, 2018. – P. 02005. – DOI: 10.1051/mateconf/201821202005.
 23. Shkarovskiy, A. Increasing the efficiency of heat load control in centralised heating networks / A. Shkarovskiy, A. Kolienko, V. Turchenko // *Architecture and Engineering*. – 2021. – Vol. 6, No. 3. – P. 29–41. – DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-3-29-41

УДК 620.92 + 628.11

DOI 10.54734/20722958_2024_1_157

Тюменский индустриальный университет
Россия, 625000, г.Тюмень,
ул.Володарского, 38,
тел./факс: +7 (3452) 28-36-60

Миронов Виктор Владимирович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Инженерные
системы и сооружения»
E-mail: vvmironov@list.ru

Иванюшин Юрий Андреевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Инженерные системы
и сооружения»
E-mail: ivanjushinja@tyuiu.ru

Суглобов Даниил Алексеевич,
аспирант
E-mail: suglobovda@gmail.com

ООО «ЭЛЕКТРОРАМ»
Россия, 625023, г. Тюмень,
ул. Пржевальского, 33, к. 1, кв. 79

Миронов Дмитрий Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий инженер
E-mail: dvmironov@yandex.ru

Российский государственный аграрный
университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
(РГАУ-МСХА им. Тимирязева)

Россия, 127434, г. Москва,
ул. Тимирязевская, 49,
тел. 8-913-670-22-92

Кадысева Анастасия Александровна,
доктор биологических наук, доцент,
профессор кафедры «Сельскохозяйственное
водоснабжение, водоотведение, насосы
и насосные станции»
E-mail: kadyseva@mail.ru

Industrial University of Tyumen
Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel./fax: +7 (3452) 28-36-60

Mironov Viktor Vladimirovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Engineering Systems and
Structures»
E-mail: vvmironov@list.ru

Ivanjushin Yuriy Andreevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Engineering Systems and
Structures»
E-mail: ivanjushinja@tyuiu.ru

Suglobov Daniil Alekseevich,
Postgraduate student
E-mail: suglobovda@gmail.com

LLC «ELECTRORAM»
Russia, 625023, Tyumen, 33, corp. 1, ap. 79,
Przhevalskogo St.

Mironov Dmitriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Lead Engineer
E-mail: dvmironov@yandex.ru

Russian State Agrarian University – Moscow
Timiryazev Agricultural Academy (RSAU-
MTAA)

Russia, 127434, Moscow, 49,
Timiryazevskaya St.,
tel. 8-913-670-22-92

Kadyseva Anastasiya Aleksandrovna,
Doctor of Biological Sciences, Associate
Professor, Professor of the Department
«Agricultural Water Supply, Sanitation, Pumps
and Pumping Stations»
E-mail: kadyseva@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ХОЛОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов,
А.А. Кадысева, Д.А. Суглобов

Приведено описание принципиальных схем генераторов пневматической мощности, работа которых основана на гидравлической энергии водотоков и морских волн, а также способа получения холода. Установлено, что при использовании пневматической энергии, полученной из возобновляемых источников, холод можно эффективно генерировать расширением воздуха в барботажных колоннах.

Ключевые слова: энергия водотоков, волновая энергетика, пневматическая энергия, барботажное расширение воздуха, энергия холода, мембранный компрессор, гидротаранная установка

GETTING COLD USING HYDRAULIC ENERGY

V.V. Mironov, Yu.A. Ivanjushin, D.V. Mironov,
A.A. Kadyseva, D.A. Suglobov

The authors a description of the circuit diagrams of pneumatic power generators, the operation of which is based on the hydraulic energy of watercourses and sea waves, as well as the method of

producing cold. It has been found that using pneumatic energy obtained from renewable sources, cold can be effectively generated by expanding air in bubble columns.

Keywords: energy of watercourses, wave energy, pneumatic energy, bubbling air expansion, cold energy, membrane compressor, hydrotam installation

Введение

Пневматическая энергия в ряде отраслей промышленности и строительстве является необходимой для осуществления различных технологических процессов. Например, она используется в системах кондиционирования воздуха, в системах водоотведения для аэрации сточных вод и для привода различных механизмов. При получении пневматической энергии применяются воздушные нагнетатели, приводимые в действие, как правило, электромоторами. Для производства электроэнергии в большинстве случаев используется углеводородное сырье, что приводит к увеличению «углеродного следа» в атмосфере, создает парниковый эффект и способствует повышению температуры на планете. Ниже предложены экологически чистые способы генерации энергии для получения холода.

Технологии генерации энергии для получения холода

Применение возобновляемой гидравлической энергии водотоков и морских волн позволит устранить негативные последствия производства пневматической мощности. Гидравлическую энергию водотоков в настоящее время снимают, как правило, с помощью гидротурбин [1–5]. Рассмотрим традиционное использование гидравлической энергии водотоков для генерации электрической энергии с помощью гидравлических турбин с последующим ее преобразованием в полезную пневматическую мощность. Цепочка преобразования состоит из нескольких ступеней. Первая ступень – это преобразование гидравлической энергии водотоков в механическую мощность вращения турбины. Следующая ступень – преобразование механической энергии вращения турбины в электрическую мощность с помощью электрогенератора. Затем электрическая энергия приводит в действие электродвигатель, вращающий вал воздуходувного оборудования с последующим получением пневматической энергии.

Данная схема преобразования гидравлической энергии в полезную пневматическую мощность насчитывает достаточно большое количество промежуточных ступеней преобразования и характеризуется потерей энергии на каждой промежуточной ступени. Заслуживает внимания рассмотрение вопроса прямого преобразования гидравлической энергии водотоков в полезную пневматическую мощность, минуя множество промежуточных ступеней трансформации энергии. Для этого можно взять за основу принцип работы известных гидротаранных установок [6–13] и модифицировать его. Традиционные гидротаранные установки – это водоподъемные устройства. Схема модифицированного гидротарана для генерации пневматической энергии, снабженного мембранными компрессорами, показана на рис. 1.

В Тюменском индустриальном университете была создана модифицированная гидротаранная установка, представленная на рис. 2, 3 [14, 15].

Мембранные компрессоры, приводимые в действие энергией периодического гидравлического удара, позволяют генерировать пневматическую энергию для получения холода.

Другой вид возобновляемой гидравлической энергии – это энергия морских волн. Устройство, дающее возможность использовать возобновляемую энергию морских волн для совместной генерации пневматической энергии для получения холода и гидравлической энергии высокого давления для питания обратноосмотических опреснительных установок, показано на рис. 4.

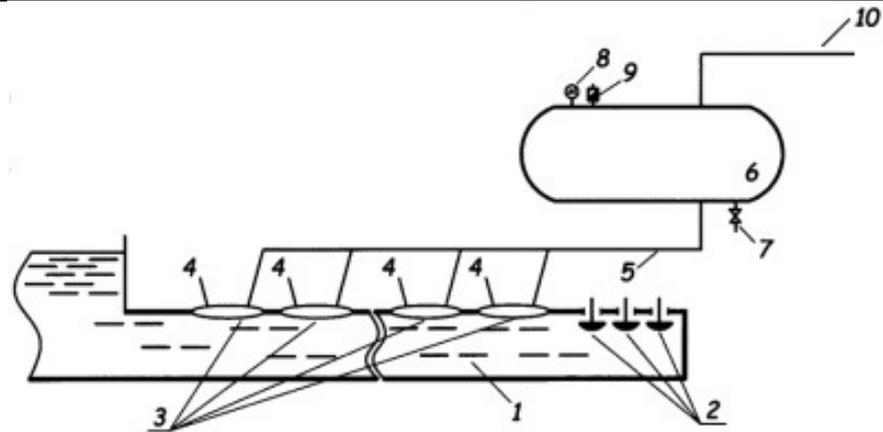


Рис. 1. Схема модифицированного гидротарана:
 1 – напорный трубопровод; 2 – ударные клапаны; 3 – воздушные мембранные компрессоры;
 4 – всасывающий патрубок мембранного компрессора; 5 – напорный патрубок мембранного компрессора; 6 – воздушный ресивер; 7 – сброс конденсата; 8 – манометр; 9 – клапан сброса избыточного давления; 10 – трубопровод потребителей сжатого воздуха

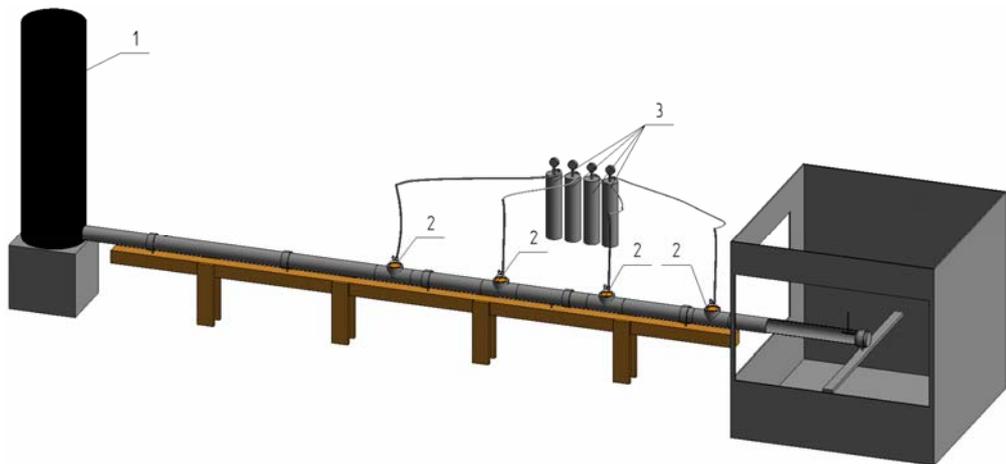


Рис. 2. Компьютерная модель экспериментальной гидротаранной установки:
 1 – напорный трубопровод; 2 – воздушные мембранные компрессоры;
 3 – ресиверы с манометрами



Рис. 3. Фотография экспериментального модифицированного гидротарана

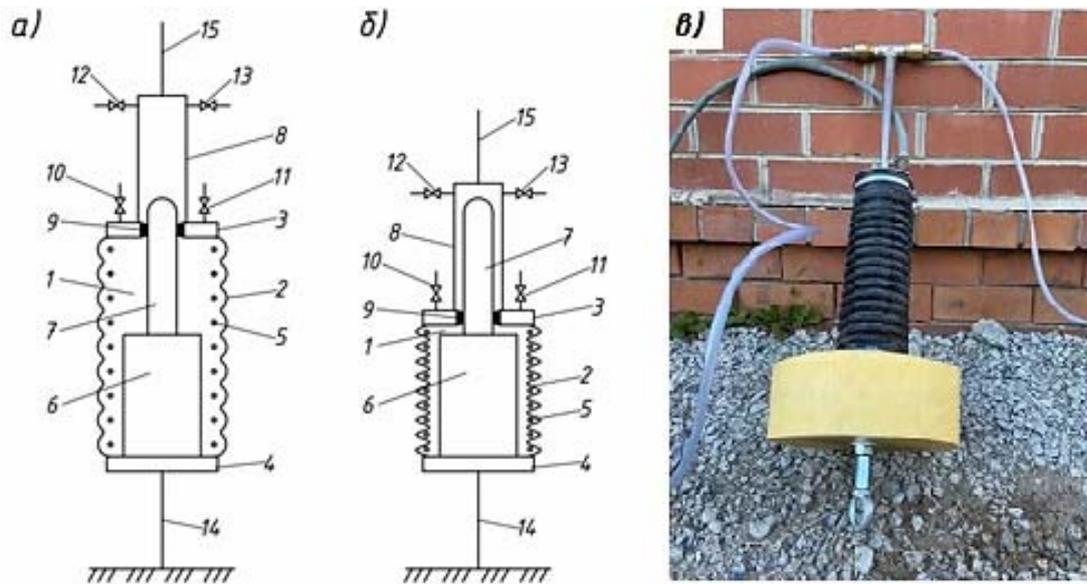


Рис. 4. Схема сифонного насоса-компрессора для совместной генерации пневматической энергии для получения холода и гидравлической энергии морской воды высокого давления для питания обратноосмотических опреснительных установок:

а – положение на гребне волны; б – положение во впадине волны;

в – фото насоса-компрессора в сборе:

- 1 – рабочая камера; 2 – сифонные элементы из эластичного материала; 3 – подвижная стенка рабочей камеры; 4 – неподвижное днище рабочей камеры; 5 – кольца жесткости; 6 – твердый или жидкий цилиндр, являющийся поршнем воздушного компрессора и уменьшающий образование мертвого объема в рабочей камере компрессора; 7 – плунжер водяного насоса высокого давления; 8 – корпус водяного насоса высокого давления; 9 – уплотнение плунжера водяного насоса высокого давления; 10 – всасывающий клапан воздушного компрессора; 11 – нагнетательный клапан воздушного компрессора; 12 – всасывающий клапан водяного насоса высокого давления; 13 – нагнетательный клапан водяного насоса высокого давления; 14 – трос, соединяющий неподвижное днище рабочей камеры с дном акватории моря; 15 – трос, соединяющий корпус водяного насоса с плавучим бумом, снимающим энергию морских волн

Работа генератора пневматической энергии осуществляется следующим образом. На рис. 4 показано расположение функциональных элементов насоса-компрессора при нахождении устройства под уровнем акватории. На рис. 4,а показано расположение элементов устройства при нахождении бую с положительной плавучестью, соединенного с корпусом водяного насоса тросом (15), на гребне морской волны. Сифоны в этом случае растянуты за счет выталкивающей силы воды, действующей на плавучий буй (такт всасывания воздуха и воды). На рис. 4,б показано расположение элементов устройства при нахождении бую с положительной плавучестью, соединенного с тросом (15), во впадине морской волны. Сжатие сифонов в этом случае осуществляется за счет гидростатического давления воды в месте установки рабочей камеры (такт нагнетания воды и воздуха).

Сифонный насос-компрессор содержит рабочую камеру (1), образованную соединенными между собой сифонными элементами из эластичного материала (2), закрытыми с одной стороны подвижной стенкой (3), а с другой стороны – неподвижным днищем (4). Сифонные элементы из эластичного материала (2) снабжены кольцами жесткости (5) для предотвращения деформации сифонных элементов под действием гидростатического давления воды на глубине установки рабочей камеры (1). Сифонные элементы (2) выполнены из эластичного материала. К неподвижному днищу (4) внутри рабочей камеры прикреплен твердый цилиндр (6), являющийся поршнем компрессора и уменьшающий образование мертвого объема (вредного пространства) в рабочей камере (1) при сжатии воздуха. Как вариант, в

качестве поршня возможно использование капельной несжимаемой жидкости, налитой в рабочую камеру. К цилиндру (6) прикреплен плунжер (7) водяного насоса, входящий в корпус водяного насоса (8), прикрепленный к подвижной стенке рабочей камеры (3). В подвижной стенке рабочей камеры (3) выполнено уплотнение (9) плунжера водяного насоса (7). Всасывающий (10) и нагнетательный (11) клапаны воздушного компрессора размещены на подвижной стенке (3) рабочей камеры (1). Всасывающий (12) и нагнетательный (13) клапаны водяного насоса размещены на корпусе (8) водяного насоса. Неподвижное днище (4) рабочей камеры (1) закреплено с дном акватории моря тросом (14). Корпус (8) водяного насоса соединен с плавучим бумом, снимающим энергию морских волн, тросом (15).

Пневматическая энергия, полученная на модифицированной гидротаранной установке или с помощью сильфонного насоса-компрессора, по трубопроводу через теплообменник, в котором воздух охлаждается до температуры окружающей среды, подается на установку для получения холода.

Установка состоит из нескольких теплоизолированных барботажных колонн [16–18], заполненных жидким антифризом и соединенных теплоизолированными воздухопроводами. Хорошая теплоизоляция барботажных колонн и воздухопроводов необходима для обеспечения расширения воздуха в барботажных колоннах с жидким антифризом, без теплообмена с окружающей средой.

Сжатый воздух от генераторов пневматической энергии через теплообменник предварительного охлаждения подают в нижнюю часть первой барботажной колонны с жидким антифризом. Общее количество и высоту барботажных колонн выбирают с учетом начального избыточного давления сжатого воздуха, подаваемого в нижнюю часть первой барботажной колонны с жидким антифризом. Чем больше начальное избыточное давление воздуха, тем больше должно быть суммарное гидростатическое давление столбов жидкого антифриза в барботажных колоннах. Пузырьки сжатого воздуха, всплывая в жидком теплоизолированном антифризе, совершают работу по преодолению сил гидростатического давления столбов жидкого антифриза, расширяются и охлаждаются. Воздух пропускают последовательно через все столбы жидкого теплоизолированного антифриза до полного его расширения и охлаждения при атмосферном давлении в верхней части последнего столба теплоизолированного жидкого антифриза. Температуру замерзания жидкого антифриза понижают последовательно от первого до последнего столба жидкого антифриза по мере расширения и охлаждения воздуха. Полностью охлажденный воздух отбирают для подачи потребителю. На рис. 5. представлен общий вид устройства.

Процесс получения холода расширением воздуха в барботажной колонне моделировался в Тюменском индустриальном университете на экспериментальной установке, показанной на рис. 6, 7.

Без промежуточного теплообменника достичь понижения температуры воздуха в барботажной колонне ниже температуры окружающей среды не представляется возможным. Для этого необходим промежуточный теплообменник, в качестве которого использовался гибкий воздухопровод, опущенный в воду. В качестве капельной жидкости высотой один метр в барботажной колонне использовалась вода из акватории промежуточного холодильника с температурой $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. На экспериментальной установке пневматическая энергия генерировалась воздуходувкой. Создаваемое воздуходувкой избыточное давление на входе в барботажную колонну – 10000 Па . Температура воздуха на входе в барботажную колонну после промежуточного холодильника – $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. По результатам теоретического расчета по известным формулам [16, 17] температура адиабатного расширения воздуха до атмосферного давления при заданных параметрах эксперимента должна составлять – $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

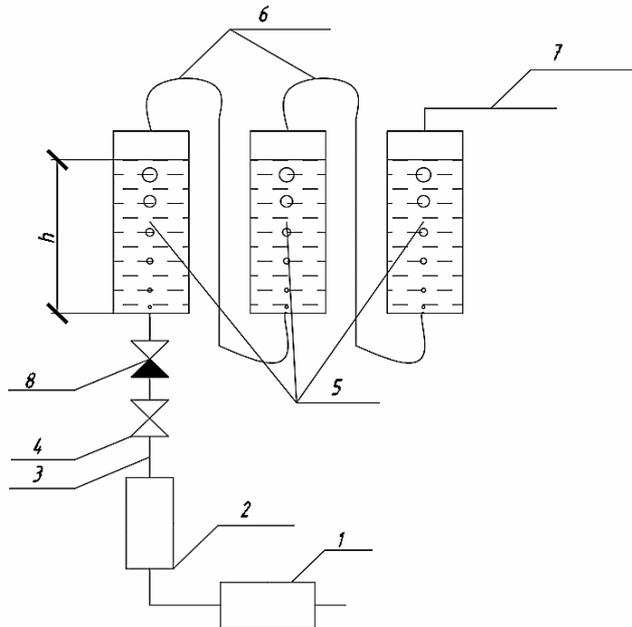


Рис. 5. Схема установки для получения холода:

- 1 – генератор пневматической энергии (модифицированный гидротаран или сильфонный насос-компрессор);
- 2 – теплообменник для предварительного охлаждения сжатого воздуха;
- 3 – воздуховод, подающий предварительно охлажденный сжатый воздух;
- 4 – регулятор давления и расхода предварительно охлажденного сжатого воздуха;
- 5 – теплоизолированный жидкий антифриз с разной температурой замерзания;
- 6 – теплоизолированные воздуховоды, соединяющие столбы жидкого антифриза;
- 7 – воздуховод, подающий охлажденный до отрицательных температур воздух потребителю;
- 8 – обратный клапан для предотвращения попадания жидкого антифриза в подающий воздуховод



Рис. 6. Фотография модельной экспериментальной установки без промежуточного теплообменника



Рис. 7. Фотография модельной экспериментальной установки для получения холода с промежуточным теплообменником

Результаты

Достичь теоретического значения температуры адиабатного расширения воздуха в барботажной колонне при проведении эксперимента на модельной установке не удалось. В процессе барботажного воздуха в колонне температура воды и воздуха на выходе из барботажной колонны постепенно падала, достигнув $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Различия в значениях теоретической и экспериментальной температуры воздуха при расширении

его до атмосферного давления при заданных начальных параметрах свидетельствует о том, что эксперимент сопровождался политропным расширением воздуха с подводом тепла из-за недостаточной теплоизоляции барботажной колонны.

Выводы

Несмотря на различие расчетного и экспериментального значений температуры охлажденного воздуха, обусловленное недостаточной теплоизоляцией экспериментальной модельной установки, эксперимент подтверждает, что при использовании даровой пневматической энергии, полученной из возобновляемых источников, холод можно генерировать расширением воздуха в барботажных колоннах. Барботажные колонны значительно проще и дешевле турбодетандерных установок, применяемых сегодня для этих целей. Кроме того, использование возобновляемой гидравлической энергии для генерации пневматической мощности с последующим получением холода барботированием воздуха в капельной жидкости снижает «углеродный след» в атмосфере.

Список источников

1. Morabito, A. Deriaz pump-turbine for pumped hydro energy storage and micro applications / A. Morabito // *Journal of Energy Storage*. – 2019. – Vol. 24. – P. 100788. – DOI: 10.1016/j.est.2019.100788.
2. Иванова, Т.Ю. Гидроэнергетическая установка, использующая сточные воды канализационных очистных сооружений города Барнаула / Т.Ю. Иванова // *Ползуновский альманах*. – 2016. – № 3. – С. 69–72.
3. Hamza Tahir, M. Production of electricity employing sewerage lines using a micro cross flow turbine / M. Hamza Tahir // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P. 67–77.
4. Uchiyama, T. A Feasibility Study of Power Generation from Sewage Using a Hollowed Pico-Hydraulic Turbine / T. Uchiyama // *Engineering*. – 2016. – Vol. 2. – P. 510–517. – DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.007
5. Adhikari, R. The Design of High Efficiency Crossflow Hydro Turbines: A Review and Extension / R. Adhikari, D. Wood // *Energies*. – 2018. – Vol. 11. – P. 267. – DOI: 10.3390/en11020267
6. Чистопольский, С.Д. Гидравлические тараны / С.Д. Чистопольский. – М.: Ленинград: ОНТИ энергетической литературы, 1936. – 151 с.
7. Овсепян, В.М. Гидравлический таран и таранные установки / В.М. Овсепян. – М.: Машиностроение, 1968. – 124 с.
8. Жуковский, Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н.Е. Жуковский. – Изд. 3.– М.: Изд-во Либроком, 2011. – 110 с.
9. Саплин, Л.А. Сравнительный обзор и оценка российских и зарубежных гидротаранных установок / Л.А. Саплин // *Вестник КрасГАУ*. – 2015. – №3. – С. 40–44.
10. Бакунин, В.В. Оптимизация подбора и регулировки гидротарана на максимальную производительность / В.В. Бакунин // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. – 2014. – № 5 (145). – С. 74–81.
11. Назеков, Н.А. Гидротараны – гидравлические насосные установки для подъема воды // *Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина*. – 2018. – №2 (47). – С. 333–338.
12. Jafri, M. Analysis effect of supply head and delivery pipe length toward the efficiency Hydraulic Ram 3 inches / M. Jafri, A. Sanusi // *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*. – 2019. – Vol.4, №.2. – P. 263–266.
13. Suarda M. Investigation on flow pattern in a hydraulic ram pump at various design and setting of its waste valve / M. Suarda, M. Sucipta, I.G.K. Dwijana // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – T. 539, №.1. – P. 012008. – DOI: 10.1088/1757-899X/539/1/012008

14. Миронов, В.В. Энергосберегающие технологии в системах водоснабжения и водоотведения / В.В. Миронов, Е.И. Вялкова, Ю.А. Иванюшин, Е.А. Ерофеев, М.В. Обухова. – Тюмень: ТИУ, 2021. – 163 с.
15. Пат. 2619131 Российская Федерация, МПК G01M9/02. Способ сооружения аэродинамической трубы / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Е.А. Ерофеев, И.В. Якимова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». – №2015153440; заявл. 11.12.2015; опубл. 12.05.2017, Бюл. №14. – 8 с.
16. Bae, K. Bubble characteristics in pressurized bubble column associated with micro-bubble dispersion / K. Bae, G.S. Go, N.S. Noh, Y.I. Lim, J. Bae, D.H. Lee // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 386. – P. 121339. – DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.215
17. Eder, E. Experimental analysis of the humidification of air in bubble columns for thermal water treatment systems / E. Eder, M. Preißinger // *Experimental thermal and fluid science*. – 2020. – Vol. 115. – P. 110063. – DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110063
18. Eder, E. Characteristics of air–liquid heat and mass transfer in a bubble column humidifier / E. Eder, S. Hiller, D. Brüggemann, M. Preißinger // *Applied thermal engineering*. – 2022. – Vol. 209. – P. 118240. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118240
19. Гейер, В.Г. Гидравлика и гидропривод / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Г. Боруменский, А.Н. Заря. – М.: Издательство «Недра», 1981. – 296 с.
20. Roos, P. Analytical modeling of advanced adiabatic compressed air energy storage: Literature review and new models / P. Roos, A. Haselbacher // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 163. – P. 112464. – DOI: 10.1016/j.rser.2022.112464

References

1. Morabito, A. Deriaz pump-turbine for pumped hydro energy storage and micro applications / A. Morabito // *Journal of Energy Storage*. – 2019. – Vol. 24. – P. 100788. – DOI: 10.1016/j.est.2019.100788.
2. Ivanova, T.Yu. Hydropower plant using wastewater from sewage treatment plants in the city of Barnaul / T.Yu. Ivanova // *Polzunov almanac*. – 2016. – Vol. 3. – P. 69–72.
3. Hamza Tahir, M. Production of electricity employing sewerage lines using a micro cross flow turbine / M. Hamza Tahir // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P. 67–77.
4. Uchiyama, T. A Feasibility Study of Power Generation from Sewage Using a Hollowed Pico-Hydraulic Turbine / T. Uchiyama // *Engineering*. – 2016. – Vol. 2. – P. 510–517. – DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.007
5. Adhikari, R. The Design of High Efficiency Crossflow Hydro Turbines: A Review and Extension / R. Adhikari, D. Wood // *Energies*. – 2018. – Vol. 11. – P. 267. – DOI: 10.3390/en11020267
6. Chistopolsky, S.D. Hydraulic rams / S.D. Chistopolsky. – М.: Leningrad: ONTI of Energy Literature, 1936. – 151 p.
7. Ovsepyan, V.M. Hydraulic ram and ram installations / V.M. Hovsepyan. – М.: Mechanical Engineering, 1968. – 124 p.
8. Zhukovsky, N.E. About hydraulic shock in water pipes / N.E. Zhukovsky. – Ed. 3. – Moscow: Liebrock Publishing House, 2011. – 110 p.
9. Saplin, L.A. Comparative review and assessment of Russian and foreign hydraulic ram installations / L.A. Saplin // *Bulletin of KrasGAU*. – 2015. – No. 3. – P. 40–44.
10. Bakunin, V.V. Optimization of selection and adjustment of hydraulic rams for maximum performance / V.V. Bakunin // *International scientific journal Alternative energy and ecology*. – 2014. – No. 5 (145). – P. 74–81.
11. Nazekov, N.A. Hydraulic rams – hydraulic pumping units for lifting water // *Bulletin of the Kyrgyz National Agrarian University named after. K.I. Scriabin*. – 2018. – No. 2 (47). – P. 333–38.

12. Jafri, M. Analysis effect of supply head and delivery pipe length toward the efficiency Hydraulic Ram 3 inches / M. Jafri, A. Sanusi // *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*. – 2019. – Vol.4, №.2. – P. 263–266.
13. Suarda, M. Investigation on flow pattern in a hydraulic ram pump at various design and setting of its waste valve / M. Suarda, M. Sucipta, I.G.K. Dwijana // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 539, №.1. – P. 012008. – DOI: 10.1088/1757-899X/539/1/012008
14. Mironov, V.V. Energy-saving technologies in water supply and sanitation systems / V.V. Mironov, E.I. Vyalkova, Yu.A. Ivanyushin, E.A. Erofeev, M.V. Obukhova. – Tyumen: IUT, 2021. – 163 p.
15. Pat. 2619131 Russian Federation, MPK G01M9/02. Method for constructing a wind tunnel / V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, E.A. Erofeev, I.V. Yakimova; applicant and patent holder of the Industrial University of Tyumen. – No. 2015153440; application 12/11/2015; publ. 05/12/2017, Bull. No. 14. – 8 p.
16. Bae, K. Bubble characteristics in pressurized bubble column associated with micro-bubble dispersion / K. Bae, G.S. Go, N.S. Noh, Y.I. Lim, J. Bae, D.H. Lee // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 386. – P. 121339. – DOI: 10.1016/j.cej.2019.03.215
17. Eder, E. Experimental analysis of the humidification of air in bubble columns for thermal water treatment systems / E. Eder, M. Preißinger // *Experimental thermal and fluid science*. – 2020. – Vol. 115. – P. 110063. – DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110063
18. Eder, E. Characteristics of air–liquid heat and mass transfer in a bubble column humidifier / E. Eder, S. Hiller, D. Brüggemann, M. Preißinger // *Applied thermal engineering*. – 2022. – Vol. 209. – P. 118240. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118240
19. Geyer, V.G. Hydraulics and hydraulic drive / V.G. Geyer, V.S. Dulin, A.G. Borumensky, A.N. Zarya. – M.: Nedra Publishing House, 1981. – 296 p.
20. Roos, P. Analytical modeling of advanced adiabatic compressed air energy storage: Literature review and new models / P. Roos, A. Haselbacher // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 163. – P. 112464. – DOI: 10.1016/j.rser.2022.112464

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 72.011.455

DOI 10.54734/20722958_2024_1_166

*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

Радионои Тимур Валерьевич,
кандидат архитектуры, доцент
E-mail: t.v.radionov@donnasa.ru

Харьковская Наталья Николаевна,
ассистент (аспирант)
E-mail: n.n.povetkina@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

Kharkovskaya Natalya Nikolaevna,
Assistant (graduate student)
E-mail: n.n.povetkina@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 ДИНАМИКА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Х.А. Бенаи, Т.В. Радионои, Н.Н. Харьковская, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин

Доказано, что современные мировые тенденции в области развития новейших архитектурно-технологических стратегических проектных решений диктуют и определяют условия реализации научно-исследовательских и практико-ориентированных подходов в области реконструкции объектов городской застройки различного функционально-типологического назначения. Обобщены критерии и определены задачи по разработке комплексных проектных решений, включающих в свою содержательную структуру архитектурные и технологические регламенты реализации поставленных задач в краткосрочный период времени за счет применения способов гибкой проектной динамики.

Предложен алгоритм, определяющий возможности реализации стратегических проектных решений при реконструкции объектов городской застройки.

Ключевые слова: архитектурно-строительный регламент, гибкая проектная динамика, стратегические проектные решения, технологические подходы, реконструкция

ARCHITECTURAL DYNAMICS WITH RECONSTRUCTION OF URBAN DEVELOPMENTS

Kh.A. Benai, T.V. Radionov, N.N. Kharkovskaya, L.S. Sabitov, I.N. Garkin

It is proved that modern global trends in the development of the latest architectural and technological strategic design solutions dictate and determine the conditions for the implementation of research and practice-oriented approaches in the field of reconstruction of urban development facilities of various functional and typological purposes. The criteria are summarized and the tasks for the development of integrated design solutions are defined, including in their substantial structure architectural and technological regulations for the implementation of tasks in a short period of time through the use of flexible design dynamics methods. An algorithm that determines the possibilities of implementing strategic design solutions for the reconstruction of urban development facilities is proposed.

Keywords: architectural and construction regulations, flexible design dynamics, strategic design solutions, technological approaches, reconstruction

Стратегические цели и задачи сохранения архитектурно-эксплуатационной пригодности функционирующих объектов городской застройки различного функционально-типологического назначения на сегодняшний день имеют все более серьезную поддержку со стороны архитектурно-строительной индустрии. Рациональное использование свободных архитектурных пространств и систематическое урегулирование архитектурно-градостроительных систем должны привести к упорядочиванию городской структуры [1], именуемой в профессиональной этике «концепция устойчивого развития» [2], которой присущи фундаментальные черты совершенствования и развития современных архитектурно-градостроительных и строительных систем, изменяемых во времени с учетом предъявляемых к ним социальных, нормативно-правовых и законодательных требований. Таким образом, проблема реконструкции зданий и сооружений с точки зрения архитектурных предложений и технологических возможностей может быть оперативно решена за счет применения *гибких проектных решений* комплексного характера. В связи с этим авторы особое внимание уделяют, во-первых, исследованию влияния горно-геологических и природно-климатических особенностей участка, где располагается объект реконструкции, а во-вторых – обобщению новых стратегических проектно-исследовательских подходов к использованию зданий, сооружений и городских территорий, которые участвуют или задействованы в процессе реконструкции.

Современные архитектурно-технологические возможности и правильная комбинация проектных действий могут способствовать к тому, что весь сложный процесс реконструкции объектов городской застройки будет минимизирован за счет верно спланированной стратегии принятия проектных действий и при необходимости исследовательских, а также аналитических решений с целью достижения возможностей придания существующим объектам осовремененных архитектурно-строительных очертаний.

Современная архитектура и ее важнейшие технологические проявления – крайне сложное направление, которое нуждается в серьезном осмыслении, профессиональной дискуссии и проведении эксплуатационно-технологического эксперимента, предполагающего определенную оценку обществом «*сложных архитектурных вмешательств*» на предмет надобности, востребованности и важности внедрения в существующую среду. Но для этого необходимо внести уточнения, что авторы подразумевают под этим термином.

Сложные архитектурные вмешательства можно условно отнести к следующим приоритетам:

– *фундаментальные приоритеты*: определяют теоретико-методологические основы формирования и развития архитектуры зданий и сооружений нового поколения, реализуют разработку вариативных концепций современной динамической архитектуры зданий и сооружений, систематизируют теоретические подходы реконструкции зданий и сооружений, городских территорий, позволяют создавать новые правила и регламенты объектов городской застройки в условиях реконструкции;

– *прикладные приоритеты*: основываются на применении системы поискового моделирования (проектирования) зданий и сооружений, на применении методов стратегического проектно-технологического управления, BIM-технологий проектирования, на разработке эффективных (универсальных) проектных решений при реконструкции зданий и сооружений, городских территорий, указывающих на востребованность разработки нормативно-правовых документов нового поколения.

Авторы исследования пришли к единому мнению, что процесс создания архитектурной формы – это основное свойство архитектурного объекта, позволяющее зрителю понять и прочувствовать масштабы той или иной задумки. На изменение формообразующих элементов объектов, подлежащих реконструкции, влияют следующие условия: ассоциативность выбранной композиции, функциональное назначение и конструктивно-технологическое решение объекта. Окружающий нас мир показывает, что в природе не встречаются правильные геометрические формы – они присущи лишь результатам деятельности человека. Бионическое происхождение формы – наиболее приемлемая теория, которую рассматривает архитектурная наука. Комфортнее всего находиться в архитектурной среде, представленной бионическими формами. Однако чтобы максимально проявить выразительность объекта реконструкции на стадии разработки проектного решения, следует строго придерживаться канонов геометрического формообразования с учетом грамотного подбора пропорций и комплексного учета технологических возможностей по объекту реконструкции.

В качестве иллюстрации приведем объективный пример – экспериментальный проект «Реконструкции здания кинотеатра «ДОНЕЦК» под современный научно-исследовательский центр в Калининском районе города Донецка», основывающийся на системе поискового проектирования с элементами гибкой проектной динамики (рис.1–5).

Концептуальное проектное решение имеет сложный архитектурно-технологический принцип построения и заключается в комплексной реконструкции здания с изменением функционального назначения, совершенствованием его архитектурно-пространственных и конструктивно-технологических характеристик с целью придания ему новых типологических приоритетов.



Рис. 1. Проектная (технологическая модель) существующего здания кинотеатра «ДОНЕЦК» до реконструкции



Рис. 2. Фасад в осях А-Д существующего здания кинотеатра «ДОНЕЦК» до реконструкции



Рис. 3. Объемно-пространственное решение здания кинотеатра «ДОНЕЦК», фрагмент со стороны главного входа в здание: проектное предложение после реконструкции

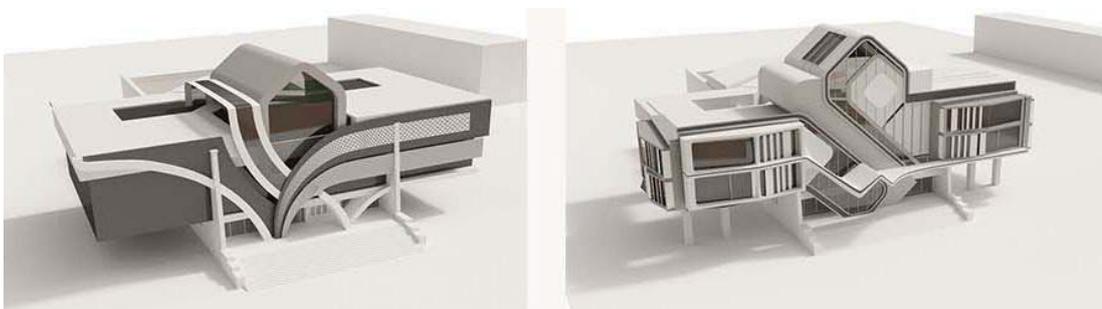


Рис. 4. Вариантное (поисковое) проектирование на промежуточной стадии разработки проекта реконструкции здания кинотеатра «ДОНЕЦК»: вариативные модели с применением простых и сложных геометрических форм



Рис. 5. Объемно-пространственное решение здания кинотеатра «ДОНЕЦК», фрагмент со стороны второстепенного входа в здание (северная сторона объекта): проектное предложение после реконструкции

С целью разработки наиболее качественной проектной продукции при реконструкции объектов городской застройки авторами статьи предложен гибкий алгоритм проектных мероприятий, включающий в содержательную структуру следующие положения, носящие рекомендательный характер:

- комплексный анализ исходно-разрешительной документации и графических материалов (с учетом применения ретроспективы в архитектурной плоскости), который с высокой точностью позволяет определить технологические возможности выполнения проекта реконструкции здания с изменением изначально заданной функции [3];

- выделение и обработка комплексных данных по типам градостроительных участков, подлежащих реконструкции, в зависимости от их функционального назначения [4];

- обоснование эффективности реконструкции объектов городской застройки, заключающееся в разработке архитектурно-градостроительной очередности проведения мероприятий, отражающих процессы реконструкции с учетом архитектурных и технологических приоритетов, в том числе возможности принятия решений о стратегическом городском развитии современной архитектуры [5];

- стратегический расчет экономической эффективности объектов или групп объектов реконструкции с учетом дальнейшего функционально-типологического развития;

- анализ, применение и в отдельных случаях корректирование исходно-разрешительной документации для объекта реконструкции; в данном случае исходно-разрешительная документация должна включать в себя: подробный опорный план участка застройки, архитектурно-планировочное задание на реконструкцию, комплексное заключение о горно-геологических исследованиях и отчет о наличии полезных ископаемых, план земельного участка, где располагается реконструируемый объект, с каталогом геодезических координат, технические условия на подключение к инженерным коммуникациям, а также заключение о технологической возможности реконструкции объекта;

- комплексный учет природно-климатических и техногенных условий, которые включают: ветровые потоки, температурный режим, данные о солнечной радиации, механические качества грунтов, атмосферные осадки, рельеф, шум, особенности влияния воды на обрабатываемую территорию – карст, овраги, затопляемость, заболоченность, размыв берегов, водотоков и водохранилищ, сели, лавины, оползни, осыпи, обрабатываемые территории, вибрация, сейсмика, экологические факторы, радиационный уровень, уровень загрязнения воды, почвы, воздуха и непосредственно все смежные факторы, которые влияют на структурное и систематическое изменение климатических и геологических условий;

- подробная классификация типологической структуры реконструируемой территории, в которую входит подсчет групп зданий, подсчет типов зданий, учет

этажности застройки, соотношение современной и типовой застройки, классификация существующих зданий и сооружений;

– исследование структуры объемно-планировочных решений объектов, подлежащих реконструкции: конфигурация объектов на участке, плотность застройки, организация ансамблевости, расположение композиционного центра, сопряжение геометрических форм и их динамические проявления [6];

– обобщение и классификация инженерного оборудования зданий и сооружений, подлежащих реконструкции: стратегическое водоснабжение, комплексное водоотведение, автономное отопление, комплексное освещение зданий и сооружений, комплексное охлаждение и электроснабжение;

– воссоздание элементов, формирующих ансамблевость застройки: формообразующие элементы, завершения зданий и сооружений, единое цветовое решение, стилеобразующие решения зданий, использование современных наружных и внутренних строительных и отделочных материалов и в целом возможность создания и проявления современной (новейшей) архитектуры [7].

Вышеприведенный гибкий алгоритм проектных мероприятий позволяет утверждать, что процесс реконструкции зданий и сооружений, а также прилегающих к ним территорий на всех стадиях развития при соблюдении действующего законодательства и нормативно-правового обеспечения может представлять собой альтернативный вариант придания новой жизни (стратегическое обновление [8]) зданиям и сооружениям с повышенным моральным и физическим износом, а также позволит создать на базе архитектурно-градостроительных объектов здания *нового поколения*, гибко адаптируемые к специфике современного пространственного развития городов [9].

Выводы. Научно-исследовательские заключения и практико-ориентированные (экспериментальные) разработки авторов статьи в области архитектурно-технологической динамики стратегических проектных решений при реконструкции объектов городской застройки позволили прийти к общей научно-практической «формуле», которую можно изложить в следующей редакции: «Процесс реконструкции объектов городской застройки должен (или может) быть реализован при условии комплексного взаимодействия архитектора и инженера-технолога, определяющего архитектурно-технологические (предельно-допустимые) возможности применения процесса *векторной реконструкции* [10]». Доказано, что предлагаемая авторами «*гибкая проектная динамика*» представляет собой стратегический проектный процесс, направленный на *уменьшение рисков*, возникающих в профессиональной проектной деятельности, *учитывающий современные архитектурно-технологические возможности* при проведении проектных и строительно-монтажных работ, включающий систематизацию и обработку данных о периоде эксплуатации архитектурно-градостроительных объектов после проведения мероприятий по их реконструкции и ввода объекта (групп объектов или сформированных ими комплексов) в эксплуатацию. Полноценное погружение в сложившуюся проблему реконструкции зданий и сооружений, городских территорий различного функционального назначения и научный, в том числе и практический, опыт авторов статьи позволяют *резюмировать*, что предложенный *гибкий алгоритм проектных мероприятий* может быть применен проектировщиками и производителями работ в полном объеме или отдельно заимствованными тезисами (в зависимости от категории сложности объекта, его типологии и, безусловно, степени видоизменения, которая строго определяется заданием на проектирование).

Список литературы

1. Большаков, А.Г. Пространственное поведение как основа организации структуры архитектурного пространства на примере городских площадей / А.Г. Большаков, А.А. Ануфриев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2005. – №7 (102). – С.127–148.
2. Вавилонская, Т.В. Стратегия обновления архитектурно-исторической среды: монография / Т.В. Вавилонская. – Самара, 2008. – 368 с.

3. Дущев, М.В. Концепция художественной интеграции в новейшей архитектуре: дисс... д-ра архитектуры: 05.23.20 / М.В. Дущев. – М.; Н. Новгород, 2014. – 571 с. – С.572–588.
4. Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития / Г.В. Есаулов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета «Архитектура и градостроительство». – 2014. – № 6. – С. 9–24. – ISSN 2310-0044. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivaya-arhitektura-ot-printsipov-k-strategii-razvitiya/viewer> (дата обращения: 05.01.2024).
5. Бенаи, Х.А. Архитектурная оптимизация проектных решений / Х.А. Бенаи, Т.В. Радионов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 191–198.
6. Матехина, О.В. Градостроительные функции и художественно-композиционная роль общественных зданий в городской среде / О.В. Матехина, Ю.К. Осипов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2016. – №1 (15). – С. 31–34. – ISSN 2304-4497.
7. Попов, А.О. 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 // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 199–205.
8. Pomorov, S.B. Retrospective and contradictions of creating architectural projects in the context of digitalization / S.B. Pomorov, A.S. Nabiyeu // Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction. – 2021. – № 4 (82). – P. 63–73.
9. Grimaldi, D. Governance, decision-making, and strategy for urban development: Implementing Data-Driven Strategies in Smart Cities / D. Grimaldi, E.B. Villar, L. Dupont, Jose M. Sallan, C. Carrasco-Farré // A Roadmap for Urban Transformation. – 2022. – P. 47–87.
10. Maa, Wei. Complex buildings orientation recognition and description based on vector reconstruction / Wei Maa, Bing Wangd, Changzhen Liu, Qingquan Li, Chao Yang, Jianping Pana, Baoding Zhoue, Yankun Wang // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2023. – Vol. 123. – P. 1–3.

References

1. Bolshakov, A.G. Spatial behavior as the basis for organizing the structure of architectural space using the example of city squares / A.G. Bolshakov, A.A. Anufriev // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. – 2005. – No. 7 (102). – P.127–148.
2. Vavilonskaya, T.V. Strategy for updating the architectural and historical environment: monograph / T.V. Vavilonskaya. – Samara, 2008. – 368 p.
3. Dutsev, M.V. The concept of artistic integration in modern architecture: dissertation for Doctor of Architecture: 05.23.20 / M.V. Dutsev. – М.; Nizhny Novgorod, 2014. – 571 p. – P.572–588.
4. Esaulov, G.V. Sustainable architecture – from principles to development strategy / G.V. Esaulov // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering “Architecture and Urban Planning”. – 2014. – No. 6. – P. 9–24. – ISSN 2310-0044. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivaya-arhitektura-ot-printsipov-k-strategii-razvitiya/viewer> (access date: 01/05/2024).
5. Benai, Kh.A. Architectural optimization of design solutions / Kh.A. Benai, T.V. Radionov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 4 (57). – P. 191–198.
6. Matekhina, O.V. Urban planning functions and the artistic and compositional role of public buildings in the urban environment / O.V. Matekhina, Yu.K. Osipov // Bulletin of the Siberian State Industrial University. – 2016. – No. 1 (15). – P. 31–34. – ISSN 2304-4497.
7. Popov, A.O. A systematic approach to the analysis of the technical condition of cultural heritage objects using the example of the “ORESHEK” building of the Shlisselburg

Fortress / A.O. Popov, L.R. Mailyan, L.S. Sabitov, A.M. Danilov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 4 (57). – P. 199–205.

8. Pomorov, S.B. Retrospective and contradictions of creating architectural projects in the context of digitalization / S.B. Pomorov, A.S. Nabiyeu // Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction. – 2021. – № 4 (82). – P. 63–73.

9. Grimaldi, D. Governance, decision-making, and strategy for urban development: Implementing Data-Driven Strategies in Smart Cities / D. Grimaldi, E.B. Villar, L. Dupont, Jose M. Sallan, C. Carrasco-Farré // A Roadmap for Urban Transformation. – 2022. – P. 47–87.

10. Maa, Wei. Complex buildings orientation recognition and description based on vector reconstruction / Wei Maa, Bing Wangd, Changzhen Liu, Qingquan Li, Chao Yang, Jianping Pana, Baoding Zhoue, Yankun Wang // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2023. – Vol. 123. – P. 1–3.

УДК 624

DOI 10.54734/20722958_2024_1_174

Петрозаводский государственный университет

Россия, 185910, г. Петрозаводск,
пр. Ленина, д. 33

Селютина Любовь Федоровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства»
E-mail: selutinalf@mail.ru

Ратькова Елена Игоревна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства»
E-mail: ratjkova@mail.ru

Корнеев Артур Александрович,
преподаватель кафедры «Технология
и организация строительства»
E-mail: bagrom18@yandex.ru

Petrozavodsk State University

Russia, 185910, Petrozavodsk,
33, Lenin Avenue

Selutina Lyubov Feodorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Technologies and
Construction Management»
E-mail: selutinalf@mail.ru

Ratkova Elena Igorevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Technologies and
Construction Management»
E-mail: ratjkova@mail.ru

Korneev Arthur Alexandrovich,
Lecturer of the Department «Technologies
and Construction Management»
E-mail: bagrom18@yandex.ru

ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ КОНСТРУКЦИЙ ИСТОРИЧЕСКОГО ЗДАНИЯ В ПОВЕНЦЕ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

Л.Ф. Селютина, Е.И. Ратькова, А.А. Корнеев

Представлены результаты испытаний малых стандартных образцов на сжатие вдоль волокон. Определены прочность и расчетное сопротивление древесины несущей конструкции исторического здания в возрасте 91 года. Установлено количество образцов, необходимых для получения достоверных результатов. Испытания образцов выполнены на машине SHIMADZU AGX300.

Ключевые слова: испытания, прочность древесины на сжатие вдоль волокон, расчетное сопротивление древесины

LONG-TERM DURABILITY OF WOOD STRUCTURES OF A HISTORIC BUILDING IN POVENTSE (REPUBLIC OF KARELIA)

L.F. Selutina, E.I. Ratkova, A.A. Korneev

The results of tests of small standard samples for compression along the fibers are presented. The strength of the wood of the supporting structure of the historical building at the age of 91 and the calculated resistance of the wood were determined. The number of samples required to obtain reliable results has been determined. The samples were tested on a SHIMADZU AGX300 machine.

Keywords: tests, compressive strength of wood along the fibers, calculated resistance of wood

Введение

Жилое здание (рис. 1) является объектом культурного наследия регионального значения. Надземные конструкции данного исторического здания выполнены из древесины. Здание находится в аварийном состоянии вследствие недостаточного ухода и отсутствия защиты конструкций от воздействий окружающей среды (осадки в виде дождя и снега, перепады температуры внутри здания, биодеструкция древесины). Здание построено в период сооружения Беломорско-Балтийского канала в 1930 г. [1]. Брус для определения прочности древесины был найден внутри здания. Изучение длительной прочности деревянных конструкций здания является одной из целей данного исследования.



Рис. 1. Жилое двухэтажное здание в поселке Повенец, Республика Карелия

Прочность древесины при длительных постоянных нагрузках

На прочность древесины, благодаря ее реологическим свойствам, значительное влияние оказывает продолжительность действия нагрузки [2]. Длительное сопротивление древесины является показателем действительной прочности древесины в отличие от предела прочности, определяемого кратковременными испытаниями. Большой вклад в исследования зависимости прочности древесины от времени действия нагрузки внесли Н.Л. Леонтьев [3], Ю.М. Иванов [4], Л.М. Перельгин [5], W. Madsen [6] и многие другие. Результаты проведенных исследований механических свойств древесины различных пород при статических нагрузках представлены в работах В.Н. Волынского [7]. Анализ изменения несущей способности деревянных конструкций в процессе их длительной эксплуатации приведен в диссертации Д.Ю. Стрельцова [8]. Результаты определения прочности древесины стропил здания постройки 1914 года в поселке Эссойла (Республика Карелия) представлены в статье [9]; прочность древесины в возрасте 80 лет – в работе [10].

Целью данного исследования прочности древесины и ее связи с возникающими при нагружении деформациями является установление величины предела прочности при длительном действии нагрузок в направлении вдоль волокон. Характер изменения прочности древесины в зависимости от времени действия нагрузки отражает кривая, асимптотически приближающаяся к прямой, соответствующей напряжению, называемому пределом долговременного сопротивления [2]. В среднем для всех видов напряженного состояния предел долговременного сопротивления составляет примерно 0,5–0,6 величины предела прочности при кратковременных статических испытаниях.

Подготовка стандартных образцов для экспериментальных исследований

На важность экспериментальных исследований при техническом обследовании объектов культурного наследия обращается внимание в статье [11].

На рис. 2 показан фрагмент бруса, изъятый из конструкции стены указанного выше исторического здания, который был использован для изготовления малых стандартных образцов. Форма и размеры образцов (20×20×30 мм) приняты по ГОСТ 16483.



Рис. 2. Фрагмент бруса для изготовления малых стандартных образцов (размеры фрагмента бруса 16,5×19 см, количество годовых колец 125)

Приборы и оборудование

Испытания малых стандартных образцов древесины конструкций здания на сжатие выполнены на машине SHIMADZU AGX300. Погрешности измерений не превышают одного процента.

Определение необходимого числа наблюдений в опытах

Необходимое число образцов при испытании древесины на прочность при сжатии вдоль волокон определялось в соответствии с предложениями Н.Л. Леонтьева [12] и Г.Ф. Прокофьева [13]. По рекомендациям, приведенным в [7], необходимое число образцов составляет 26 шт. В соответствии с [13] необходимое число наблюдений определяется по формуле

$$n = \frac{V^2 t^2}{p^2}.$$

Вариационный коэффициент V принимается по результатам предварительных опытов. Показатель точности прогнозирования $p = 5\%$. Показатель достоверности $t = 2,58$ принимается при вероятности $p_v = 0,99$ (что согласуется с указанной выше погрешностью измерений, равной 1%). Результаты подсчета необходимого числа опытов представлены в таблице.

Данные таблицы показывают, что близкие значения по предложениям Н.Л. Леонтьева и Г.Ф. Прокофьева можно получить, если количество образцов равно 29.

Образцы, подготовленные для кратковременных испытаний, показаны на рис. 3.

Определение необходимого числа наблюдений в опыте.
Предварительные опыты

Напряженно-деформированное состояние	Предел прочности в серии предварительных испытаний, МПа	Среднее значение предела прочности, МПа	Среднее квадратичное отклонение S^2 , МПа	Коэффициент вариации, %	Необходимое число наблюдений, шт.
Сжатие вдоль волокон	5 образцов				
	20,78; 17,82; 18,00; 18,33; 18,53	18,69	1,071	6,407	11
	10 образцов				
	18,35; 17,544; 17,44; 23,89; 19,059	18,97	1,949	10,278	29 (28,115)



Рис. 3. Малые стандартные образцы до кратковременных испытаний на машине SHIMADZU AGX300

Испытания малых стандартных образцов на сжатие вдоль волокон

При предельной нагрузке происходило смятие торцов образцов. Вид образцов после испытаний представлен на рис. 5. Диаграммы работы древесины на сжатие вдоль волокон показаны на рис. 6. (Представлены диаграммы 5 образцов из 29 испытанных.)



Рис. 4. Испытания малых стандартных образцов



Рис. 5. Вид малых стандартных образцов после испытаний

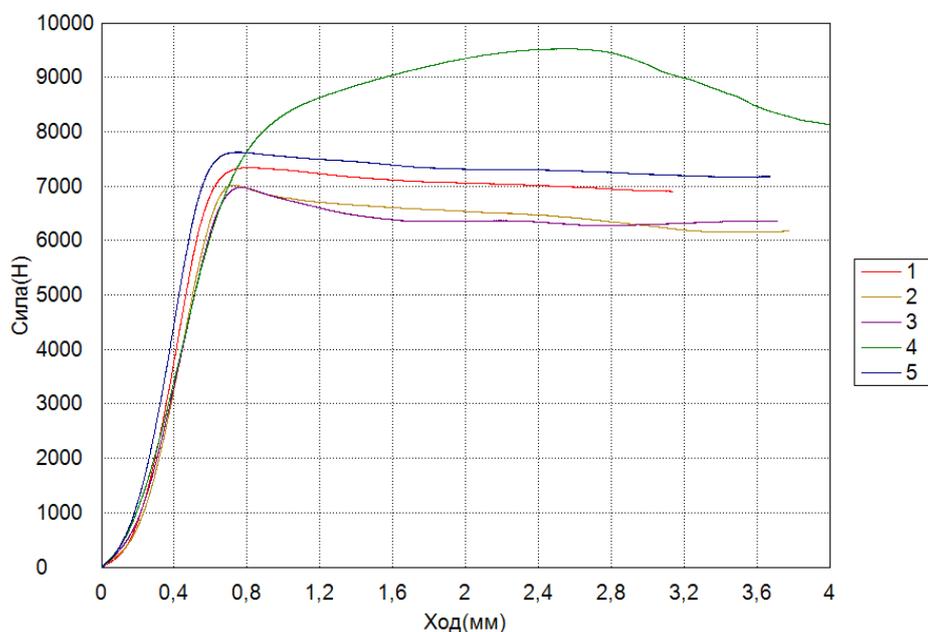


Рис. 6. Фрагмент протокола испытаний. Диаграммы работы древесины на сжатие вдоль волокон (справа показаны условные обозначения диаграмм по номерам образцов)

На участке диаграммы до 7000 – 8000 Н древесина работает почти упруго, и рост деформаций практически происходит пропорционально увеличению нагрузки. Деформации на этом этапе составляют 0,6 мм. Далее развиваются пластические деформации. Разрушение образцов сопровождается смятием торцов образцов.

Определение среднего значения предела прочности на сжатие вдоль волокон

Среднее значение прочности древесины подсчитано для 26 образцов, испытанных в январе 2022 г. в лаборатории Института лесных, горных и строительных наук Петрозаводского государственного университета. Для каждого образца вычислялось нормальное напряжение путем деления пикового значения силы при сжатии вдоль волокон на площадь поперечного сечения.

Среднее значение предела прочности на сжатие вдоль волокон составляет 18,85 МПа; среднее квадратичное отклонение $S = 1,719$; вариационный коэффициент $V = 15,6\%$; средняя ошибка среднего арифметического $m = 0,574$ МПа; показатель точности $P = 3,045\%$.

Определение длительного сопротивления древесины

Длительное сопротивление древесины является показателем действительной прочности в отличие от предела прочности, определяемого быстрыми испытаниями стандартных образцов на испытательной машине.

Определение прочности древесины в год завершения строительства здания (1930 г.)

Средняя длительная прочность древесины определена по формуле (III.44) [14]:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_t}{k_{1(t)}},$$

где σ_{τ} – предел прочности при заданной продолжительности действия нагрузки; $k_{1(t)}$ – коэффициент длительной прочности древесины для заданного времени t .

Получено, что средняя длительная прочность древесины для срока действия неизменной нагрузки в течение 91 года $\sigma_t = 18,85$ МПа, а прочность древесины в год завершения строительства (1930 г.) составляла 37,97 МПа.

Нормативное сопротивление древесины при сжатии вдоль волокон вычислено по формуле

$$R^H = M \left(1 - t \frac{V}{100}\right),$$

где M – среднее арифметическое, $M = 18,854$ МПа; t – показатель достоверности, $t = 2,58$; V – вариационный коэффициент, $V = 15,6$ %.

Расчетное сопротивление древесины определено по формуле

$$R = \frac{R^H}{K},$$

где K – коэффициент безопасности по материалу, $K = 2,2$.

Расчетное сопротивление древесины составляет 5,12 МПа (по результатам испытаний стандартных образцов на сжатие вдоль волокон древесины в 2022 г.).

Выводы

Исследованы деревянные конструкции исторического здания в поселке Повенец (Республика Карелия), которое является объектом культурного наследия регионального значения.

Определены: число годовых слоев 125; средняя плотность древесины 505 кг/м³; выполнены испытания малых стандартных образцов при сжатии вдоль волокон.

Необходимое количество стандартных образцов для получения достоверных результатов определено по предложениям Н.Л. Леонтьева [12] и Г.Ф. Прокофьева [13].

Установлено, что средний предел прочности древесины на сжатие вдоль волокон после 91 года эксплуатации конструкций равен 18,85 МПа, что составляет 49,65 % от предела прочности в год завершения строительства (37,97 МПа).

Расчетное сопротивление древесины составляет 5,12 МПа, что может рассматриваться как заниженное значение, которое рекомендуется уточнить в дальнейших исследованиях.

Результаты данного исследования подтверждают надежность древесины как материала строительных конструкций по критерию прочности при условии, что обеспечивается стабильная защита деревянных конструкций зданий от воздействий окружающей среды (осадки в виде дождя и снега, перепады температуры внутри здания, биодеструкция древесины).

Результаты испытаний расширяют знания в области длительной прочности древесины, могут быть использованы в научной деятельности и включены в базу данных опытных величин пределов прочности древесины строительных конструкций исторических зданий.

1. Корнеев, А.А. Анализ состояния и возможностей сохранения объекта культурного наследия в Повенце / А.А. Корнеев, Е.И. Ратькова, Л.Ф. Селютина // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1(54). – С. 186–195. – DOI: 10.54734/20722958_2023_1_186
2. Длительная прочность древесины. – URL: <https://poisk-ru.ru/s3470t22.html>
3. Леонтьев, Н.Л. Длительное сопротивление древесины / Н.Л. Леонтьев. – М.: Гослесбумиздат, 1957. – 132 с.
4. Иванов, Ю.М. Оценка длительной прочности древесины при изгибе по результатам кратковременных испытаний / Ю.М. Иванов, Ю.Ю. Славик // ИВУЗ «Лесной журнал». – 1981. – №2.
5. Перелыгин, Л.М. Древесиноведение / Л.М. Перелыгин. – М.: Лесная промышленность, 1962. – 284 с.
6. Madsen, B. Duration of load test for wet lumber in bending / B. Madsen // Forest Products Journal. – 1975. – N5. – P. 33–40.
7. Волинский, В.Н. Взаимосвязь и изменчивость показателей физико-механических свойств древесины / В.Н. Волинский. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. – 217 с.
8. Стрельцов, Д.Ю. Исследование несущей способности длительно эксплуатируемых деревянных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Д.Ю. Стрельцов; Центр науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В.А. Кучеренко. – М., 2003. – 26 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003237090>
9. Селютина, Л.Ф. Деревянные конструкции здания постройки 1914 года в поселке Эссойла / Л.Ф. Селютина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1. – С.119–125.
10. Курьянова, Т.К. Исследование прочности древесины при длительной постоянной нагрузке / Т.К. Курьянова, А.Д. Платонов, Н.Н. Федоткин, И.С. Фокина // Лесотехнический журнал. – 2002. – №2(6) 2012. – С.7–10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-prochnosti-drevesiny-pri-dlitelnoy-postoyannoynagruzke>
11. Гарькин, И.Н. Некоторые аспекты проведения предпроектных работ на объектах культурного наследия / И.Н. Гарькин, Л.С. Сабитов, А.Р. Гайдук, Т.А. Глебова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11 (95). – С. 678–688. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8019>
12. Леонтьев, Н.Л. Техника статистических вычислений / Н.Л. Леонтьев. – М.: Лесная промышленность, 1966. – 247 с.
13. Прокофьев, Г.Ф. Основы прикладных научных исследований при создании новой техники: монография / Г.Ф. Прокофьев, Н.Ю. Микловцик; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: ИД САФУ, 2014. – 171 с.
14. Основные закономерности длительной прочности древесины и пластмасс. – URL: https://studopedia.ru/3_170766_osnovnie-zakonomernosti-dlitelnoy-prochnosti-drevesini-i-plastmass.html

References

1. Korneev, A.A. Analysis of the state and possibilities of preservation a cultural heritage site in Povenets / A.A. Korneev, E.I. Ratkova, L.F. Selutina // Regional architecture and engineering. – 2023. – №1(54). – P. 186–195. – DOI: 10.54734/20722958_2023_1_186
2. Long-lasting durability of wood. – URL: <https://poisk-ru.ru/s3470t22.html>
3. Leontiev, N.L. Long-term resistance of wood / N.L. Leontiev. – M.: Goslesbumizdat, 1957. – 132 p.
4. Ivanov, Yu.M. Assessment of the long-term strength of wood during bending according to the results of short-term tests / Yu.M. Ivanov, Yu.Y. Slavik // IVZ «Lesnoy zhurnal». – 1981. – №2.
5. Perelygin, L.M. Wood science / L.M. Perelygin. – M.: Forest industry, 1962. – 284 p.

6. Madsen, B. Duration of load test for wet lumber in bending / B. Madsen // *ForesrProducts Journal*. – 1975. – N5. – P. 33–40.
7. Volynsky, V.N. Interrelation and variability of indicators of physical and mechanical properties of wood / V.N. Volynsky. – Arkhangelsk: Publishing House of AGTU, 2000. – 217 p.
8. Streltsov, D.Yu. Research of the load-bearing capacity of long-term exploitable wooden structures: abstract. dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.23.01/ D.Yu. Streltsov; Center. sci.-and after. in-t builds. designs named after V.A. Kucherenko. – M., 2003. – 26 p. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003237090>
9. Selutina, L.F. Wooden structures of the building built in 1914 on the village of Essoila / L.F. Selutina.– Electronic text // *Regional Architecture and Engineering*. – 2020.– No.1. – P.119–125.
10. Kuryanova, T.K. Study of the strength of wood under prolonged constant load/ T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, N.N. Fedotkin, I.S. Fokina // *Forestry journal*. – 2002. – №2(6) 2012. – P.7–10.
11. Garkin, I.N. Some aspects of pre-project work on cultural heritage sites / I.N. Garkin, L.S. Sabitov, A.R. Gaiduk, T.A. Glebova // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2022. – No. 11 (95). – P. 678–688. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8019>
12. Leontiev, N.L. Technique of statistical computing / N.L. Leontiev. – M.: Forest industry, 1966. – 247 p.
13. Prokofiev, G.F. Fundamentals of applied scientific research in the creation of new technology: monograph / G.F. Prokofiev, N.Yu. Miklovtsik; Sev. (Arctic) feder. un-t. – Arkhangelsk: SAFU Publishing House, 2014. – 171 p.
14. The main patterns of long-term strength of wood and plastics. – URL: https://studopedia.ru/3_170766_osnovnie-zakonomernosti-dlitelnoy-prochnosti-drevesini-plastmass.html