

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Адрес редакции:

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 исполь-
зование в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.

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

Подписано к печати 10.06.2022.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 25,125. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 242.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО**
2(51)/2022

Содержание

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

Родин А.И., Ермаков А.А., Ерофеев В.Т.
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРИСТОЙ
СТЕКЛОКЕРАМИКИ ИЗ ШИХТЫ
НА ОСНОВЕ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД,
МОДИФИЦИРОВАННОЙ БОКСИТАМИ 5

Макридин Н.И., Максимова И.Н.
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ
ВО ВРЕМЕНИ 17

Королев Е.В., Гарькина И.А.,
Данилов А.М.
ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИДЕНТИФИКАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ
ПРИ СИНТЕЗЕ КОМПОЗИТОВ 24

Логанина В.И., Зайцева М.В.
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАПОЛНИТЕЛЯ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕЦЕПТУРЫ
ИЗВЕСТКОВОГО СОСТАВА
ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ ЗДАНИЙ 33

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
СИНТЕЗ МАТЕРИАЛОВ
С РЕГУЛИРУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ..... 39

Арискин М.В., Логанина В.И.,
Светалкина М.А.
ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ
БЕТОНОВ НА МОНОЛИТНОСТЬ
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ 45

Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М.,
Аниканова Т.В., Хахалева Е.Н.
К ВОПРОСУ ОБ АНОМАЛЬНОМ
СХВАТЫВАНИИ И ТВЕРДЕНИИ
ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА 53

Рыжов А.С., Титунин А.А.
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ДРЕВЕСНО-
МИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА
НА ЕГО ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ 62

© Авторы публикаций, 2022

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2022

© ПГУАС, 2022

Волоцкой А.Н., Авдонин В.В. ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ 68	Андреев С.Ю., Князев В.А. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПУЗЫРЬКИ, ВСПЛЫВАЮЩИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ И РЕЖИМЕ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ ЗАКОНА СОПРОТИВЛЕНИЯ 134
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ75	Андреев С.Ю., Шенин А.И., Курносков Н.Е., Алексеев Д.П. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ ВИХРЕВОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АЭРАТОРА 142
Шенин А.И., Зернов В.В., Зайцев М.Б. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НЕСУЩИХ КИРПИЧНЫХ СТЕН: СТРАХОВОЧНЫЕ СТОЙКИ 75	Наумов В.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ТРУБОПРОВОДА ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЗАТРАТ НА ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС 153
Тарасеева Н.И., Крылов А.С., Кузнецов Д.А. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОСНОВЫ РАЗРУШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ 82	Гришин Б.М., Бикунцова М.В., Титов Е.А., Шенин А.И. УДАЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ФОРМ ЖЕЛЕЗА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПРИМЕ- НЕНИЕМ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА 161
Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Арискин М.В. ОСНОВЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА 89	АРХИТЕКТУРА..... 167
Арискин М.В., Мартышкин Д.О. СОЕДИНЕНИЯ НА ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБАХ В ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ 96	Гречишкин А.В., Антонов А.И., Путинцева А.А. ПРЯМОЙ ЗВУК ОТ ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ НА ТЕРРИТОРИИ МАЛОЭТАЖНОЙ ЗАСТРОЙКИ 167
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ104	Макаревич Е.А., Селютина Л.Ф. ОБЪЕКТ ИСТОРИИ АРХИТЕКТУРЫ И КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: ЧАСОВНЯ НИКОЛАЯ ЧУДОТВОРЦА В МЕЛОЙГУБЕ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)..... 175
Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А., Мишин А.А., Мочалов А.В. КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СГОРАНИЯ ЦЕРКОВНЫХ СВЕЧЕЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ СООРУЖЕНИЯХ..... 104	Чикота С.И. ЛЕПНОЙ ДЕКОР ФАСАДОВ ЗДАНИЙ СОВЕТСКОГО ПЕРИОДА ГОРОДА МАГНИТОГОРСКА..... 184
Еремкин А.И., Фильчакина И.Н., Пономарева И.К., Орлова Н.А. ПЛАСТИНЧАТЫЙ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬ СИСТЕМЫ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЙ КУЛЬТУРНО- ЗРЕЛИЩНЫХ ЗАЛОВ..... 117	Береговой А.М. ВЛИЯНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА МИКРОКЛИМАТ И ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПОМЕЩЕНИЙ..... 192
Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Мазурин Н.Н. МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ПЕН 124	Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Викторова О.Л. АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ: ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА 196

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Taraseeva N.I., Krylov A.S., Kuznetsov D.A. PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES AND BASIS OF DESTRUCTION OF TRANSPORT STRUCTURES ON HIGHWAYS	82
Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeev V.T. STRUCTURE AND PROPERTIES OF POROUS GLASS CERAMICS FROM A CHARGE MIXTURE BASED ON SILICEOUS ROCKS MODIFIED WITH BAUXITES.....	6	Sadenko D.S., Garkin I.N., Ariskin M.V. BASICS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT OF CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS	89
Makridin N.I., Maksimova I.N. PREDICTION AND OPTIMIZATION OF CRACK RESISTANCE OF MODIFIED CONCRETE.....	17	Ariskin M.V., Martyshkin D.O. CONNECTIONS ON GLUED FIBERGLASS WASHERS IN WOODEN STRUCTURES	96
Korolev E.V., Garkina I.A., Danilov A.M. PRACTICAL ASPECTS OF IDENTIFICATION AND MANAGEMENT IN THE SYNTHESIS OF COMPOSITES	24	ENGINEERING SYSTEMS	104
Loganina V.I., Zaytseva M.V. JUSTIFICATION OF THE FILLER CHOICE IN THE DEVELOPMENT OF THE FORMULA OF LIME COMPOSITION FOR RESTORATION OF BUILDINGS	33	Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Orlova N.A., Mishin A.A., Mochalov A.V. INTEGRATED SOLUTION FOR LOCALIZATION OF POLLUTION IN THE PROCESS OF COMBUSTION OF CHURCH CANDLES IN ORTHODOX BUILDINGS ...	104
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. SYNTHESIS OF MATERIALS WITH ADJUSTABLE PROPERTIES.....	39	Eremkin A.I., Фильчакина I.N., Orlova H.A., Ponomareva I.K. LAMALLAR AIR DISTRIBUTOR OF DISPLACEMENT VENTILATION SYSTEMS FOR PLACES CULTURAL ENTERTAINMENT COMPLEXES	117
Ariskin M.V., Loganina V.I., Svetalkina M.A. THE INFLUENCE OF CEMENT CONCRETE POROSITY ON THE SOLIDITY OF PAINT COATINGS	45	Vilkova N.G., Mishina S.I., Mazurin N.N. MODIFICATION OF THE SURFACE OF SOLID PARTICLES FOR OBTAINING STABLE FOAM.....	124
Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Anikanova T.V., Khakhaleva E.N. ON THE QUESTION OF ABNORMAL SETTING AND HARDENING OF PORTLAND CEMENT	53	Andreev S.Yu., Knyazev V.A. THEORETICAL ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF A WATER-AIR MIXTURE CONTAINING BUBBLES FLOATING IN THE TRANSIENT TURBULENT MODE AND SELF-SIMILARITY MODE	134
Ryhzov A.S., Titunin A.A. THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF WOOD-MINERAL COMPOSITE ON ITS STRENGTH INDICATORS.....	62	Andreev S.Yu., Shein A.I., Kurnosov N.E., Alekseev D.P. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESS OF OPERATION OF A HYDRAULIC AERATOR VORTEX	142
Volotskoy A.N., Avdonin V.V. ESTIMATION OF DYNAMICS OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF DAMPING POLYMER MATERIALS BASED ON ETHYLENE-VINYL ACETATE OVER TIME.....	68	Naumov V.A. DETERMINATION OF PIPELINE OPTIMAL DIAMETER OF LOCAL WATER SUPPLY SYSTEM, TAKING INTO ACCOUNT LOAD CHARACTERISTICS AND COSTS OF A CENTRIFUGAL PUMP.....	153
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	75	Grishin B.M., Bikunova M.V., Titov E.A., Shein A.I. REMOVAL OF ORGANIC IRON FROM GROUNDWATER USING HYDROGEN PEROXIDE	161
Shein A.I., Zernov V.V., Zaitsev M.B. RESTORING OF BEARING BRICK WALLS OPERABILITY: SAFETY RACKS	75		

ARCHITECTURE.....	167	Chikota S.I.	STUCCO DECOR OF FACADES OF SOVIET- ERA BUILDINGS IN MAGNITOGORSK ...	184
Grechishkin A.V., Antonov A.I., Putintseva A.A.		Beregovoy A.M.	INFLUENCE OF AIR PERMEABILITY OF EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES ON MICROCLIMATE AND HEAT LOSSES OF PREMISES	192
DIRECT SOUND FROM TRANSPORT HIGHWAY ON THE TERRITORY OF LOW- RISE BUILDINGS	167	Derina M.A., Petryanina L.N., Viktorova O.L.	TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS IN ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION DESIGN: PROBLEMS AND SUGGESTIONS	196
Makarevich E.A., Selutina L.F.				
THE OBJECT OF THE HISTORY OF ARCHITECTURE AND CULTURAL HERITAGE: THE CHAPEL OF ST. NICHOLAS THE WONDERWORKER IN MELOYGUBA (REPUBLIC OF KARELIA).....	175			

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 681.7.035:661.682

DOI 10.54734/20722958_2022_2_5

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)*

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевикская, д. 68
тел. (8342) 47-71-56

Родин Александр Иванович,

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

E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Ермаков Анатолий Анатольевич,
аспирант кафедры «Строительные
материалы и технологии»

E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук, профессор,
академик РААСН, декан архитектурно-
строительного факультета, директор НИИ
«Материаловедение», зав. кафедрой
«Строительные материалы и технологии»
E-mail: al_rodin@mail.ru

*National Research Ogarev Mordovia State
University (MRSU)*

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Rodin Aleksander Ivanovich,

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

E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Ermakov Anatoly Anatolyevich,
Postgraduate student of the department
«Building Materials and Technologies»
E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Yerofeev Vladimir Trofymovich,
Doctor of Sciences, Professor, Academician of
the RAACN, Dean of the Faculty of
Architecture and Construction, Director of the
Research Institute «Materials Science», Head
of the department «Building Materials and
Technology»
E-mail: al_rodin@mail.ru

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРИСТОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ИЗ ШИХТЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД, МОДИФИЦИРОВАННОЙ БОКСИТАМИ*

А.И. Родин, А.А. Ермаков, В.Т. Ерофеев

Описан процесс получения пористой стеклокерамики с предельной температурой эксплуатации не менее 900 °С из шихты на основе кремнистых пород путем ее модифицирования бокситами. Шихту получали совместной механохимической активацией кремнистых пород, бокситов, Na_2CO_3 и KCl в шаровой планетарной мельнице и затем обжигали ее при температуре 850 °С. Были получены образцы стеклокерамики с равномерной мелкопористой структурой в форме блоков. Изучена структура и определены физическо-механические и теплофизические свойства образцов. Кажущаяся плотность образцов находится в пределах 225–261 кг/м³. Прочность при изгибе и сжатии достигает соответственно 1,5 МПа и 4,3 МПа. Минимальный коэффициент теплопро-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10422).

водности модифицированных образцов составил 0,062 Вт/м·°С. Выявлена предельная температура эксплуатации материала, равная 900 °С включительно. Полученные материалы по многим показателям превосходят пеностекло и другие аналоги. Разработанные материалы рекомендуется использовать в качестве теплоизоляции котельного оборудования, плавильных печей и т.п.

Ключевые слова: пористая стеклокерамика, кремнистые породы, бокситы, кажущаяся плотность, прочность, теплопроводность, предельная температура эксплуатации

STRUCTURE AND PROPERTIES OF POROUS GLASS CERAMICS FROM A CHARGE MIXTURE BASED ON SILICEOUS ROCKS MODIFIED WITH BAUXITES*

A.I. Rodin, A.A. Ermakov, V.T. Erofeev

The purpose of the work is to obtain a porous glass-ceramic with a limiting operating temperature of at least 900 °C from a mixture based on siliceous rocks by modifying it with bauxites. The charge mixture for obtaining samples was obtained by joint mechanochemical activation of siliceous rocks, bauxites, Na_2CO_3 and KCl in a planetary ball mill. The obtained charge mixture was fired at a temperature of 850 °C. Samples of glass ceramics with a uniform finely porous structure in the form of blocks have been obtained. The structure was studied and the physical-mechanical and thermophysical properties of the samples were determined. The apparent density of the samples is in the range of 225–261 kg/m³. Flexural and compressive strength reaches 1.5 MPa and 4.3 MPa, respectively. The minimum thermal conductivity of the modified samples is 0.062 W/m·°C. The limiting operating temperature of the material is up to 900 °C inclusive. The resulting materials are superior to foam glass and other analogues in many respects. They can be used as thermal insulation for boiler equipment, melting furnaces, etc.

Keywords: porous glass ceramics, siliceous rocks, bauxite, apparent density, strength, thermal conductivity, limiting operating temperature

Введение

Пористые стеклокерамические материалы обладают рядом уникальных характеристик: имеют относительно высокую прочность и химическую стойкость, не горят, плохо проводят тепло, могут эксплуатироваться при высоких температурах и др. [1, 2]. Их часто используют в качестве теплоизоляции при строительстве и ремонте объектов гражданского и промышленного назначения [3, 4].

В качестве сырья для получения пористой стеклокерамики используют отходы стекла [5, 6], шлаки металлургических производств [7], летучую золу [1, 2, 8, 9], кремнистые породы [10–12] и др. Пористую стеклокерамику из кремнистых пород в основном получают методом щелочной активации компонентов. Диатомит, цеолитсодержащий трепел, опоку смешивают с водным раствором NaOH высокой концентрации. Затем полученную смесь гранулируют и обжигают [10–12].

Нами получена пористая стеклокерамика из кремнистых пород методом порошкового вспенивания без использования вспенивающих компонентов. В этом случае шихта вспенивается за счет содержащихся в породе цеолитовых минералов. Предлагаемая технология позволяет получать образцы в форме блоков [13]. Полученные материалы имеют относительно высокую прочность, низкую теплопроводность, но предельная температуры их эксплуатации не превышает 850 °С [13, 14], что недостаточно для теплоизоляции множества промышленных установок [3].

В литературе имеются данные о повышении предельной температуры эксплуатации стеклокерамики с увеличенным в составе шихты количеством Al_2O_3 [15, 16]. Известно, что основным сырьем для получения Al_2O_3 является бокситная руда, но технология получения из нее глинозема достаточно сложная и включает несколько этапов [17]. Данные об использовании бокситов в качестве модификаторов шихты для пористой стеклокерамики из кремнистых пород в литературе отсутствуют.

* The study was funded by a grant Russian Science Foundation No. 21-79-10422

Цель исследования: из шихты на основе кремнистых пород путем ее модифицирования бокситами получить пористую стеклокерамику с предельной температурой эксплуатации не менее 900 °С.

Задачи:

- методом рентгенофазового анализа (РФА) определить влияние бокситов на фазовый состав обожженной пористой стеклокерамики;
- установить влияние добавок в составе шихты на макроструктуру пористой стеклокерамики;
- определить влияние количества добавок в составе шихты на физико-механические и теплофизические свойства образцов пористой стеклокерамики.

Материалы и методы исследования

Образцы пористых стеклокерамических материалов были получены из кремнистых пород (цеолитсодержащий трепел и диатомит), бокситов двух месторождений, кальцинированной соды и хлористого калия. Химический и минералогический составы пород приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Т а б л и ц а 1

Химический состав пород

Порода	Химический состав, % масс.							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Трепел	67,86	7,74	7,61	1,99	1,56	1,07	0,34	0,17
Диатомит	81,47	1,51	5,34	2,05	0,97	0,89	0,25	0,20
Боксит №1	2,88	0,24	37,56	35,51	0,01	0,08	3,37	0
Боксит №2	4,44	0,19	50,21	14,12	0,02	0,22	2,66	0,09

О к о н ч а н и е т а б л . 1

Химический состав, % масс.									
SO ₃	P ₂ O ₅	Cl	ZrO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	SrO	BaO	V ₂ O ₅	ППП
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,06	0,15	0	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,01	11,32
1,77	0,03	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	5,45
0,13	0,94	0	0,07	0,02	0,05	0,18	0	0,11	8,85
0,21	0,06	0,12	0,12	0	0,04	0,01	0	0,08	27,41

Т а б л и ц а 2

Минералогический состав пород

Порода	Минералогический состав, %										
	Кварц	Кальцит	Гейландит	Мусковит	Кристаллит	Аморфная фаза	Гиббсит	Гематит	Каолинит	Гетит	Анаказ
Трепел	15,5	10,5	20,4	13,1	20,5	20,0	0	0	0	0	0
Диатомит	10,9	0	0	8,1	0	80,0	0	0	0	0	0
Боксит №1	0	0	0	0	0	0	53,5	34,0	7,0	2,2	3,3
Боксит №2	0	0	0	0	0	0	74,5	4,5	8,1	10,5	2,4

Для снижения температуры плавления и вспенивания шихты использовали соду кальцинированную (Na₂CO₃). Массовая доля основного вещества ≥ 99 %.

Для получения равномерной макроструктуры пор в стеклокерамике в качестве добавки использовали хлористый калий (KCl). Концентрация основного вещества ≥ 97 %.

Образцы пористых стеклокерамических материалов изготавливали по следующей технологии:

1. *Механохимическая активация сырья.* Кремнистые породы, бокситы, кальцинированную соду и KCl размалывали в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 в течение 35 мин при перегрузке внутри барабана мельницы 20G. Составы шихты представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Составы шихты

№ состава	Состав шихты, %					
	Трепел	Диатомит	Боксит №1	Боксит №2	Na ₂ CO ₃	KCl
C1	73,4	8,1	-	-	18,3	0,2
C2	69,4		4	-		
C3	65,3		8,1	-		
C4	61,2		12,2	-		
C5	69,1		-	4		
C6	65,3		-	8,1		
C7	61,2		-	12,2		

2. *Обжиг.* Полученную после механохимической активации шихту засыпали в металлические формы и обжигали в муфельной печи (формы предварительно обмазывали глиной). Программа обжига была принята следующая: нагрев до температуры 670 °C со скоростью 6 °C/мин, выдержка при температуре 670 °C в течение 1 часа, нагрев до температуры 850 °C со скоростью 4 °C/мин, выдержка при температуре 850 °C в течение 30 минут; остывание до комнатной температуры вместе с печью.

3. *Подготовка образцов для испытаний.* Формы с полученным материалом извлекали из печи и разбирали. Полученную пористую стеклокерамику распиливали на образцы необходимых размеров для дальнейших испытаний.

Рентгенофазовый анализ образцов осуществляли с помощью прибора Empyrean PANalytical (Нидерланды) с полупроводниковым детектором PIXcel3D. Эксперимент проводили на измельченных образцах стеклокерамики (фракция < 90 мкм). Детектор работал в режиме линейного сканирования. Съемка выполнена в CuK_α-излучении в интервале углов 2θ = 4–80°. Шаг сканирования 0,0131 °/мин, времени интеграции 150 сек. Методом Ханавальта определяли фазовый состав образцов с использованием базы данных ICDD PDF-2.

Кажущуюся плотность определяли в соответствии с ГОСТ EN 1602–2011 на высушенных образцах кубической формы с размером грани 90±5 мм. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытаний пяти образцов каждого состава.

Для определения прочности при изгибе использовали сухие образцы в форме прямоугольных призм с размерами граней 120×30×30 мм. Образец помещали горизонтально на две цилиндрические опоры с расстоянием между ними 100±1 мм. Сверху устанавливали цилиндрический стержень по всей ширине образца на равном расстоянии от опор. Диаметр опор и стержня был равен 6±0,1 мм. Нагрузку на образец передавали через стержень со скоростью 5 мм/мин. За максимальное разрушающее усилие принимали значение, при котором образец разрушился. По стандартной формуле определяли прочность при изгибе. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытаний трех образцов каждого состава.

Прочность при сжатии пористых стеклокерамических материалов определяли на сухих кубических образцах с размером грани 50±5 мм в соответствии с ГОСТ EN 826–2011. За максимальное разрушающее усилие при определении прочности при сжатии принималось значение, при котором образец разрушался или сжимался на 10 % от первоначального значения высоты. По стандартной формуле рассчитывали прочность при сжатии. За окончательный результат принимал среднеарифметическое значение результатов испытаний пяти образцов каждого состава.

Коэффициент теплопроводности образцов пористой стеклокерамики определяли зондовым методом с помощью прибора МИТ-1. Испытания выполняли на сухих образцах кубической формы с гранью 90 ± 5 мм. В центре грани образца просверливали отверстие диаметром 6 мм и глубиной от 50 до 60 мм. В отверстие погружали зонд и снимали показания с прибора. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытаний двух образцов каждого состава.

Предельную температуру эксплуатации пористых стеклокерамических материалов определяли по остаточному изменению размеров при нагреве образцов в форме прямоугольных призм с размерами граней $90 \times 40 \times 40$ мм в соответствии с ГОСТ 5402.2–2000. Образцы устанавливали вертикально в муфельную печь и испытывали по следующему режиму: нагрев до температуры на 50°C меньше заданной со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ и до заданной температуры со скоростью $2^\circ\text{C}/\text{мин}$, выдержка при заданной температуре в течение 2 часов. В ходе эксперимента контролировали изменение размеров образцов. Предельную температуру эксплуатации материала определяли по максимальной температуре испытания, при которой размеры образцов изменялись менее чем на 1 % от первоначальных значений. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытаний трех образцов каждого состава.

Результаты и их обсуждение

Рентгенофазовый анализ

На рис. 1 представлены результаты РФА образцов обожженной стеклокерамики. Для наглядности рентгенограммы представлены в интервале углов $2\theta = 10\text{--}45^\circ$.

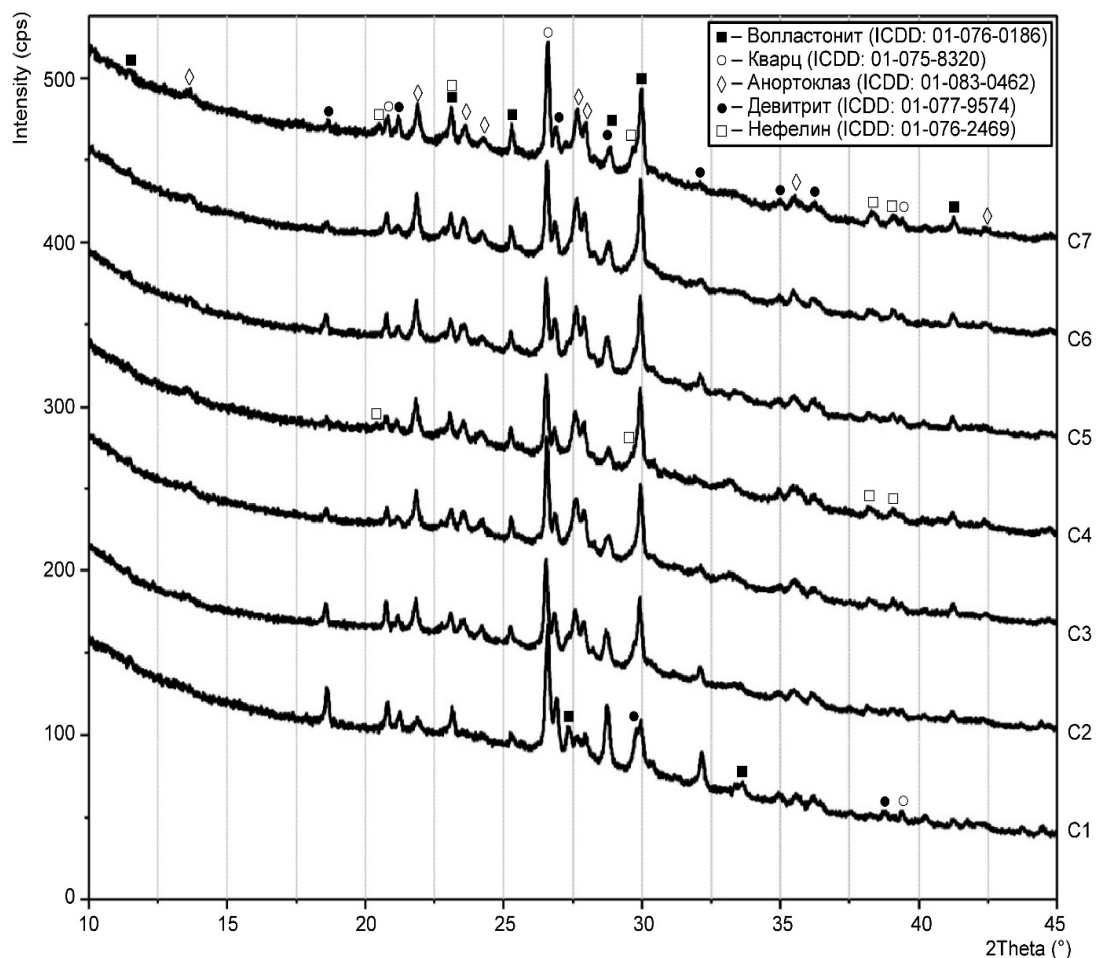


Рис. 1. Рентгенограммы образцов пористой стеклокерамики
(C1–C7 – номера составов)

По результатам РФА образцов (см. рис. 1) установлен качественный фазовый состав стеклокерамических материалов. Все образцы пористой стеклокерамики из кремнистых пород состоят из кристаллической и аморфной фаз. О наличии в образцах аморфной фазы свидетельствует немонотонное изменение фона (гало) на всех рентгенограммах в интервале углов от 17 до 37° (2θ). Изменение аморфного гало в зависимости от увеличения в составе шихты количества бокситов до 12,2 % не установлено. Основными кристаллическими фазами всех образцов являются волластонит $[\text{CaSiO}_3]$, ICDD: 01-076-0186], кварц $[\text{SiO}_2]$, ICDD: 01-075-8320], анортотлаз $[(\text{Na}_{0,85}\text{K}_{0,14})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)]$, ICDD: 01-075-1634] и девитрит $[\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}]$, ICDD: 00-023-0671].

При увеличении в составе шихты количества бокситов до 8,1 % интенсивности линий девитрита уменьшились, а волластонита и анортотлаза – увеличились (см. рис. 1). При дальнейшем увеличении в составе шихты бокситов до 12,2 % в стеклокерамике появилась дополнительно фаза нефелина $[\text{Na}_3\text{K}(\text{Si}_{0,553}\text{Al}_{0,447})_8\text{O}_{16}]$, ICDD: 01-076-2469] (количество новой фазы незначительное), а количество волластонита и анортотлаза в составе материала уменьшилось. Линии девитрита практически не заметны. Образование нефелина в стеклокерамике при увеличении в составе материала количества Al_2O_3 наблюдали и другие исследователи [18].

Макроструктура пористой стеклокерамики

Макроструктура поверхности образцов пористой стеклокерамики на основе шихты, модифицированной бокситами, представлена на рис. 2.

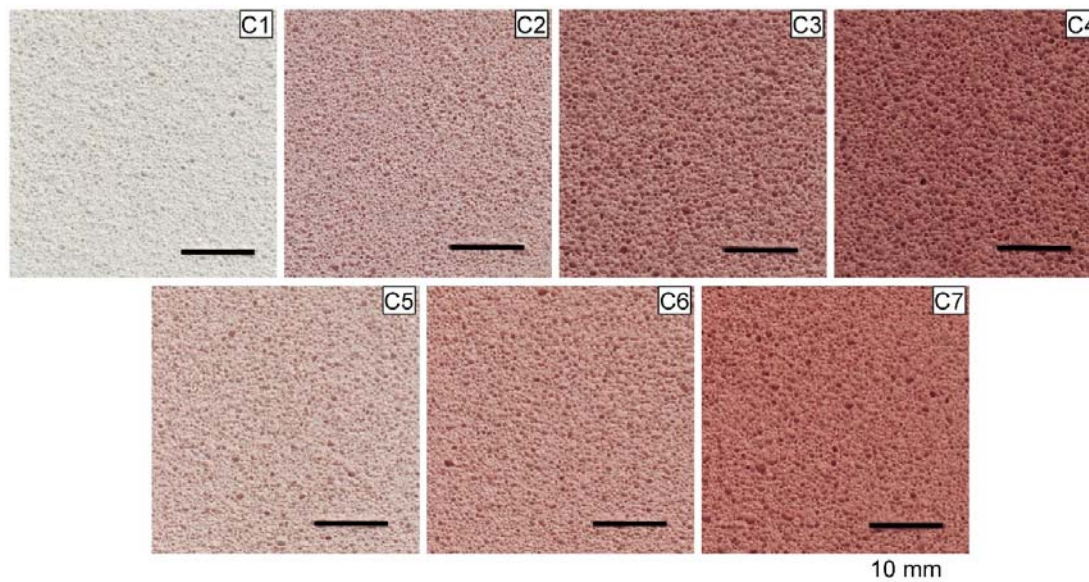


Рис. 2. Макроструктура поверхности образцов пористой стеклокерамики (C1–C7 – номера составов)

Согласно данным рис. 2 все образцы пористых стеклокерамических материалов имеют равномерную ячеистую структуру по всей площади поверхности. Максимальный размер пор образца контрольного состава (C1) не превышает 1 мм. При введении в состав шихты боксита №1 (C2–C4) и боксита №2 (C5–C7) в количестве до 12,2 % размер пор увеличивается до $\approx 1,5$ мм. Также установлено значительное изменение цвета поверхности образцов с увеличением в составе шихты бокситов. Эффект может быть связан с наличием в составе бокситов Fe_2O_3 [17]. Согласно данным табл. 1 содержание Fe_2O_3 в боксите №1 – 35,51 %, в боксите №2 – 14,12 %, что и приводит к изменению цвета поверхности образцов.

Кажущаяся плотность и теплопроводность образцов

Результаты влияния вида и количества добавок в составе шихты на кажущуюся плотность и теплопроводность образцов пористой стеклокерамики представлены на рис. 3.

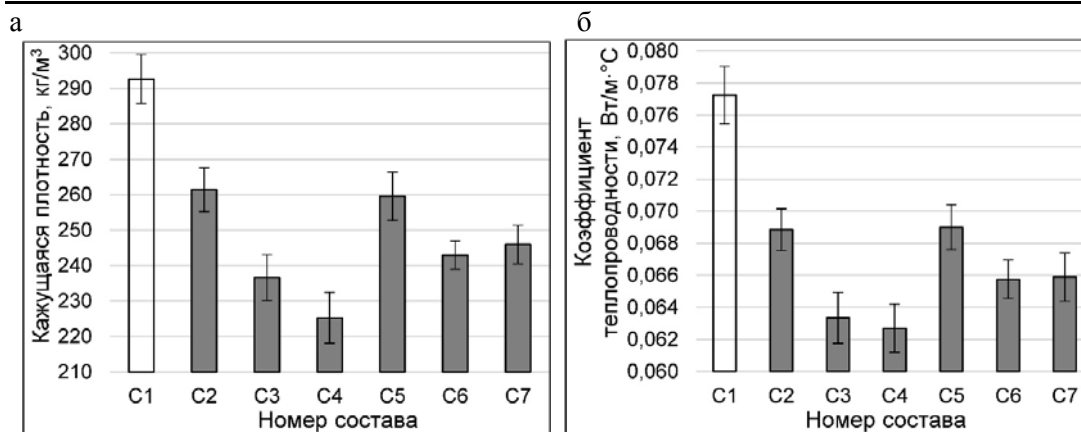


Рис. 3. Кажущаяся плотность (а) и теплопроводность (б) образцов (C1–C7 – номера составов)

Согласно данным рис. 3, а установлена следующая зависимость кажущейся плотности образцов пористых стеклокерамических материалов от вида и количества боксита в составе шихты. При введении в состав шихты боксита №1 в количестве до 12,2 % кажущаяся плотность образцов уменьшилась практически линейно с $\approx 293 \text{ кг/м}^3$ до $\approx 225 \text{ кг/м}^3$ (C1–C4). Кажущаяся плотность образцов также уменьшается (до $\approx 243 \text{ кг/м}^3$) при введении в состав шихты боксита №2 до 8,1 % (C5, C6). Дальнейшее увеличение количества добавки до 12,2 % приводит к увеличению кажущейся плотности до $\approx 246 \text{ кг/м}^3$ (C7). Вероятнее всего, негативное влияние боксита №2 в количестве 12,2 % на кажущуюся плотность образцов связано с высоким содержанием в ее составе Al_2O_3 (50,21 %). Увеличение количества Al_2O_3 в шихте уменьшает вязкость расплава в температурном интервале вспенивания. Подобные результаты описаны в работах [15, 16].

По результатам экспериментальных данных, представленных на рис. 3, б, установлено, что кажущаяся плотность прямо пропорционально влияет на теплопроводность образцов пористой стеклокерамики. Наименьшая теплопроводность, равная $0,062 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$, – у образцов пористой стеклокерамики состава C4 при кажущейся плотности $\approx 225 \text{ кг/м}^3$. Наибольшее значение теплопроводности ($0,077 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$) – у образцов контрольного состава C1 (кажущаяся плотность $\approx 293 \text{ кг/м}^3$). Влияние фазового состава образцов пористых стеклокерамических материалов на их теплопроводность не выявлено. Полученные результаты коррелируют с данными других исследователей [4].

Прочность образцов

Влияние бокситов в составе шихты на прочностные характеристики образцов пористых стеклокерамических материалов представлено на рис. 4.

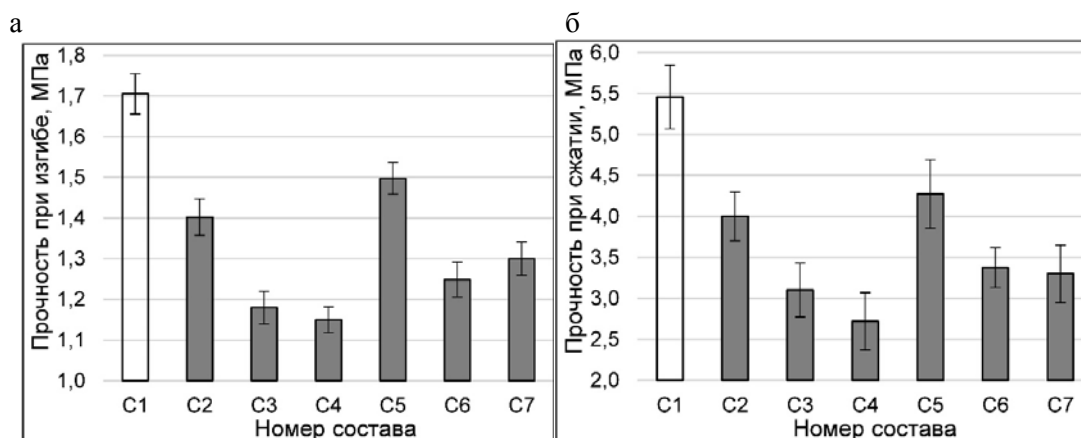


Рис. 4. Прочность при изгибе (а) и сжатии (б) образцов (C1–C7 – номера составов)

Согласно проведенным исследованиям полученные пористые стеклокерамические материалы имеют прочность при изгибе от 1,15 до 1,7 МПа. Прочность при сжатии находится в пределах от 2,7 до 5,5 МПа. Прочностные показатели образцов линейно связаны с их кажущейся плотностью. Наибольшие значения показателей у образцов состава С1 (без бокситов) – 1,7 МПа при изгибе и 5,5 МПа при сжатии при значении кажущейся плотности $\approx 293 \text{ кг/м}^3$. Образцы состава С4 имеют наименьшие прочностные показатели при изгибе (1,15 МПа) и при сжатии (2,7 МПа) при кажущейся плотности $\approx 225 \text{ кг/м}^3$.

Прочностные показатели также зависят от вида боксита в составе шихты. Так, у образцов С2 из шихты с 4 % боксита №1 средняя прочность при изгибе 1,4 МПа, а у образцов С5 из шихты с таким же количеством боксита №2 данный показатель на $\approx 6,5 \%$ больше (1,5 МПа) при практически равных значениях кажущейся плотности ($\approx 260 \text{ кг/м}^3$). Данная взаимосвязь также сохраняется для показателей прочности при сжатии. Эффект можно объяснить различным содержанием в составе образцов количества волластонита. Согласно данным РФА (см. рис. 1) у образца стеклокерамики из шихты с бокситом №2 (С5) интенсивность пиков волластонита больше, чем у образца из шихты с бокситом №1 (С2). Полученные результаты согласуются с результатами других исследователей. Известно, что прочностные показатели стеклокерамических материалов увеличиваются с увеличением в их составе количества волластонита [19]. Полученные пористые стеклокерамические материалы при равной кажущейся плотности превосходят по прочностным показателям пеностекло и стеклокерамику из отходов промышленного производства [1, 2, 10–12].

Предельная температура эксплуатации

Как отмечено выше, основная цель эксперимента – из шихты на основе кремнистых пород путем ее модифицирования бокситами получить пористую стеклокерамику с предельной температурой эксплуатации не менее 900°C . Влияние вида и количества боксита в составе шихты на предельную температуру эксплуатации полученных стеклокерамических материалов представлено на рис. 5.

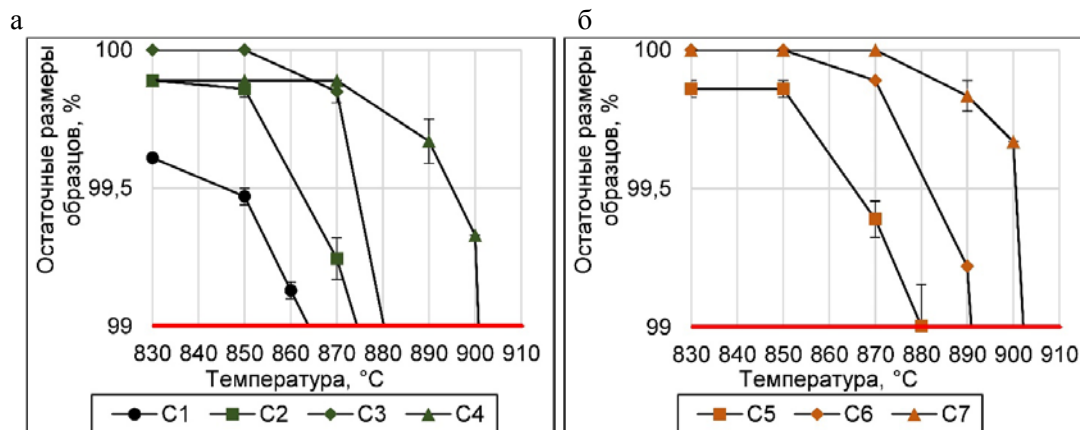


Рис. 5. Остаточный размер образцов после выдерживания в течение 2 часов при заданной температуре (образцы из шихты: а – без добавки и с бокситом №1, б – с бокситом №2; С1–С7 – номера составов)

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что с увеличением в составе шихты бокситов до 12,2 % увеличивается предельная температура эксплуатации образцов (С4, С7). Пористые стеклокерамические материалы составов С4 и С7 можно эксплуатировать при температуре 900°C (остаточные размеры образцов после выдерживания в течение 2 часов при данной температуре больше 99 % от исходных значений), тогда как для образцов контрольного состава предельная температура эксплуатации не превышает 860°C . Согласно данным табл. 1 в боксите №1 и №2 высокое содержание Al_2O_3 (37,56 % и 50,21 % соответственно). О положительном влиянии Al_2O_3 в составе керамических материалов на их стойкость к

длительному воздействию высоких температур известно из научной литературы [15, 16]. Заметим, что согласно данным рис. 1 в составе образцов С4 и С7 практически отсутствует девитрит. Данное соединение имеет низкую температуру плавления [20], поэтому влияние девитрита на предельную температуру эксплуатации является негативным.

Разработанные пористые стеклокерамические материалы по показателю предельной температуры эксплуатации значительно превосходят пеностекло и пористую стеклокерамику из кремнистых пород на основе шихты, полученной методом щелочной активации [10–12], и могут быть рекомендованы в качестве теплоизоляции плавильных печей, котельного оборудования и т.п.

Выводы

Из шихты на основе кремнистых пород получена пористая стеклокерамика. Для увеличения предельной температуры эксплуатации образцов в шихту добавляются бокситы. Совместную механохимическую активацию компонентов (кремнистые породы, Na_2CO_3 , бокситы и KCl) проводили в планетарной шаровой мельнице. Полученную шихту обжигали при температуре 850 °С. Установлено влияние количества боксита в составе шихты на свойства образцов пористой стеклокерамики.

1. Разработанные стеклокерамические материалы имеют ячеистую (мелкопористую) структуру. Увеличение в составе шихты содержания бокситов до 12,2 % оказало существенное влияние на макроструктуру стеклокерамики. Размер пор в образцах увеличился с ≈ 1 мм до $\approx 1,5$ мм.

2. Основными кристаллическими фазами пористой стеклокерамики являются анортотлаз, кварц, волластонит и девитрит. При увеличении в составе шихты количества бокситов до 12,2 % в образцах дополнительно образуется нефелин.

3. Разработанная пористая стеклокерамика имеет кажущуюся плотность 225–261 кг/м³, прочность при изгибе и сжатии до 1,5 МПа и 4,3 МПа соответственно, коэффициент теплопроводности 0,062–0,069 Вт/м·°С, предельную температуру эксплуатации до 900 °С.

4. По многим показателям полученные материалы превосходят пеностекло и другие аналоги. Их можно использовать в качестве теплоизоляции плавильных печей, котельного оборудования и т.д.

Список литературы

1. Fernandes, H.R. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents / H.R. Fernandes, D.U. Tulyaganov, J.M.F. Ferreira // *Ceramics International*. – 2009. – Vol. 35, No. 1. – P. 229–235. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.
2. Zhu, M. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass / M. Zhu, R. Ji, Z. Li, H. Wang, L. Liu, Z. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 112. – P. 398–405. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183.
3. Guo, H. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite / H. Guo, F. Ye, W. Li, X. Song, G. Xie // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41, No. 10. – P. 14645–14651. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.186.
4. König, J. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density / J. König, A. Lopez-Gil, P. Cimavilla-Roman, M.A. Rodriguez-Perez, R.R. Petersen; M.B. Østergaard, N. Iversen, Y. Yue, M. Spreitzer // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 247. – 118574. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574.
5. Hisham, N.A.N. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures / N.A.N. Hisham, M.H.M. Zaid, S.H.A. Aziz, F.D. Muhammad // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 3. – 570. – DOI: 10.3390/ma14030570.

6. Kyaw Oo D'Amore, G. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder / G. Kyaw Oo D'Amore, M. Caniato, A. Travan, G. Turco, L. Marsich, A. Ferluga, C. Schmid // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 165. – P. 1306–1315. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.214.
7. Cao, J. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass / J. Cao, J. Lu, L. Jiang, Z. Wang // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, No. 8. – P. 10079–10084. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.03.113.
8. Romero, A.R. Glass-ceramic foams from 'weak alkali activation' and gel-casting of waste glass/fly ash mixtures / A.R. Romero, N. Toniolo, A.R. Boccaccini, E. Bernardo // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, No. 4. – 588. – DOI: 10.3390/ma12040588.
9. Zeng, L. Preparation of porous glass-ceramics from coal fly ash and asbestos tailings by high-temperature pore-forming / L. Zeng, H. Sun, T. Peng, W. Zheng // *Waste Management*. – 2020. – Vol. 106, No. 4. – P. 184–192. – DOI: 10.1016/j.wasman.2020.03.008.
10. Ivanov, K.S. Optimization of the structure and properties of foam-glass ceramics / K.S. Ivanov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2019. – No. 5(89). – P. 52–60. – DOI: 10.18720/MCE.89.5.
11. Kazantseva, L.K. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks / L.K. Kazantseva, S.V. Rashchenko // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, No. 16. – P. 19250–19256. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.09.091.
12. Yatsenko, E.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.V. Klimova, L.A. Yatsenko // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2020. – Vol. 142, No. 1. – P. 119–127. – DOI: 10.1007/s10973-020-10015-3.
13. Erofeev, V. The formation mechanism of the porous structure of glass ceramics from siliceous rock / V. Erofeev, A. Rodin, V. Bochkin, A. Ermakov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2020. – 100(8). – Article No. 10006. – DOI: 10.18720/MCE.100.6.
14. Erofeev, V.T. Properties of porous glass ceramics based on siliceous rocks / V.T. Erofeev, A.I. Rodin, V.S. Bochkin, A.A. Ermakov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2021. – 102(2). – Article No. 10202. – DOI: 10.34910/MCE.102.2.
15. Costa, F.P.D. Microstructure and physico-mechanical properties of Al_2O_3 -doped sustainable glass-ceramic foams / F.P.D. Costa, C.R.D.S. Moraes, H.C. Pinto, A.M. Rodrigues // *Materials Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 256. – 123612. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123612.
16. Keyvani, N. Effect of Al_2O_3 content on crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties of SiO_2 – Al_2O_3 – CaO – MgO glass-ceramics / N. Keyvani, V.K. Marghussian, H.R. Rezaie, M. Kord // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. – 2011. – Vol. 8, No. 1. – P. 203–213. – DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x.
17. Логинова, И.В. Производство глинозема / И.В. Логинова, А.В. Кырчиков. – Екатеринбург, 2020. – 224 с.
18. McClane, D.L. Nepheline crystallization and the residual glass composition: Understanding waste glass durability / D.L. McClane, J.W. Amoroso, K.M. Fox, M.C. Hsieh, M.R. Kesterson, A.A. Kruger // *International Journal of Applied Glass Science*. – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 649–659. – DOI: 10.1111/ijag.15418.
19. Almasri, K.A. Effect of sintering temperature on physical, structural and optical properties of wollastonite based glass-ceramic derived from waste soda lime silica glasses / K.A. Almasri, H.A.A. Sidek, K.A. Matori, M.H.M. Zaid // *Results in Physics*. – 2017. – Vol. 7. – P. 2242–2247. – DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.022.
20. Yang, S. Recycling of waste glass in cement mortars: Mechanical properties under high temperature loading / S. Yang, J.-X. Lu, C.S. Poon // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 174. – 105831. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105831.

References

1. Fernandes, H.R. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents / H.R. Fernandes, D.U. Tulyaganov, J.M.F. Ferreira. // *Ceramics International*. – 2009. – Vol. 35, No. 1. – P. 229–235. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.
2. Zhu, M. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass / M. Zhu, R. Ji, Z. Li, H. Wang, L. Liu, Z. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 112. – P. 398–405. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183.
3. Guo, H. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite / H. Guo, F. Ye, W. Li, X. Song, G. Xie // *Ceramics International*. – 2009. – Vol. 41, No. 10. – P. 14645–14651. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.186.
4. König, J. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density / J. König, A. Lopez-Gil, P. Cimavilla-Roman, M.A. Rodriguez-Perez, R.R. Petersen; M.B. Østergaard, N. Iversen, Y. Yue, M. Spreitzer // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 247. – P. 118574. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574.
5. Hisham, N.A.N. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures / N.A.N. Hisham, M.H.M. Zaid, S.H.A. Aziz, F.D. Muhammad // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 3. – P. 570. – DOI: 10.3390/ma14030570.
6. Kyaw Oo D'Amore, G. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder / G. Kyaw Oo D'Amore, M. Caniato, A. Travan, G. Turco, L. Marsich, A. Ferluga, C. Schmid // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 165. – P. 1306–1315. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.214.
7. Cao, J. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass / J. Cao, J. Lu, L. Jiang, Z. Wang // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, No. 8. – P. 10079–10084. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.03.113.
8. Romero, A.R. Glass-ceramic foams from 'weak alkali activation' and gel-casting of waste glass/fly ash mixtures / A.R. Romero, N. Toniolo, A.R. Boccaccini, E. Bernardo // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, No. 4. – P. 588. – DOI: 10.3390/ma12040588.
9. Zeng, L. Preparation of porous glass-ceramics from coal fly ash and asbestos tailings by high-temperature pore-forming / L. Zeng, H. Sun, T. Peng, W. Zheng // *Waste Management*. – 2020. – Vol. 106, No. 4. – P. 184–192. – DOI: 10.1016/j.wasman.2020.03.008.
10. Ivanov, K.S. Optimization of the structure and properties of foam-glass ceramics / K.S. Ivanov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2019. – No. 5(89). – P. 52–60. – DOI: 10.18720/MCE.89.5.
11. Kazantseva, L.K. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks / L.K. Kazantseva, S.V. Rashchenko // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, No. 16. – P. 19250–19256. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.09.091.
12. Yatsenko, E.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.V. Klimova, L.A. Yatsenko // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2020. – Vol. 142, No. 1. – P. 119–127. – DOI: 10.1007/s10973-020-10015-3.
13. Erofeev, V. The formation mechanism of the porous structure of glass ceramics from siliceous rock / V. Erofeev, A. Rodin, V. Bochkin, A. Ermakov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2020. – No. 100(8). – Article No. 10006. – DOI: 10.18720/MCE.100.6.
14. Erofeev, V.T. Properties of porous glass ceramics based on siliceous rocks / V.T. Erofeev, A.I. Rodin, V.S. Bochkin, A.A. Ermakov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2021. – No. 102(2). – Article No. 10202. – DOI: 10.34910/MCE.102.2.
15. Costa, F.P.D. Microstructure and physico-mechanical properties of Al₂O₃-doped sustainable glass-ceramic foams / F.P.D. Costa, C.R.D.S. Morais, H.C. Pinto, A.M. Ro-

drigues // Materials Chemistry and Physics. – 2020. – Vol. 256. – 123612. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123612.

16. Keyvani, N. Effect of Al_2O_3 content on crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties of $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO}$ glass-ceramics / N. Keyvani, V.K. Marghussian, H.R. Rezaie, M. Kord // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2011. – Vol. 8, No. 1. – P. 203–213. – DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x.

17. Loginova, I.V. Alumina production / I.V. Loginova, A.V. Kyrchikov. – Ekaterinburg, 2020. – 224 p.

18. McClane, D.L. Nepheline crystallization and the residual glass composition: Understanding waste glass durability / D.L. McClane, J.W. Amoroso, K.M. Fox, M.C. Hsieh, M.R. Kesterson, A.A. Kruger // International Journal of Applied Glass Science. – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 649–659. – DOI: 10.1111/ijag.15418.

19. Almasri, K.A. Effect of sintering temperature on physical, structural and optical properties of wollastonite based glass-ceramic derived from waste soda lime silica glasses / K.A. Almasri, H.A.A. Sidek, K.A. Matori, M.H.M. Zaid // Results in Physics. – 2017. – Vol. 7. – P. 2242–2247. – DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.022.

20. Yang, S. Recycling of waste glass in cement mortars: Mechanical properties under high temperature loading / S. Yang, J.-X. Lu, C.S. Poon // Resources, Conservation and Recycling. – 2021. – Vol. 174. – 105831. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105831.

УДК 691.327:539.4

DOI 10.54734/20722958_2022_2_17

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, профессор
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
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, Professor of the
department «Technology of Building Materials
and Woodworking»
Maksimova Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department « Quality Management and
Construction Technologies »
E-mail: maksimovain@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ ВО ВРЕМЕНИ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Дана сравнительная оценка силовой характеристики трещиностойкости (условного критического коэффициента интенсивности напряжений) образцов бетона, изготовленных на двух видах портландцемента одинаковой по прочности марки – добавочном и бездобавочном. Определено заметное влияние вида портландцемента на численные средние значения коэффициента $\bar{K}_C^{*25}$ в принятые контрольные сроки испытания сравниваемых образцов бетона от одних суток до 18 лет. Установлено влияние вида портландцемента (добавочный (пуццолановый) или бездобавочный) на характер изменения важнейшего параметра конструкционной прочности – трещиностойкости – модифицированных бетонов на ранних и поздних стадиях структурообразования и твердения цементных композитов.

Ключевые слова: модифицированные бетоны, оптимизация, структура, стадии структурообразования, прочность, трещиностойкость

PREDICTION AND OPTIMIZATION OF CRACK RESISTANCE OF MODIFIED CONCRETE

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

A comparative assessment of strength characteristics of crack resistance (conditional critical stress intensity factor) is given, the compared series of samples were made on two types of Portland cement of the same strength grade with and without additives. A noticeable effect of the type of Portland cement on the numerical average values of the coefficient $\bar{K}_C^{*25}$ in the accepted control periods for testing the compared concrete samples from one day to 18 years is determined. The influence of the type of Portland cement (additional (pozzolanic) or without additives) on the nature of the change of in the most important parameter of structural strength – crack resistance – of modified concretes at the early and late stages of structure formation and hardening of cement composites has been established.

Keywords: modified concrete, optimization, structure, stages of structure formation, strength, crack resistance

Как известно, создание строительных конструкционных материалов на основе цементных дисперсных систем с заданными свойствами является основной задачей

современного строительного материаловедения, которая может быть решена только при разработке технологических процессов в комплексе с физико-химическими и физико-механическими воздействиями, лежащими в основе целенаправленного регулирования и управления гетерогенностью микро- и макроструктур цементных дисперсных систем, с учетом основополагающих материаловедческих принципов разработки материалов (по Мчедлову-Петросяну О.П.): когерентности, или соответствия, оптимальной дисперсности, гомогенности и предельного уплотнения, – позволяющих управлять структурообразованием цементных композитов.

В работах [1–6] отмечено, 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 деформации во времени, приводящим к определенным нарушениям внутренних связей на микро- и макроуровнях.

Важнейшей механической характеристикой цементных дисперсных систем, предопределяющей их механическое поведение во времени, является конструкционная прочность как комплексная механическая характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности.

В свою очередь, важнейшим параметром конструкционной прочности материала является его трещиностойкость (вязкость разрушения). Трещиностойкость представляет собой инженерный термин, под которым согласно ГОСТ 29167 [7] понимают способность бетона сопротивляться началу движения и развития трещин при механических и других воздействиях. Наука (структурная механика разрушения материалов) в качестве меры этого свойства предлагает две нормативные величины [7]: силовую – в терминах коэффициентов интенсивности напряжений K , МПа·м^{0,5}, и энергетическую – в терминах удельных энергозатрат G , эрг/см².

Раскрытие функциональной связи между действующими напряжениями и деформациями $\sigma = f(\varepsilon)$ (по И.Н. Ахвердову и А.А. Гвоздеву) представляет собой одно из важнейших направлений механики деформируемого твердого тела и является одним из основных этапов в изучении механического поведения цементных систем, так как в диаграмме сжатия и растяжения отражается связь деформативных и прочностных свойств любых твердых тел конструкционного назначения, которые в принципе можно получить только экспериментальным путем.

Исходя из целей и задач комплексной методологии оценки структурно-механических параметров конструкционной прочности цементных композитов, изложенной нами в работах [8, 9], в данной работе представлены результаты экспериментальной сравнительной оценки силовой характеристики трещиностойкости – условного критического коэффициента интенсивности напряжений K_C^* , полученные на тех же опытных образцах, на которых определяли прочностные параметры R_{bf} и $R_{сж}$ в работе [9].

Исходные данные для сравнения влияния различных вариантов состава, особенностей технологических процессов изготовления, физико-химических факторов влияния и фактора времени в диапазоне от 1 суток после ТВО до 5670 суток на процессы структурообразования и твердения цементных композитов представлены в табл. 1 и 2 работы [9] на примере 25 составов сравниваемых серий, изготовленных на двух видах портландцемента марки 500. Один из них М500–Д20 (ОАО «Вольскцемент»), другой – М500–Д0 (ЗАО «Осколцемент»).

Согласно ГОСТ 29167-91 характеристику трещиностойкости K_C^* – условного критического коэффициента интенсивности напряжений – по результатам неравновесных испытаний опытных образцов типа I определяли по зависимости (9) данного ГОСТа:

$$K_C^* = \frac{3F_C^* \cdot L_0}{2b^{1/2} \cdot t} \sqrt{a_0/b} \cdot (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4), \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5},$$

где F_C^* – нагрузка начала движения трещины, Н; L_0 – расстояние между опорами, м; a_0 – глубина надреза, м; b – высота образца, м; t – ширина образца, м; $\lambda = a_0/b$ – относительная длина начального надреза.

Результаты оценки условного критического коэффициента интенсивности напряжений K_C^* сравниваемых 25 серий опытных образцов на двух видах портланд-цемента в контрольные сроки испытаний представлены в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

Сводная ведомость изменения индивидуальных K_C^* и средних $\bar{K}_C^*$ значений условного критического коэффициента интенсивности напряжений образцов бетона на вольском портландцементе М500–Д20 в диапазоне времени от 1 суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № п/п	Условный критический коэффициент интенсивности напряжений, K_C^* , МПа·м ^{0,5} / %			
	Возраст бетона t , сут.			
	1	28	90	6570 (18 лет)
1в	0,628	0,703/1,12	0,705/1,003	1,151/1,63
2в	0,422	0,417/0,99	0,454/1,09	0,631/1,39
3в	0,606	0,687/1,13	0,656/0,95	1,111/1,69
4в	0,331	0,367/1,11	0,404/1,1	0,495/1,22
5в	0,656	0,760/1,16	0,808/1,06	1,111/1,38
6в	0,355	0,453/1,27	0,477/1,05	0,681/1,43
7в	0,589	0,760/1,29	0,764/1,005	1,111/1,45
8в	0,276	0,351/1,27	0,404/1,15	0,454/1,12
9в	0,579	0,864/1,49	0,760/0,88	1,06/1,39
10в	0,299	0,496/1,66	0,504/1,016	0,581/1,15
11в	0,583	0,849/1,45	0,707/0,83	1,217/1,72
12в	0,254	0,433/1,7	0,353/0,815	1,01/2,83
13в	0,583	0,804/1,38	0,683/0,85	1,01/1,48
14в	0,249	0,470/1,9	0,581/1,24	0,758/1,3
15в	0,556	0,807/1,45	0,758/0,94	1,07/1,41
16в	0,204	0,388/1,4	0,379/0,98	0,666/1,75
$\bar{K}_C^{*8}$, Ц=481 кг	0,598	0,779/1,30	0,730/0,94	1,105/1,51
$\bar{K}_C^{*8}$, Ц=289 кг	0,299	0,422/1,41	0,444/1,05	0,658/1,48
17в	0,699	0,839/1,2	0,909/1,08	1,06/1,17
18в	0,178	0,414/2,33	0,454/1,09	0,491/1,08
19в	0,444	0,680/1,53	0,546/0,8	1,161/2,12
20в	0,403	0,546/1,35	0,605/1,11	0,914/1,51
21в	0,385	0,650/1,69	0,707/1,09	1,06/1,5
22в	0,395	0,679/1,72	0,681/1,003	0,970/1,42
23в	0,373	0,507/1,36	0,591/1,16	0,909/1,54
24в	0,434	0,725/1,67	0,707/0,98	1,011/1,43
25в	0,385	0,679/1,76	0,707/1,04	1,021/1,44
$\bar{K}_C^{*7}$, Ц=385 кг	0,394	0,638/1,62	0,679/1,06	0,994/1,46
$\bar{K}_C^{*25}$, МПа·м ^{0,5}	0,430	0,613/1,42	0,618/1,01	0,919/1,49

П р и м е ч а н и е: в возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно 90-суточного возраста.

Сводная ведомость изменения индивидуальных K_C^* и средних $\bar{K}_C^*$ значений
условного критического коэффициента интенсивности напряжений образцов бетона
на старооскольском портландцементе М500–Д0 в диапазоне времени от 1 суток
после ТВО до 18 лет

Серия образцов № п/п	Условный критический коэффициент интенсивности напряжений, K_C^* , МПа·м ^{0,5} / %			
	Возраст бетона t , сут.			
	1	28	90	6570 (18 лет)
1с	0,661	0,799/1,21	0,749/0,937	1,065/1,42
2с	0,411	0,507/1,23	0,564/1,11	0,504/0,89
3с	0,550	0,673/1,22	0,718/1,07	0,964/1,34
4с	0,283	0,307/1,08	0,410/1,34	0,502/1,22
5с	0,610	0,829/1,36	0,820/0,99	1,161/1,42
6с	0,318	0,498/1,57	0,461/0,93	0,591/1,28
7с	0,491	0,671/1,37	0,661/0,98	1,034/1,56
8с	0,155	0,306/1,97	0,410/1,34	0,530/1,29
9с	0,526	0,760/1,44	0,860/1,13	0,994/1,16
10с	0,229	0,363/1,58	0,410/1,13	0,557/1,36
11с	0,479	0,733/1,53	0,733/1,0	1,01/1,38
12с	0,129	0,369/2,86	0,334/0,90	0,404/1,21
13с	0,483	0,736/1,52	0,703/0,95	1,01/1,44
14с	0,223	0,392/1,76	0,525/1,34	0,605/1,15
15с	0,396	0,622/1,57	0,779/1,25	1,06/1,36
16с	0,157	0,334/2,12	0,308/0,92	0,353/1,15
$\bar{K}_C^{*8}$, Ц=481 кг	0,525	0,728/1,39	0,753/1,03	1,032/1,37
$\bar{K}_C^{*8}$, Ц=289 кг	0,238	0,384/1,61	0,428/1,11	0,506/1,18
17с	0,538	0,866/1,61	0,871/1,006	0,631/0,72
18с	0,175	0,299/1,7	0,364/1,22	0,555/1,52
19с	0,385	0,599/1,55	0,385/0,64	1,01/2,62
20с	0,288	0,518/1,8	0,636/1,23	0,984/1,55
21с	0,323	0,498/1,54	0,490/0,98	0,793/1,62
22с	0,308	0,582/1,89	0,649/1,11	1,06/1,63
23с	0,385	0,548/1,42	0,553/1,009	0,909/1,64
24с	0,423	0,710/1,67	0,612/0,86	1,01/1,65
25с	0,338	0,575/1,75	0,487/0,85	1,01/2,07
$\bar{K}_C^{*7}$, Ц=385 кг	0,355	0,577/1,63	0,558/0,97	0,956/1,71
$\bar{K}_C^{*25}$, МПа·м ^{0,5}	0,373	0,563/1,509	0,580/1,03	0,831/1,43

П р и м е ч а н и е : в возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения коэффициента интенсивности напряжения относительно 90-суточного возраста.

Сравнительный анализ численных значений коэффициента напряжений K_C^* в табл. 1 и 2 в рассматриваемом диапазоне времени гидратационного твердения с учетом влияния отмеченных выше факторов показывает заметное влияние вида портландцемента

на значения K_C^* как на ранних, так и на поздних стадиях структурообразования и твердения опытных образцов сравниваемых серий.

Из сравнительного анализа средних значений условного критического коэффициента интенсивности напряжений $\bar{K}_C^{*25}$ образцов бетона из 25 серий на основе вольского портландцемента М500–Д20 в сравнении с аналогичными сериями образцов бетона на основе старооскольского портландцемента М500–Д0 в диапазоне времени возраста опытных образцов от 1 суток после тепловлажностной обработки до 18 лет можно констатировать заметное влияние вида портландцемента на численные средние значения коэффициента $\bar{K}_C^{*25}$ в принятые контрольные сроки испытания сравниваемых образцов бетона (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Интегральная и дифференциальная кинетика изменения условного критического коэффициента интенсивности напряжений $\bar{K}_C^*$ при трех расходах цемента и сравнительный анализ численных значений $\bar{K}_C^*$ на портландцементных М500–Д20 и М500–Д0 в контрольные сроки испытания образцов

Интегральные и дифференциальные значения $\bar{K}_C^*$, МПа·м ^{0,5}	Возраст бетона, сут.			
	1	28	90	6570
Кинетика изменения параметра $\bar{K}_C^*$ на портландцементе М500–Д20, МПа·м ^{0,5} / %				
$\bar{K}_C^{*25}$	0,430	0,613/42,0	0,618/1,0	0,919/48,7
$\bar{K}_C^{*8}$ Ц 481 кг/м ³	0,598	0,779/30,3	0,730/-6,3	1,105/51,4
$\bar{K}_C^{*8}$ Ц 289 кг/м ³	0,299	0,422/41,1	0,444/5,4	0,658/47,9
$\bar{K}_C^{*7}$ Ц 385кг/м ³	0,394	0,638/61,9	0,679/6,4	0,994/46,4
Кинетика изменения параметра $\bar{K}_C^*$ на портландцементе М500–Д0, МПа·м ^{0,5} / %				
$\bar{K}_C^{*25}$	0,373	0,563/50,9	0,580/3,0	0,83/43,1
$\bar{K}_C^{*8}$ Ц 481 кг/м ³	0,525	0,728/38,7	0,753/3,4	1,032/37,0
$\bar{K}_C^{*8}$ Ц 289 кг/м ³	0,238	0,384/61,3	0,428/11,5	0,506/18,2
$\bar{K}_C^{*7}$ Ц 385кг/м ³	0,355	0,577/62,5	0,558/-3,3	0,956/71,3
Интегральный и дифференциальный сравнительный анализ параметров $\bar{K}_C^*$ образцов на портландцементе М500–Д20 относительно образцов на портландцементе М500–Д0, %				
$\bar{K}_C^{*25}$ Д20/ $\bar{K}_C^{*25}$ Д0	>15,3	>8,9	>6,6	>10,7
$\bar{K}_C^{*8}$ Д20/ $\bar{K}_C^{*8}$ Д0	>13,9	>7,0	<-3,1	>7,1
$\bar{K}_C^{*8}$ Д20/ $\bar{K}_C^{*8}$ Д0	>25,6	>9,9	>4,0	>30,0
$\bar{K}_C^{*7}$ Д20/ $\bar{K}_C^{*7}$ Д0	>11,0	>10,6	>21,7	>4,0

П р и м е ч а н и е : в возрасте 28 суток после черты – процент изменения параметра $\bar{K}_C^*$ относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – процент изменения параметра $\bar{K}_C^*$ относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – процент изменения параметра $\bar{K}_C^*$ относительно 90-суточного возраста.

При этом следует отметить, что образцы бетона, изготовленные на добавочном портландцементе М500–Д20, во все контрольные сроки испытания образцов типа I по методике ГОСТ 29167-91 показали более высокие численные значения среднего условного критического коэффициента интенсивности напряжения $\bar{K}_C^*$ относительно сравниваемых серий образцов бетона, изготовленных на бездобавочном цементе М500–Д0.

Так, в возрасте 1 суток после ТВО это превышение составляло 15,3 %, в возрасте 28 суток – 8,9 %, в возрасте 90 суток – 6,6 %, а в возрасте 18 лет – 10,7 %, что находится в полном соответствии с характером изменения средних значений прочностных параметров $\bar{R}_{btf}$ и $\bar{R}_{сж}$ сравниваемых серий образцов, как это показано в работе [9].

В табл. 3 представлены результаты экспериментальной оценки кинетики изменения как средних интегральных значений условного критического коэффициента интенсивности напряжений $\bar{K}_C^*$, так и средних дифференциальных значений условного критического коэффициента интенсивности напряжений $\bar{K}_C^*$ при трех расходах сравниваемых портландцементов: 481, 385 и 289 кг/м³.

Из анализа кинетики изменения средних значений параметра условного критического коэффициента интенсивности напряжений $\bar{K}_C^*$ на ранних (90 суток) и поздних (18 лет) стадиях структурообразования и твердения, а также сравнительного анализа величин $\bar{K}_C^*$ следует отметить, что кинетика изменения дифференциального параметра $\bar{K}_C^*$ на ранних стадиях показала рост значений в возрасте 28 суток и спад значений в возрасте 90 суток. При этом образцы бетона на портландцементе М500–Д20 при расходе цемента 481 кг/м³ показали значения $\bar{K}_C^*$ на 6,3 % ниже, чем $\bar{K}_C^*$ в возрасте 28 суток. В то же время образцы бетона на портландцементе М500–Д0 показали снижение величины в возрасте 90 суток относительно 28-суточного возраста на 3,3 % при расходе цемента 385 кг/м³. Что касается поздних стадий структурообразования и твердения, то есть в возрасте бетона 6570 суток относительно 90-суточного возраста, следует отметить как весьма положительный факт рост значений $\bar{K}_C^*$ в наблюдаемом процессе длительного срока структурообразования и твердения. При этом превышение интегрального значения $\bar{K}_C^{*25}$ на сравниваемых образцах бетона составляло 10,7 %, а дифференциального $\bar{K}_C^*$ при расходе цемента 481 кг/м³ – 7,1 %; при расходе 289 кг/м³ – 30 %, и при расходе 385 кг/м³ это превышение составляло 4 %.

Таким образом, экспериментально показано влияние вида портландцемента (добавочный (пуццолановый) или бездобавочный) на характер изменения важнейшего параметра конструкционной прочности – трещиностойкости – модифицированных бетонов на ранних и поздних стадиях структурообразования и твердения цементных композитов.

Список литературы

1. Макридин, Н.И. О влиянии ускоряюще-пластифицирующей добавки на характер изменения механических свойств бетона во времени / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Е.В. Королёв, О.В. Меньшова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 5. – С. 43–47.
2. Максимова, И.Н. О кинетических зависимостях процессов структурообразования и твердения цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 29–35.
3. Бердов, Г.И. Нанопроцессы в технологии строительных материалов / Г.И. Бердов, В.Н. Зырянова, А.Н. Машкин, В.Ф. Хританков // Строительные материалы. – 2008. – № 7. – С. 76–80.

4. Королев, Е.В. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов / Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.И. Альбакасов, А.С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве. – 2011. – № 6. – С. 32–43.
5. Лотов, В.А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий / В.А. Лотов // Строительные материалы. – 2006. – № 8. – С. 5–7.
6. Комохов, П.Г. Золь-гель-концепция нанотехнологии цементного композита / П.Г. Комохов // Строительные материалы. – 2006. – № 8. – С. 14–15.
7. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 18 с.
8. Максимова, И.Н. Сравнительный анализ кинетических зависимостей на ранних и поздних стадиях процессов структурообразования конструкционной прочности цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 5–12.
9. Макридин, Н.И. Оптимизация структуры и прогнозирование конструкционной прочности бетонов нового поколения / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 4 (49). – С. 13–24.

References

1. Makridin, N.I. On the influence of an accelerating plasticizing additive on the nature of changes in the mechanical properties of concrete over time / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, E.V. Korolev, O.V. Menshova // News of higher educational institutions. Construction. – 2004. – No. 5. – P. 43–47.
2. Maksimova, I.N. On kinetic dependences of the processes of structure formation and hardening of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 4 (33). – P. 29–35.
3. Berdov, G.I. Nanoprocesses in the technology of building materials / G.I. Berdov, V.N. Zyryanova, A.N. Mashkin, V.F. Khritankov // Building materials. – 2008. – No. 7. – P. 76–80.
4. Korolev, E.V. Some aspects of designing compositions of multicomponent composite materials / E.V. Korolev, V.A. Smirnov, A.I. Albakasov, A.S. Inozemtsev // Nanotechnologies in construction. – 2011. – No. 6. – P. 32–43.
5. Lotov, V.A. Nanodisperse systems in the technology of building materials and products / V.A. Lotov // Building materials. 2006. – No. 8. – P. 5–7.
6. Komokhov, P.G. Sol-gel concept of cement composite nanotechnology / P.G. Komokhov // Building materials. – 2006. – No. 8. – P. 14–15.
7. GOST 29167-91. Concrete. Methods for determining the characteristics of crack resistance (fracture toughness) under static loading. – M.: Publishing house of standards, 1991. – 18 p.
8. Maksimova, I.N. Comparative analysis of kinetic dependences at early and late stages of structural strength formation processes of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 2 (35). – P. 5–12.
9. Makridin, N.I. Optimization of structure and prediction of structural strength of new generation concrete / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 4 (49). – P. 13–24.

УДК 69: 519.7

DOI 10.54734/20722958_2022_2_24

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

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук,
профессор, проректор по научной работе,
советник РААСН
E-mail: prorector_nr@spbgasu.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
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering
Russia, 190005, St. Petersburg,
4, 2nd Krasnoarmeyskaya St.

Korolev Evgenij Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector for
scientific work, adviser of the Russian
academy of architectural and building science
E-mail: prorector_nr@spbgasu.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
of the department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Danilov Alexander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, Head of the
department «Mathematics and Mathematical
Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ КОМПОЗИТОВ

Е.В. Королев, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Приводятся результаты фундаментальных исследований решения математических и вычислительных задач управления свойствами материалов, оптимизации структуры и свойств материала по параметрам кинетических процессов формирования его физико-механических характеристик с использованием специально разработанного функционала качества. Определяются методологические основы системного подхода к исследованию проблем идентификации. Отмечается риск неадекватного применения формализованной модели к конкретной проблемной ситуации: нечеткость и искажение содержательного смысла моделей и их математической интерпретации. Осуществляется когнитивное моделирование структуры и свойств материалов. Дается аналитическое проектирование композита.

Ключевые слова: композиты, сложные системы, проектирование, модели, управление, методы

PRACTICAL ASPECTS OF IDENTIFICATION AND MANAGEMENT IN THE SYNTHESIS OF COMPOSITES

E.V. Korolev, I.A. Garkina, A.M. Danilov

The results of fundamental studies of solving mathematical and computational problems of controlling the properties of materials, optimizing the structure and properties of a material according to the parameters of the kinetic processes of the formation of its physical and mechanical characteristics using a specially developed quality functional are presented. The methodological foundations of a systematic approach to the study of identification problems are determined. There is a risk of inadequate application of a formalized model to a specific problem situation: fuzziness and

distortion of the meaningful assence of the models and their mathematical interpretation. Cognitive modeling of the structure and properties of materials is carried out. An analytical design of the composite is given.

Keywords: composites, complex systems, design, models, control, methods

Введение

Что касается практики использования системных методологий, то есть только отдельные эксперименты по их применению. Они отличаются относительно небольшим масштабом решаемых задач. Есть необходимость в демонстрации возможностей методов системного синтеза. Недавнее быстрое отделение философии и математики друг от друга привело к появлению ряда неразрешимых теоретических и прикладных проблем системного синтеза: философский подход не ставит перед собой цель решить проблему, а лишь обозначает ее. Основной междисциплинарный подход – синергия с бифуркационным анализом. Оценка сложности системы может производиться по-разному. Основная проблема синтеза в системном подходе – возрастающая фрагментация знаний. Требуется аппарат синтеза, основанный на интеграции междисциплинарных категорий, с его развитием до уровня математической теории. Адекватность модели определяется принятыми фундаментальными гипотезами о механизмах функционирования объекта.

Рассмотрим результаты комплексных исследований с позиций системного анализа научно-технических проблем, связанных с разработкой материалов с заданным набором эксплуатационных свойств, а также с созданием основы для компьютерного проектирования и управления технологиями их производства: установление взаимосвязи между составом, технологией производства, структурой и свойствами материала. Наличие межфазной границы в композиционных материалах определяет интенсивность процессов структурообразования. Изучение процессов структурообразования материала, разработка методов и поиск компонентов для повышения его качества, а также доработка существующих и получение новых характеристик материала позволяют совершенствовать методы проектирования и прогнозирования влияния рецептуры на свойства композита. Нами композитный материал рассматривается как сложная система. Выстраивается иерархическая структура критериев качества, в соответствии с ней – иерархическая структура самого материала. На основе общих принципов системного анализа выполняется декомпозиция системы, устанавливаются связи между подсистемами. Не исключается и другой подход к синтезу: на основе определения интегративных свойств систем с помощью автономных исследований отдельных подсистем. Каждый элемент иерархической структуры системы на определенном уровне представляется в виде модуля. Устранение межсистемных связей при автономных исследованиях отдельных подсистем может быть обеспечено введением настраиваемых эталонных моделей. Разработка материала осуществляется методом моделирования: набор взаимосвязанных моделей будет описывать систему с необходимой точностью, отражая весь набор ее свойств. Дизайн системы объединяет частные, взаимосвязанные, взаимозависимые модели. Выбор того или иного проектного решения из возможных альтернативных вариантов (средств достижения проектных целей) осуществляется на основании определенного показателя, который в целом характеризует степень достижения поставленной цели тем или иным вариантом проекта. При проектировании системы с длительным сроком эксплуатации учитывается не только текущее состояние окружающей среды, но и прогнозируемые изменения.

1. Идентификация

Синтез материалов связан с разработкой системного подхода к идентификации, фундаментальным исследованием математических и вычислительных проблем управления, концептуальных аспектов моделирования, компьютерных проблем разработки информационно-вычислительной среды. Требуется создание наукоемких методик для начальных этапов поиска решений существенно нестандартных практических задач (трудно формализуемых и с высокими требованиями к контролю качества). Многое зависит от априорной нацеленности исследователя на использование определенного

математического аппарата, от степени его проработанности. На уровне конкретного теоретического исследования основные интеллектуальные усилия направляются на структурирование и абсолютную формализацию этого процесса. В рамках математического дисциплинарного образа наиболее важными являются теоретические исследования по выбору и оценке качества структуры. Содержание структурной идентификации состоит в моделировании и изучении локальных фрагментов без учета их реального контекста. Наибольшая ответственность возникает в процедуре принятия решения (плохая формализуемость объекта; сложная иерархия задач; задачи оперативного управления являются фрагментами глобальной задачи управления качеством с отслеживанием определенных критериев и т. д.). Большинство из этих проблем могут быть решены только на междисциплинарном уровне (каждый фрагмент локальной или глобальной проблемы в рамках одной дисциплины), что требует подготовки соответствующего интеллектуального потенциала в рамках различных дисциплинарных научных школ. Мы построили обобщенную модель, основанную на классификации наиболее распространенных типов кинетических процессов [1...3]. Каждый из рассмотренных кинетических процессов является частным случаем обобщенной модели. Алгоритмы определения параметров моделей составлены на основе характерных точек кинетических процессов системного подхода к идентификации. Параметрическая идентификация кинетических процессов сводилась к определению параметров обобщенной модели. При решении отдельных задач целевая функция формировалась с учетом как реакции системы на пробные воздействия, так и синхронных измерений характеристик системы и управляющих воздействий при нормальной эксплуатации. На основе выявления перекрестных связей уточнялись структурно-математические модели систем и подсистем с последующей идентификацией параметров (часто из условий получения экстремумов целевых функций). Оптимизация структуры и свойств материала по параметрам кинетических процессов формирования его физико-механических характеристик проводилась на основе специально разработанного функционала качества. Фактором риска является непонимание математического смысла структур специалистами проблемной области (риск неадекватного применения формализованной модели к конкретной проблемной ситуации): нечеткость и искажение смыслового смысла модели. Структуры с точки зрения их математической интерпретации порождают риск ненадежной оценки силы влияния факторов (если данных для такой оценки недостаточно). Фактор считается представленным в нормальной форме, если его можно интерпретировать естественным образом, и определяется как переменная, которая принимает значение по определенной шкале измерения или рейтинга (с вербальными значениями: «высокий», «низкий»). С лингвистической точки зрения нормальность фактора позволяет естественным образом использовать вербальные контексты: «больше – меньше», «рост – упадок» и т. д. Часто бывает сложно даже при выборе контекстов, схожих по значению, например, «хуже – лучше». Требуется когнитивная ясность концепции как переменной требуемого типа: одни и те же причинно-следственные связи при моделировании могут быть представлены на когнитивной карте с использованием разных концептов. Принцип транзитивности причинных понятий считается универсальным, однако он не всегда выполняется (ложная транзитивность). Философские проблемы являются центрами проблематизации; разделение философии и математики привело к неразрешимости ряда теоретических и прикладных проблем системного синтеза. Перспективное направление системных исследований связано с решением проблемы «черного ящика»: сначала физические процессы в определенном блоке преобразователя заменяются набором передаточных функций, соответствующих параметрам входов и выходов системы (типичные физические процессы идентифицированы, которые позволяют онтологизировать передаточные функции и дать физическое соответствие переменным в уравнении). Для замены «черного ящика» на «серый» используются модели гомеостатического типа, обладающие определенной универсальностью и способностью физически интерпретировать процессы. Одним из междисциплинарных подходов является синергетика (действие превышает действие, обеспечиваемое каждым компо-

нением в отдельности) с анализом бифуркаций (где происходит выбор и где сложная система может быть направлена по разным траекториям). Сложность системы оценивается по-разному (по А.Н. Колмогорову, определяется как минимальный размер количества информации, которая задает этот объект; принятые фундаментальные гипотезы о механизмах функционирования объекта определяют адекватность модели). В последнее время при моделировании все чаще используется метод погружения с использованием моделей простых вспомогательных систем, которые мажорируют или преуменьшают поведение исследуемой системы.

2. Качественный анализ материалов

Разработка композитов начинается с когнитивного картирования (причинно-следственная связь) (рис. 1). Из-за междисциплинарности исследований в материаловедении системный подход ранее практически не применялся (когда внешняя среда не требует науки, то по этому свойству система изолирована или замкнута, и только тогда, когда во внешней среде появляется потребитель, система откроется). Контроль технологии производства осуществляется в соответствии с теорией полиструктуры (раздельное формирование отдельных композитных структур на несовместимых или несовместимых компонентах). Оптимизация каждого структурного уровня проводится на основе выбранных критериев. На каждом последующем структурном уровне (новый материал) оптимизируется рецепт и технология предыдущего уровня. Последовательное совмещение уровней (от микроструктуры до макроструктуры) осуществляется на основе критериев (свойств), обеспечивающих получение качественного композиционного материала на уровне макроструктуры (технологического продукта). Мы использовали аналогию строения систем: изоморфизм и гомоморфизм. Построение орграфа позволило установить элементарные рецептурные факторы (количество, удельную поверхность, химический состав и др.) для управления технологией производства материала [4...6].

3. Структура и свойства материалов

С использованием определенного математического аппарата по степени его проработки был проведен предварительный анализ априорной информации. Основные усилия были направлены на структурирование и абсолютную формализацию. Предполагалось, что человек имеет безусловный приоритет перед результатами анализа. Использованы методы векторной оптимизации: целевая функция определялась желаемыми типами кинетических процессов формирования основных физико-механических характеристик композитов; учтена возможность установления связи между структурой композита и изменением макроскопических характеристик. Учитывая сложность установления влияния рецептурно-технологических параметров на характеристики материалов, была разработана специальная методика контроля выходных характеристик материала, определены сшивки (синергетики) между свойствами материала; доработаны математические модели подсистем с последующей идентификацией параметров (для отдельных систем – из условий получения экстремумов целевых функций). В управлении качеством оказалось эффективным использование принципа и диаграмм Парето (как оказалось, для эпоксидных композиционных материалов для защиты от излучения прочность и плотность в основном определяются степенью наполнения и типом модификатора). Также использовался итерационный метод улучшения качества материала, основанный на последовательном построении соответствующих диаграмм Парето на каждом этапе. Так, на рис. 2, 3 приведены кинетические процессы и соответствующие им суммарные кривые тепло-выделения и отверждения эпоксидных композитов. Применение принципа Парето значительно облегчает определение параметров: содержания ингредиентов, крупности и др.; он позволяет выделить элементы материала, которые, в основном, определяют свойства композита.

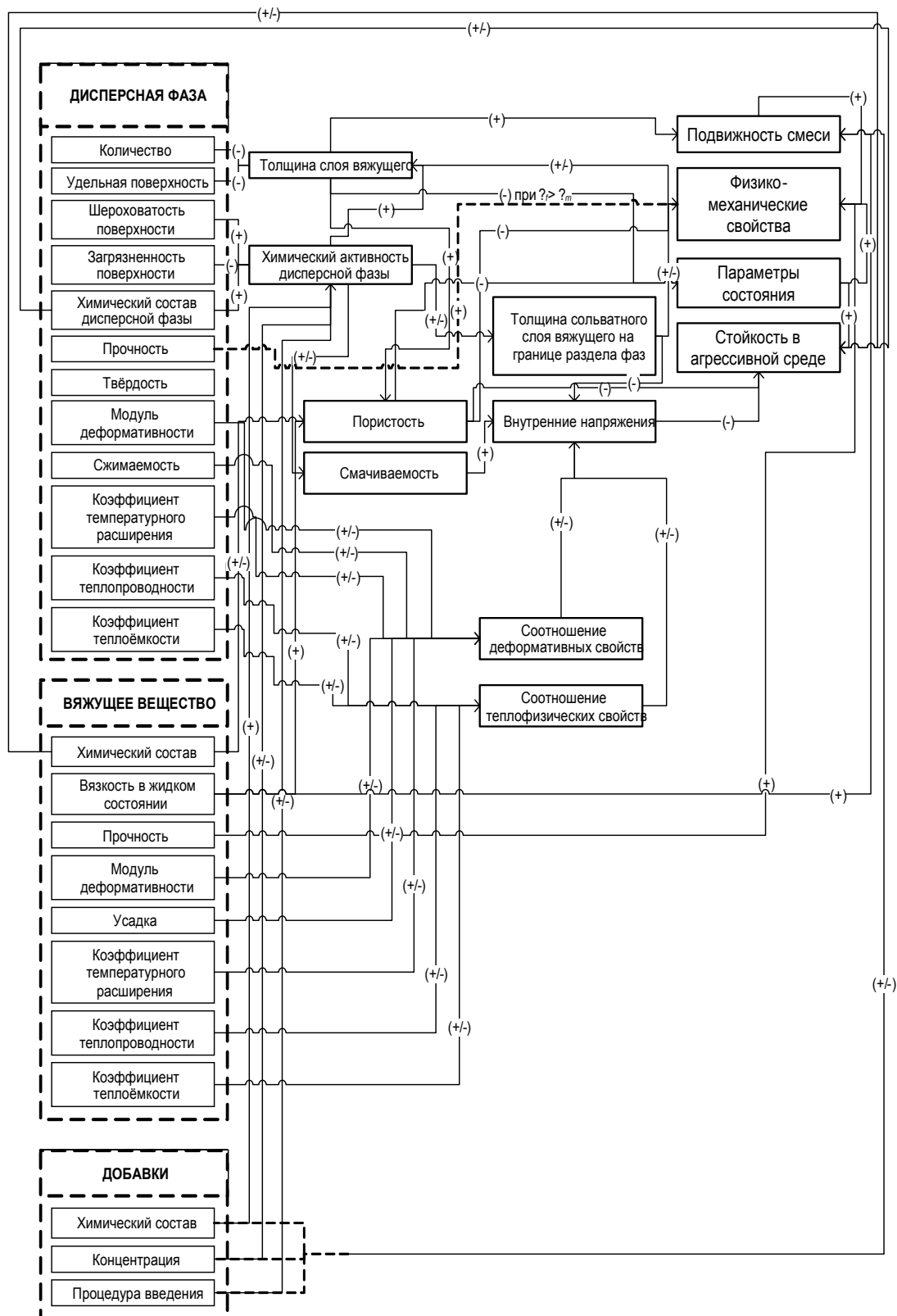


Рис. 1. Пример когнитивного моделирования

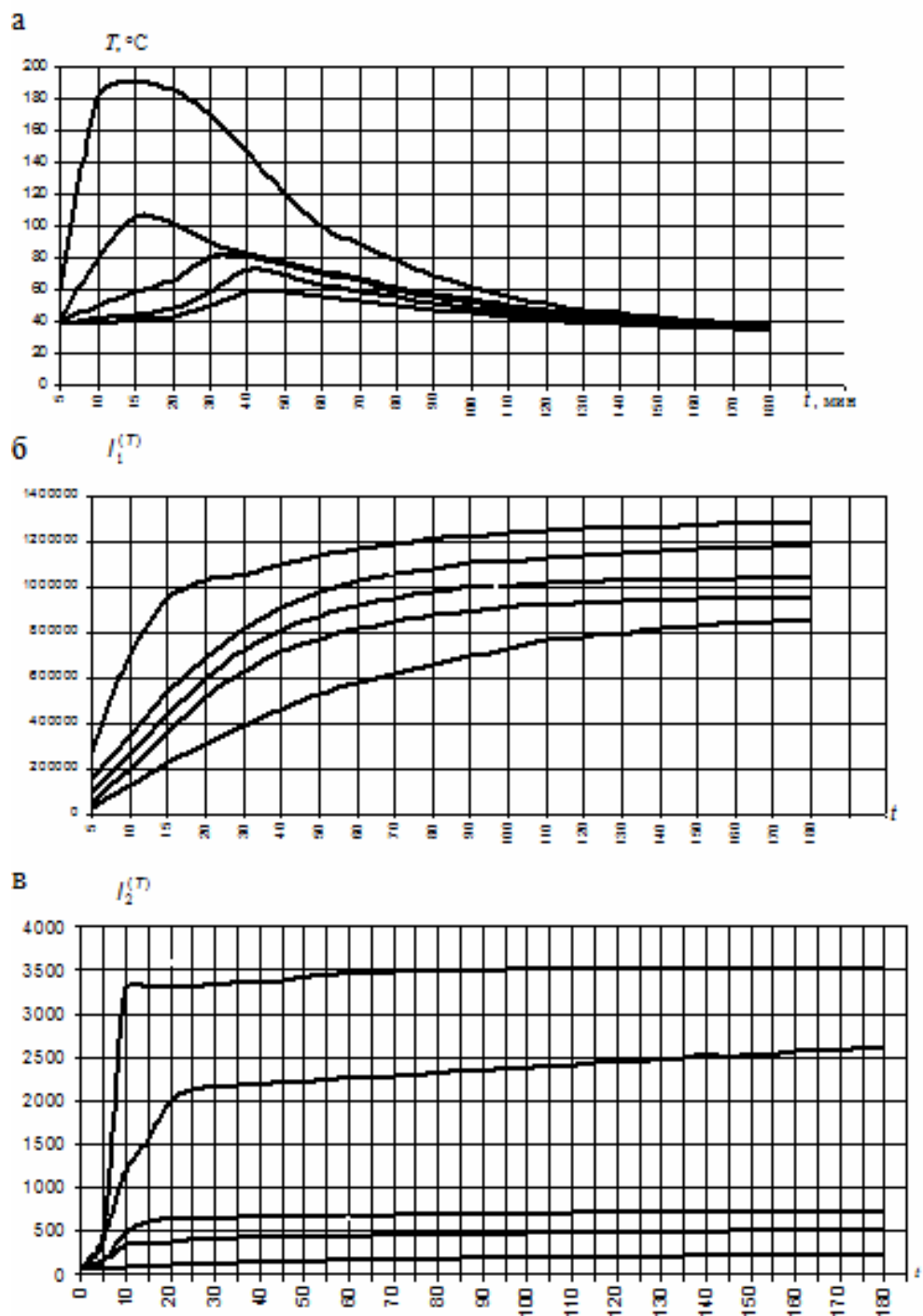


Рис. 2. Зависимость температуры саморазогрева при полимеризации эпоксидного композита, $I_1^{(T)}$ и $I_2^{(T)}$ от t , мин:
1 – ненаполненная смола; 2 – П/Н=1/5; 3 – П/Н=1/10; 4 – П/Н=1/15; 5 – П/Н=1/20

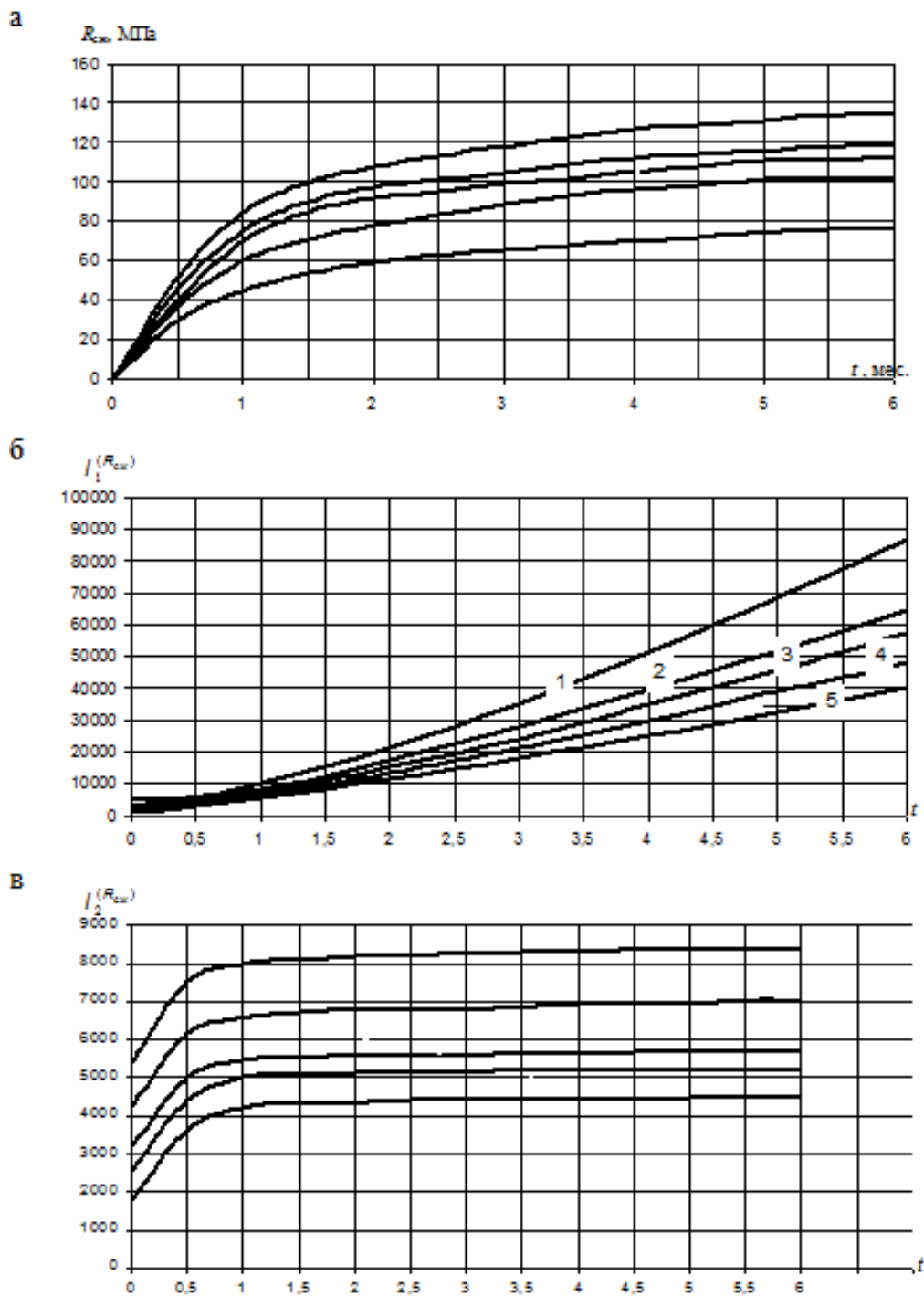


Рис. 2. Зависимость $R_{сж}$, $I_1^{(T)}$ и $I_2^{(T)}$ от t , мес:
 1 – П/Н=1/15; 2 – П/Н=1/10; 3 – П/Н=1/10 и ММ; 4 – П/Н=1/20; 5 – П/Н=1/5

4. Аналитические методы

На основе опыта разработки композитов, по существу, приводятся новый подход и методологические принципы разработки материалов, основанные на использовании методов системного анализа и моделирования кинетических процессов. Сначала материал рассматривается как полу-структурированная многофункциональная система. В междисциплинарных исследованиях используется неполная, нечеткая и даже противоречивая информация. На основе когнитивной карты (в том числе коллективной) были построены иерархические структуры критериев качества [7, 8] и сама система,

что позволило рассматривать систему уже как структурированную. Широко использовались методы ранговой корреляции (в частности, изучались деформативные свойства (учитывались 14 показателей) и взаимосвязи между ними для 10 типов эпоксидных композитов) [9]. Оптимизация рецептурно-технологических параметров и контроля качества материалов проводилась по результатам многокритериальной оптимизации (предварительная минимизация размерности критериального пространства). В случае противоречивых критериев многокритериальная оптимизация проводилась методом последовательных уступок; скаляризация критериев осуществлялась по результатам решения однокритериальных задач (контрольные показатели) [10].

Выводы

Предлагается системный подход к идентификации при разработке композиционных материалов. Разработана процедура когнитивного моделирования для качественного анализа материалов как систем, определения их структуры и свойств. Проанализированы результаты применения аналитических методов синтеза композиционных материалов. Подтверждены эффективность и перспективность использования предложенных методов при многокритериальном синтезе материалов с заданными свойствами.

Список литературы

1. Garkina, I. Modeling of kinetic processes in composite materials / I. Garkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 421–425.
2. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering»*. – 2017. – P. 012006.
3. Гарькина, И.А. Системный анализ в управлении свойствами материалов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королёв // *Региональная архитектура и строительство*. – 2021. – № 3 (48). – С. 63–68.
4. Гарькина, И.А. Управление в сложных технических системах: методологические принципы проектирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2012. – № 1. – С. 39–42.
5. Королёв, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королёв // *Архитектура и строительство России*. – 2020. – № 3. – С. 143.
6. Королёв, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королёв, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // *Строительные материалы*. – 2020. – № 9. – С. 54–61.
7. Бормотов, А.Н. Исследование математических моделей структурообразования композиционных материалов аналитическими методами / А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, А.В. Васильков // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2011. – № 2 (30). – С. 62–70.
8. Бормотов, А.Н. Декомпозиция систем и иерархические структуры показателей качества композитов / А.Н. Бормотов // *Современные наукоемкие технологии*. – 2016. – № 9–2. – С. 196–203.
9. Бормотов, А.Н. Разработка и обоснование функционала качества при многокритериальном синтезе композитов специального назначения / А.Н. Бормотов // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 10–1. – С. 20–25.
10. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // *Journal of Basic and Applied Research International*. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.

References

1. Garkina, I. Modeling of kinetic processes in composite materials / I. Garkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 421–425.

2. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
3. Garkina, I.A. System analysis in the management of material properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 3 (48). – P. 63–68.
4. Garkina, I.A. Control in complex technical systems: methodological design principles / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2012. – №1. – P. 39–42.
5. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Architecture and construction of Russia. – 2020. – № 3. – P. 143.
6. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Construction materials. – 2020. – № 9. – P. 54–61
7. Bormotov, A.N. Research of mathematical models of structure formation of composite materials by analytical methods / A.N. Bormotov, I.A. Proshin, A.V. Vasilkov // Bulletin of the Bryansk State Technical University. – 2011. – №2 (30). – P. 62–70.
8. Bormotov, A.N. Decomposition of systems and hierarchical structures of quality indicators of composites / A.N. Bormotov // Modern science-intensive technologies. – 2016. – № 9–2. – P. 196–203.
9. Bormotov, A.N. Development and substantiation of the quality functional in the multicriteria synthesis of special-purpose composites / A.N. Bormotov // Fundamental research. – 2016. – №10–1. – P. 20–25.
10. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2022_2_33

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

Зайцева Мария Владимировна,
аспирант кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: zajc@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Zaitseva Maria Vladimirovna,
Postgraduate of the department «Quality
Management and Construction Technologies»
E-mail: zajc@yandex.ru

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАПОЛНИТЕЛЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕЦЕПТУРЫ ИЗВЕСТКОВОГО СОСТАВА ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ ЗДАНИЙ

В.И. Логанина, М.В. Зайцева

Приведены сведения о методике выбора наполнителя известкового состава, предназначенного для реставрации зданий исторической застройки. Проанализирована вариативность показателя прочности известкового композита с применением в качестве наполнителя маршалита, песка и микрокальцита. Выявлено, что прочность при сжатии известкового композита с применением в качестве наполнителя микрокальцита выше по сравнению с прочностью композита на песке и маршалите. Проанализирована достоверность определения прочности известковых композитов.

Ключевые слова: известковый состав, микрокальцит, вариативность показателей качества, достоверность контроля

JUSTIFICATION OF THE FILLER CHOICE IN THE DEVELOPMENT OF THE FORMULA OF LIME COMPOSITION FOR RESTORATION OF BUILDINGS

V.I. Loganina, M.V. Zaitseva

Some information is given on the method of choosing a lime composition filler intended for restoration of historical buildings. The variability of the strength index of the lime composite with the use of marshalite, sand and microcalcite as a filler is analyzed. It is found that the compressive strength of the lime composite with the use of microcalcite as a filler is higher compared to the strength of the composite on sand and marshalite. The reliability of determining the strength of lime composites is analyzed.

Keywords: lime composition, microcalcite, variability of quality indicators, control reliability

Традиционными материалами для окрашивания стен зданий были известковые составы. Однако в настоящее время отделка и реставрация исторических зданий вызывает определенные трудности, связанные с несовместимостью известковой штукатурки с современными отделочными материалами. Для ускорения твердения и повышения прочности известковых композитов в рецептуру вводят модифицирующие добавки.

В работе [1] для ускорения процесса твердения известки предлагается введение в рецептуру известковых составов добавки на основе природных цеолитов. В [2] предложено применять в композитах на основе минеральных вяжущих синтезированные

цеолиты. Авторами выявлены закономерности структурообразования известкового композита в присутствии добавки на основе синтетического цеолита, заключающиеся дополнительно в образовании гидросиликатов кальция-натрия и минералов группы цеолитов, увеличении количества химически связанной извести на 8,74 %.

В работах [3–7] предложено для повышения стойкости известковых покрытий применять синтезированные гидросиликаты (ГСК), органоминеральные добавки, модифицированный диатомит.

В Китае при реставрации исторических зданий в Шанхае и Ханчжоу для ремонта и восстановления отслоившихся поверхностей из натурального камня, гипса и кирпича применяется система, состоящая из клеев и инъекционных растворов на основе гидравлической извести (NHL) [8].

В работе [9] предлагается при проведении реставрационных работ использовать известковые составы, в рецептуру которых вводятся органические компоненты (полисахариды, белки и жирные кислоты). Авторами установлено, что добавление животного клея в качестве добавки увеличивает механическую прочность раствора в 2 раза, увеличивает в 2 раза фронт карбонизации, также снижается пористость и уменьшается размер пор.

Для восстановления исторических кладок в [10–12] предлагается применять известково-метакаолиновые растворы.

Общие принципы выбора реставрационных материалов должны быть основаны на международном опыте реставрационной практики, на постулатах, указанных в Международной хартии по консервации и реставрации исторических памятников и достопримечательных мест (Венеция, 1964 г.), законодательных актах, государственных законах, постановлениях и других ведомственных нормативных документах.

Новые материалы, имеющие непосредственный контакт с подлинными материалами памятника, должны соответствовать им по ряду параметров. Они должны быть близкими к авторскому материалу по фактуре, микро- и макроструктуре, не изменять цвета материала памятника, иметь сопоставимые параметры по прочности и долговечности, должны обладать стойкостью к воздействиям атмосферы, биостойкостью, быть стабильными при длительной эксплуатации. В работах [13] предложена концепция формирования структуры строительных композитов на основе принципа сродства структур. Принцип сродства структур заключается в минимизации физико-химических и структурных различий между реставрируемым составом и реставрируемым элементом старого сооружения с тем, чтобы поровая структура полученного композита стала в идеале единой и однородной.

В связи с этим актуальным является выбор компонентов при разработке рецептуры составов, предназначенных для реставрации.

Нами предложено в целях повышения стойкости известковых покрытий вводить в рецептуру модифицирующую добавку – полисиликатный раствор, полученный смешиванием жидкого стекла и золя кремниевой кислоты [14]. Выбор модифицирующей добавки обусловлен ее структурообразующим влиянием на известковые композиты.

При выборе наполнителя исходили из его влияния на прочность при сжатии известкового композита. В европейском стандарте DIN EN 998-1-2010 указано, что сопротивление внешним воздействиям и долговечность штукатурного состава обеспечиваются, когда раствор характеризуется значениями прочности в пределах от 2 до 5 МПа. Растворы, имеющие подобные показатели прочности, способны приспосабливаться к незначительным деформациям и противодействовать образованию трещин.

В качестве наполнителя применяли микрокальцит марки КМ2 (ГОСТ 56775-2015), маршалит марки «А» (ГОСТ 9077-82), кварцевый песок Ухтинского месторождения (Пензенская область). Полисиликатный раствор готовили смешением жидкого стекла и золя кремниевой кислоты Nanosil. В исследовании применяли золи кремниевой кислоты Nanosil 20 и Nanosil 30, выпускаемые ПК «Промстеклоцентр».

Результаты исследований приведены в табл. 1.

Влияние наполнителя на прочность при сжатии известкового композита

Вид наполнителя	Содержание наполнителя	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент вариации, %	Среднеквадратическое отклонение СКО, МПа
Песок фракции 0,315–0,63	1:3, В/И=1,26	1,09	10,3	0,112
Маршалит	1:1,В/И=1,26 6	1,53	7,4	0,113
	1:2, В/И=1,26	1,46	7,3	0,106
	1:3, В/И=1,26	1,39	7,2	0,1
Микрокальцит	1:1, В/И=1,26	1,83	6,3	0,115
	1:2, В/И=1,26	1,78	5,9	0,105
	1:3, В/И=1,26	1,69	5,4	0,091
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 5 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	2,3	5,1	0,117
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 1 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	2,6	5,0	0,105
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 10 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	2,1	5,2	0,135
Микрокальцит, добавка золя кремниевой кислоты в количестве 1 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	1,85	5,2	0,096
Микрокальцит, добавка жидкого стекла в количестве 1 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	1,79	5,3	0,094

Установлено, что прочность при сжатии известковых композитов с применением в качестве наполнителя микрокальцита выше и составляет в зависимости от соотношения «известь:наполнитель» 1,69–1,83 МПа, в то время как с применением маршалита – 1,39–1,53 МПа, кварцевого песка – 1,09 МПа.

Введение полисиликатного раствора в известковую смесь приводит к повышению прочности при сжатии, которая составит при содержании добавки 1,0 % от массы извести 2,6 МПа.

Учитывая, что разрабатываемый состав предполагается применять при отделке и реставрации зданий, в том числе и известняковых поверхностей, руководствуясь принципом сродства структур, в дальнейшем в качестве наполнителя применяли только микрокальцит.

Следует отметить, что вариативность показателя прочности известкового композита с применением в качестве наполнителя маршалита или песка выше по сравнению с вариативностью прочности композита на микрокальцитовом наполнителе. Так, коэффициент вариации прочности композита на песке 10,3 %, а на микрокальците – 5,0–6,3 %.

Учитывая, что требованиям DIN EN 998-1-2010 соответствуют только составы на микрокальците с добавкой полисиликатного раствора, была проанализирована достоверность определения прочности известковых композитов только на основе этих составов [15, 16]. Достоверность контроля P_d вычислялась по формуле

$$P_d = 1 - \alpha - \beta, \quad (1)$$

где α – ошибка первого рода (риск изготовителя – вероятность того, что работоспособный объект признан негодным); β – ошибка второго рода (риск потребителя – вероятность того, что неработоспособный объект признан годным).

Расчетные формулы для определения риска производителя (α_i) и риска потребителя (β_i) имеют вид

$$\alpha_i = \int_a^b f(U_i) \left[\int_{-\infty}^{a_1} f(y_i|U_i) dy_i + \int_{b_1}^{\infty} f(y_i|U_i) dy_i \right] dU_i \quad (2)$$

$$\beta_i = \int_{-\infty}^a f(U_i) \left[\int_{a_1}^{b_1} f(y_i|U_i) dy_i \right] dU_i + \int_b^{\infty} f(U_i) \left[\int_{a_1}^{b_1} f(y_i|U_i) dy_i \right] dU_i,$$

где $[a_1; b_1]$ – интервал для погрешности y_i при условии, что значения U_i попали в интервал $[a; b]$; i – оцениваемый параметр

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Оценка достоверности контроля

Наименование состава	Допуск		Погрешность, %	Риски		Достоверность контроля
	нижний	верхний		производителя α	потребителя β_o	
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 5 % от массы извести	2	5	1 %	0,0016351	0,0008716	0,9974
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 1 % от массы извести	2	5	1 %	0,022562	0,0178321	0,9596
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 10 % от массы извести	2	5	1 %	0,00003	0,00001	0,9999

Результаты расчетов свидетельствуют, что достоверность контроля прочности композитов составляет 0,9596–0,9999, что может гарантировать потребителю получение качественной продукции.

Список литературы

1. Селяев, В.П. Влияние структуры цеолитсодержащих композитов на долговечность бетона / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы V акад. чтений. – Воронеж: Рос. акад. архитектуры и строит. наук, 1999. – С. 394–398.
2. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 4 (652). – С. 37–42.
3. Логанина, В.И. Штукатурные составы для реставрационных работ с применением окрашенных наполнителей / В.И. Логанина, Л.В. Макарова // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 38–40.
4. Логанина, В.И. Известковые отделочные составы на основе золь-гель-технологии / В.И. Логанина, О.А. Давыдова // Строительные материалы. – 2009. – № 3. – С. 50–51.
5. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.
6. Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 8–12.
7. Логанина, В.И. Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций / Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е. // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 3 (627). – С. 20–23.
8. Elert, K. Influence of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of lime plasters / K. Elert, R.M. García Sánchez, C. Benavides-Reyes, F. Linares Ordóñez // Construction and Building Materials. – 2019. – 226. – P. 625–635.
9. Centauro, I. The Influence of Natural Organic Materials on the Properties of Traditional Lime-Based Mortars / I. Centauro, E. Cantisani, C. Grandin, A. Salvini, S. Vettori // International Journal of Architectural Heritage. – 2017. – 11 (5). – P. 670–684.
10. Brzyski, P. The influence of gum arabic admixture on the mechanical properties of lime-metakaolin paste used as binder in hemp concrete / P. Brzyski // Materials. – 2021. – 14(22). – P. 6775.
11. Pachta, V. The role of glass additives in the properties of lime-based grouts / V. Pachta // Heritage. – 2021. – 4(2). – P. 906–916.
12. Bakolas, A. Chemico-physical interactions among the constituents of historical walls in Venice / A. Bakolas, R. Bertoncello, G. Biscontin, A. Glisenti, A. Moropoulou, E. Tonello, E. Zendri // In: Materials Issues in Art and Archaeology IV. Mat. Res. Soc. / J.R. Druzik, P.B. Vandiver (Eds.), – Pittsburgh, 1995. – P. 771–777.
13. Чулкова, И.Л. Структурообразование строительных композитов на основе принципа сродства структур / И.Л. Чулкова // Вестник СибАДИ. – 2012. – № 6. – С. 83–88.
14. Loganina, V.I. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 9. – P. 00173.
15. Данилевич, С.Б. О легитимизации показателей достоверности результатов контроля и испытаний продукции / С.Б. Данилевич // Компетентность. – 2012. – №6(97). – С. 49–51.

16. Данилевич, С.Б. О показателях качества допускового контроля / С.Б. Данилевич // Методы оценки соответствия. – 2013. – № 12. – С. 20–21.

References

1. Selyaev, V.P. Influence of the structure of zeolite-containing composites on the durability of concrete / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina // Modern problems of building materials science: materials of the 5th acad. readings. – Voronezh: ros. acad. architecture and builds. sciences, 1999. – P. 394–398.
2. Loganina, V.I. Rheological properties of a composite lime binder using synthetic zeolites / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – No. 4 (652). – P. 37–42.
3. Loganina, V.I. Plaster compositions for restoration work using colored fillers / V.I. Loganina, L.V. Makarova // Regional architecture and engineering. – 2009. – No. 1. – P. 38–40.
4. Loganina, V.I. Lime finishing compositions based on sol-gel technology / V.I. Loganina, O.A. Davydova // Building materials. – 2009. – No. 3. – P. 50–51.
5. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organo-mineral supplements based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 9 (609). – P. 36–39.
6. Loganina, V.I. Development of an organomineral additive for dry building mixtures / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2011. – No. 3. – P. 8–12.
7. Loganina, V.I. Influence of Diatomite Activation on the Properties of Lime Compositions / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // News of higher educational institutions. Construction. – 2011. – No. 3 (627). – P. 20–23.
8. Elert, K. Influence of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of lime plasters / K. Elert, R.M. García Sánchez, C. Benavides-Reyes, F. Linares Ordóñez // Construction and Building Materials. – 2019. – 226. – P. 625–635.
9. Centauro, I. The Influence of Natural Organic Materials on the Properties of Traditional Lime-Based Mortars / I. Centauro, E. Cantisani, C. Grandin, A. Salvini, S. Vettori // International Journal of Architectural Heritage. – 2017. – 11 (5). – P. 670–684.
10. Brzyski, P. The influence of gum arabic admixture on the mechanical properties of lime-metakaolin paste used as binder in hemp concrete / P. Brzyski // Materials. – 2021. – 14(22). – P. 6775.
11. Pachta, V. The role of glass additives in the properties of lime-based grouts / V. Pachta // Heritage. – 2021. – 4(2). – P. 906–916.
12. Bakolas, A. Chemico-physical interactions among the constituents of historical walls in Venice / A. Bakolas, R. Bertoncello, G. Biscontin, A. Glisenti, A. Moropoulou, E. Tondello, E. Zendri // In: Materials Issues in Art and Archaeology IV. Mat. Res. Soc. / J.R. Druzik, P.B. Vandiver (Eds.), – Pittsburgh, 1995. – P. 771–777.
13. Chulkova, I.L. Structure formation of building composites based on the principle of structure affinity / I.L. Chulkova // Bulletin of SibADI. – 2012. – No. 6. – P. 83–88.
14. Loganina, V.I. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 9. – P. 00173.
15. Danilevich, S.B. On the legitimization of indicators of the reliability of the results of control and testing of products / S.B. Danilevich // Competence. – 2012. – No. 6(97). – P. 49–51.
16. Danilevich, S.B. On the quality indicators of tolerance control / S.B. Danilevich // Methods of conformity assessment. – 2013. – No. 12. – P. 20–21.

УДК 691

DOI 10.54734/20722958_2022_2_39

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
кафедры «Математика и математическое
моделирование»

E-mail: fmatem@pguas.ru

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
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
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, Head of the
department «Mathematics and Mathematical
Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

СИНТЕЗ МАТЕРИАЛОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ

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

Определяются математические и вычислительные проблемы управления, концептуальные аспекты идентификации; указываются нормы, образцы и идеалы моделирования. Рассматриваются основные задачи, непосредственно связанные со структурной идентификацией, созданием и внедрением прототипов новых систем идентификации, тиражированием эталонных прикладных разработок теории идентификации в различные отрасли промышленности. Приводится пример синтеза композита как многокритериальной системы.

Ключевые слова: композиты, системы, многокритериальность, синтез материалов, приложения системного анализа

SYNTHESIS OF MATERIALS WITH ADJUSTABLE PROPERTIES

Е.А. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

Mathematical and computational problems of control, conceptual aspects of identification are determined; norms, patterns and ideals of modeling are indicated. The main tasks directly related to structural identification, creation and implementation of prototypes of new identification systems, replication of reference applied developments of identification theory in various industries are considered. An example of a composite synthesis as a multicriteria system is given.

Keywords: composites, systems, multicriteria, synthesis of materials, applications of systems analysis

Для начальных этапов поиска решений трудных (существенно нестандартных) практических задач, содержащих трудно формализуемые и высокие требования к качеству управления (оценивания, прогнозирования), существует актуальная потребность создания наукоемких методологий. При их разработке основную роль играет

системный подход к исследованию проблем идентификации, фундаментальные исследования математических и вычислительных проблем управления, концептуальных аспектов идентификации и моделирования, компьютерных проблем развития информационно-вычислительной среды (ментальные представления об идентификации; установки и мотивы процесса отображения ментальных представлений об идентификации в предмет теоретического идентификационного исследования; нормы, образцы и идеалы теоретического исследования проблем идентификации).

В процессе идентификации [1, 2] создаются все необходимые описания реальности. Переход от объективной реальности к модельным представлениям математической теории и обратно связан с внутренними механизмами реальной идентификации, со способностями субъекта идентификации, с возможностями информационной поддержки. Любая методология будет включать процесс человеческого выбора при выработке текущего выполнения процесса идентификации. Часто конкретные математические и прикладные исследования опережаются и подсказываются математической интуицией и методологией.

Под структурной идентификацией в настоящее время понимается поиск адекватного семейства математических моделей для параметрической или непараметрической идентификации (нет общепризнанного толкования смысла и значения понятий «поиск», «адекватность»). Интуиция, жизненный опыт и здравый смысл признаются в качестве основных инструментов субъекта структурной идентификации (доминирование творческих способностей человека над ценностью современного теоретического знания). В узком смысле структурная идентификация понимается как особая человеческая деятельность, направленная на построение адекватной математической постановки практической задачи: разработка содержательной постановки практической задачи; выбор математической задачи с заданными параметрами; поиск адекватных значений заданных параметров математической задачи; коррекция содержательной постановки практической задачи; предварительный выбор и алгоритмизация адекватной постановки; поиск решения пробной постановки практической задачи и др. На предметно-содержательном наглядном уровне поиск осознается как сложная интеллектуальная деятельность, где доминирующую роль играют технологические и теоретические знания, интуиция, здравый смысл и опыт субъекта идентификации; для формулировки его научного понятия целостный наглядный образ реальных процессов следует выразить на языке теории идентификации. На концептуальном уровне считается, что в процессе структурной идентификации существенную роль играют интуиция и жизненный опыт лица, принимающего решение. На уровне конкретного теоретического исследования основные интеллектуальные усилия направляются на структуризацию и абсолютную формализацию данного процесса. В рамках математического дисциплинарного образа наиболее важны теоретические исследования по разработке алгоритмов генерации и перебора структур (заданное семейство математических уравнений), выбор и оценка качества «наилучшей» структуры. Налицо конфликт между разными образами структурной идентификации как важного фактора постановки и решения новых теоретических задач. Не менее сложная ситуация связана со словом «адекватность»: построение общей схемы и исследование человеческих аспектов идентификации – это взаимосвязанные темы.

Особо важно определить: какими свойствами обладает техническая система; для каких аспектов технической системы необходимо построить адекватную модель; для решения какой практической проблемы управления «запускается» процесс идентификации; элементами какой системы процессов является идентификация; каким требованиям должна удовлетворять адекватная модель; какими средствами идентификации обладает субъект идентификации; в чем заключается основная трудность разработки адекватной модели; какие вспомогательные модели и каких аспектов действительности необходимо построить, чтобы можно было сконструировать адекватную модель? Здесь и далее предполагается, что идентификация не может осуществляться без использования присущих только человеку

способностей, не бывает автоматической идентификации, ни один алгоритмический процесс не может быть назван идентификацией.

Идентификация есть процесс порождения знания, необходимого для внедрения в практику методов и алгоритмов математики. Уже стало очевидным, что методологические принципы создания строительных материалов должны быть основаны на использовании методов системного анализа и моделировании кинетических процессов формирования физико-механических характеристик. При идентификации систем возможно широкое использование методов решения математических задач системного анализа: математическое программирование, ранговая корреляция, многокритериальная оптимизация, планирование эксперимента. При формализованной оценке макро- и микроструктуры строительные материалы должны представляться как системы. Особое внимание следует обращать на формализацию интегративных свойств и разработку иерархических структур материалов и их критериев качества [3...5] и, как следствие, формирование обобщенной динамической модели в выбранном классе дифференциальных уравнений, а в дальнейшем и параметрической идентификации модели. Многокритериальную оптимизацию структуры и свойств материала целесообразно производить по результатам решения совокупностей однокритериальных задач.

Большинство задач можно решить лишь на междисциплинарном уровне (каждый фрагмент локальной или глобальной задачи – по возможности в пределах одной дисциплины), что требует подготовки соответствующего интеллектуального потенциала внутри различных дисциплинарных научных школ. Создание и внедрение прототипов новых систем идентификации чрезвычайно актуальны. Однако это не исключает актуальность и тиражирования эталонных прикладных разработок теории идентификации в различные отрасли промышленности [6...10].

При проектировании многоцелевых сложных систем, работа которых оценивается несколькими показателями качества, задачу их оптимизации даже в упрощенном виде следует формулировать для системы в целом, а не для отдельных подсистем. Это связано с тем, что решение задачи оптимизации с достаточной точностью для отдельных подсистем приводит к большим потерям в показателе качества работы всей системы, чем при приближенном решении задачи оптимизации в целом. Среди двух групп критериев оптимизации, подчиненных решению математических задач оптимизации и направленных на решение практических задач, естественно, предпочтение отдается последней. Критерии могут быть равнозначными, близкими или их ранжировка при противоречивости частных критериев является не столь жесткой, как в лексикографической задаче. В таких случаях при синтезе материалов нами использовался метод последовательных уступок; многокритериальная задача сводилась к поочередной максимизации частных критериев и выбору величин уступок (чем уступки меньше, тем приоритет жестче). В качестве оптимальной принималась любая стратегия, соответствующая условному максимуму последнего по важности критерия.

Использовался и другой подход оптимизации как задачи оптимизации с ограничениями, которые могут оказаться и противоречивыми. Так, если максимизировался функционал $\tilde{q}_1(u)$ на множестве U при условии выполнения неравенств $\tilde{q}_j(u) \geq 0, j = \overline{2, m}$ ($\tilde{q}_j(u)$ – безразмерные, нормализованные критерии), то, если ограничения непротиворечивы, множество $\tilde{U}$ точек из U – не пусто (при отсутствии сведений о совместности неравенств множество $\tilde{U}$ может оказаться и пустым). Изменим исходную постановку задачи, чтобы она оставалась содержательной, когда $\tilde{U}$ – пустое множество, а при совместности ограничений – была бы эквивалентна обычной задаче максимизации. Для этого воспользуемся идеей лексикографической оптимизации. Здесь «степень невыполнения» ограничений оценивается с помощью функционала «невязки»

$$\psi(u) = \begin{cases} 0 & \text{при непротиворечивости ограничений,} \\ < 0 & \text{при противоречивости ограничений.} \end{cases}$$

В качестве $\psi(u)$ использовался функционал

$$\min \{ 0, f_1(u), f_2(u), \dots, f_r(u) \}; (\max \psi(u) = 0).$$

В лексикографической задаче с двумя критериями $q_1 = \psi(u), q_2 = f_0(u)$, если ограничения совместны ($\psi(u) = 0$), q_1 достигает своего максимума на U . При этом множество его точек максимума в точности совпадает с $\tilde{U}$ (решения рассматриваемой лексикографической задачи совпадают с решениями задачи максимизации $f_0(u)$ при ограничениях $f_j(u) \geq 0, j = \overline{1, r}$). Если же ограничения несовместны, то при максимизации q_1 осуществляется максимизация степени выполнения ограничений, а затем уже на множестве точек, обеспечивающих наибольшую степень выполнения (наименьшая степень невыполнения) этих ограничений максимизируется критерий q_2 . Как видим, рассмотренная двухкритериальная лексикографическая задача является обобщением максимизации $f_0(u)$ при заданных ограничениях и при отсутствии сведений об их совместности.

Так, при разработке радиационно-защитных материалов [11] использовались полученные методами математического планирования эксперимента для указанных материалов зависимости пористости q_1 , %, и прочности на сжатие q_2 , МПа, от объемных долей $x_1 \in [0,5; 0,6]$, $x_2 \in [0,35; 0,4]$ заполнителя и наполнителя:

$$\begin{aligned} q_1(x_1, x_2) &= 196,9 - 1217x_1 + 623,6x_2 - 1064x_1x_2 + 1532x_1^2, \\ q_2(x_1, x_2) &= -305,3 + 1188x_1 + 57,20x_2 - 1148x_1^2. \end{aligned}$$

В качестве $f_0(u)$ рассматривалась *пористость* $q_1(x_1, x_2)$; в качестве ограничений – ограничения соответственно на $q_2(x_1, x_2)$ (*прочность на сжатие*) и на *плотность* $q_3(x_1, x_2)$; в последующем оказалось возможным исключить из рассмотрения $q_3(x_1, x_2)$.

В материаловедении, как и в теории управления, используются различные критерии оптимальности (по времени переходного процесса, по быстродействию и т.д.). Особый интерес представляет квадратичный критерий качества, частным случаем которого является критерий вида

$$I = \int_0^T \mathbf{Y}^T(t) \mathbf{Y}(t) dt.$$

Оптимальная по этому критерию система обеспечивает перевод объекта из начального в конечное состояние на промежутке $[0, T]$ при минимуме значения I . Для скалярной системы последний критерий имеет вид

$$I = \int_0^T y^2(t) dt,$$

а рассматриваемая при этом оптимальная система будет системой с минимальной энергией управления.

Выводы

Разработаны пути внедрения новых современных системных методологий с позиций идентификации систем и решения задач управления для синтеза материалов.

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. – 2021. – № 2 (47). – С. 22–28.
2. Будылина, Е.А. Концептуальные подходы к системному проектированию композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 41–45.
3. Гарькина, И.А. Управление в сложных технических системах: методологические принципы проектирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 39–42.
4. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – С. 012006.
5. Травуш, В.И. Демпфирующие свойства цементных композитов / В.И. Травуш, В.Т. Ерофеев, В.Д. Черкасов, Д.В. Емельянов, И.В. Ерофеева // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 5. – С.34–39.
6. Smirnov, V. Modeling the colloidal dispersions: flocculation kinetics through particle dynamics / V. Smirnov, E. Korolev // XXII International Scientific Conference «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019). Electronic edition. «E3S Web of Conferences». – 2019. – P. 02033.
7. Смирнов, В.А. Стохастическое моделирование наноразмерных систем / В.А. Смирнов, Е.В. Королев, С.С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 6–14.
8. Селяев, В.П. Нелинейные модели деградации полимерных композитов, работающих в агрессивных средах / В.П. Селяев, С.Ю. Грязнов, Д.Р. Бабушкина // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2 (47). – С. 5–15.
9. Селяев, В.П. Фрактальная модель прочности бетона с учетом масштабного эффекта структуры / В.П. Селяев, П.В. Селяев, А.О. Горенков, Е.С. Безрукова, Е.Л. Кечуткина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3 (44). – С. 31–38.
10. Скачков, Ю.П. Модификация метода ПАТТЕРН к решению архитектурно-строительных задач / Ю.П. Скачков, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 4–9.
11. Альбакасов, А.И. Оптимизация систем со сложной иерархией / А.И. Альбакасов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 324–327.

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. – 2021. – № 2 (47). – P. 22–28.
2. Budylna, E.A. Conceptual approaches to system design of composite materials / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №1 (46). – P. 41–45.
3. Garkina, I.A. Control in complex technical systems: methodological design principles / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2012. – №1. – P. 39–42.
4. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – С. 012006.

5. Travush, V.I. Damping properties of cement composites / V.I. Travush, V.T. Erofeev, V.D. Cherkasov, D.V. Emelyanov, I.V. Erofeeva // *Industrial and civil construction*. – 2018. – № 5. – P.34–39.
6. Smirnov, V. Modeling the colloidal dispersions: flocculation kinetics through particle dynamics / V. Smirnov, E. Korolev // XXII International Scientific Conference «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019). Electronic edition. «E3S Web of Conferences». – 2019. – P. 02033.
7. Smirnov, V.A. Stochastic modeling of nanoscale systems / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, S.S. Inozemtsev // *Nanotechnologies in construction: scientific online journal*. – 2012. – Vol.4, № 1. – P. 6–14.
8. Selyaev, V.P. Nonlinear degradation models for polymer composites operating in aggressive environments / V.P. Selyaev, S.Yu. Gryaznov, D.R. Babushkina // *Regional architecture and engineering*. – 2021. – №2 (47). – P. 5–15.
9. Selyaev, V.P. Fractal strength model of concrete considering the scale effect of the structure / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, A.O. Gorenkov, E.S. Bezrukova, E.L. Kechutkina // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – № 3 (44). – P. 31–38.
10. Skachkov, Yu.P. Modification of the PATTERN method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2011. – № 1. – P. 4–9.
11. Albakasov, A.I. Optimization of systems with a complex hierarchy / A.I. Albakasov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // *Bulletin of civil engineers*. – 2012. – № 2 (31). – P. 324–327.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2022_2_45

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

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

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

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

Ariskin Maxim Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building Structures»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

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

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

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ НА МОНОЛИТНОСТЬ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

М.В. Арискин, В.И. Логанина, М.А. Светалкина

Приведены сведения о напряженном состоянии лакокрасочных покрытий при дискретном состоянии контактной зоны с подложкой. Исследование напряженного состояния покрытий проведено от действия температуры как одного из факторов старения. Рассмотрены климатические условия Москвы, Тюмени. Установлено, что наибольшая величина напряжений наблюдается в зоне контакта в центре покрытия над порой, не заполненной красочным составом. Рассмотрено влияние толщины покрытий на напряженное состояние.

Ключевые слова: покрытия, напряжения, температура, контактная зона

THE INFLUENCE OF CEMENT CONCRETE POROSITY ON THE SOLIDITY OF PAINT COATINGS

M.V. Ariskin, V.I. Loganina, M.A. Svetalkina

Some information about the stress state of paint coatings at discrete state of the contact zone with the substrate is given. The studies of the stress state of coatings is carried out from the action of temperature as one of the factors of aging. The climatic conditions of Moscow and Tyumen are considered. It is established that the highest stress value is observed in the contact zone in the center of the coating over a pore that is not filled with a paint composition. The influence of the coating thickness on the stress state is considered.

Keywords: coatings, stresses, temperature, contact zone

Известно, что контакт защитно-декоративного покрытия с цементной подложкой является дискретным. В зоне контакта «покрытие – подложка» имеются поры, не заполненные красочным составом в процессе окрашивания, что, несомненно, оказывает влияние на напряженное состояние покрытия и его эксплуатационную стойкость [1–6].

Для изучения напряженного состояния покрытий нами рассмотрен случай покрытия, нанесенного на бетон и скрепленного с ним силами сцепления. Слой покрытия

находится в условиях плоского напряженного состояния [7–11]. Схема расчетной модели покрытия, принятой в работе, представлена на рис. 1.

В качестве подложек рассматривался тяжелый бетон, характеризующийся значением коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР), равным $10,0 \cdot 10^{-6}$ 1/град. В качестве красочного состава применяли полимеризованную краску. Значение КЛТР покрытия составляло $8,3 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

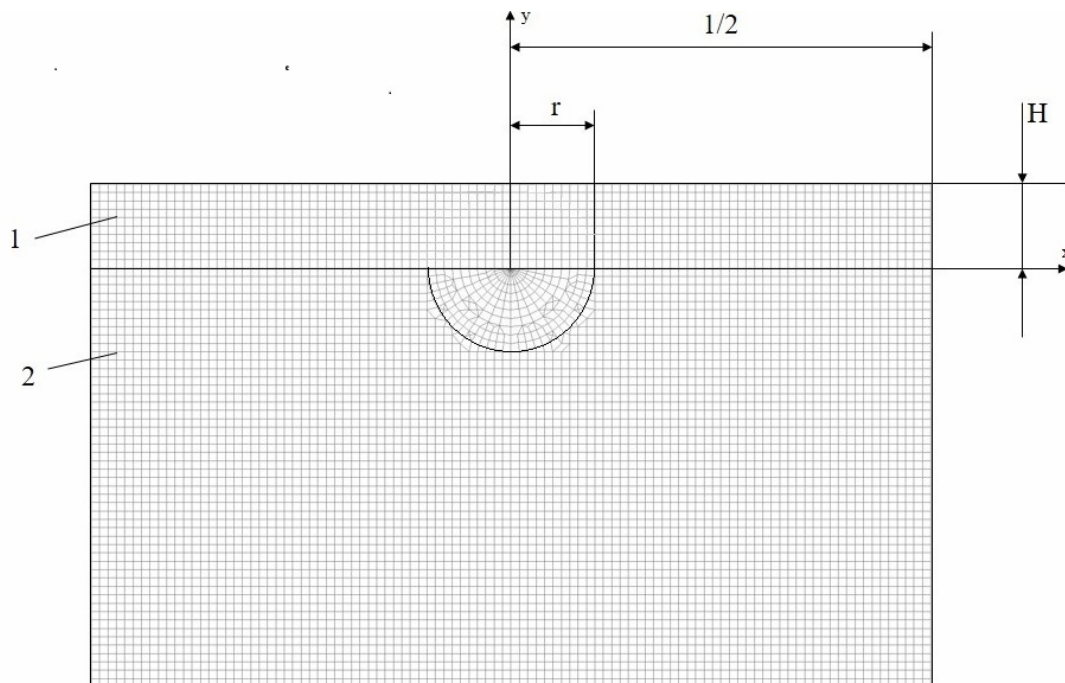


Рис. 1. Схема расчетной модели покрытия:
1 – покрытие; 2 – подложка

Для оценки трещиностойкости отделочного слоя в работе исследовалось напряженное состояние покрытий от действия температуры как одного из факторов старения. Расчеты выполнялись для условий Москвы и Тюмени с помощью программного модуля SCAD Office. Исследования проводились по нескольким схемам, а именно: тип схемы *a* – толщина отделочного слоя 1 мм, пора заполнена; тип схемы *b* – толщина отделочного слоя 0,6 мм, пора заполнена; *c* – толщина отделочного слоя 1 мм, пора не заполнена; *d* – толщина отделочного слоя 0,6 мм, пора не заполнена (рис. 2). Для каждой модели были выполнены расчеты и получены напряженно-деформируемые схемы, по которым проводился анализ, причем для каждого образца намечено по 9 схем, в которых более подробно рассматривались напряжения.

Результаты расчета приведены в табл.1-2 и на рис.3-7.

В течение года покрытия воспринимают растягивающие и сжимающие напряжения. Данные, приведенные в табл.1-2 и на рис.3-7, свидетельствуют о том, что максимальные сдвигающие напряжения возникают по оси *x*. Наибольшая величина напряжений наблюдается в зоне контакта в центре покрытия над порой, заполненной красочным составом. Для условий г.Москвы в октябре месяце они составляют $\sigma_x = 61,74 \cdot 10^{-3}$ МПа при толщине покрытия 1 мм, для условий г.Тюмени в ноябре месяце – $91,47 \cdot 10^{-3}$ МПа (табл. 1). Следует отметить неоднородность напряженного состояния покрытия. Так, в октябре месяце для условий г.Москвы в центре поры, заполненной красочным составом, в зоне контакта покрытия с подложкой (в глубине поры) растягивающие напряжения составляют $\sigma_x = 61,74 \cdot 10^{-3}$ МПа, а на краю поры – $-22,18 \cdot 10^{-3}$ МПа, т.е. сжимающие напряжения. Аналогичные закономерности характерны и для условий эксплуатации в г.Тюмени.

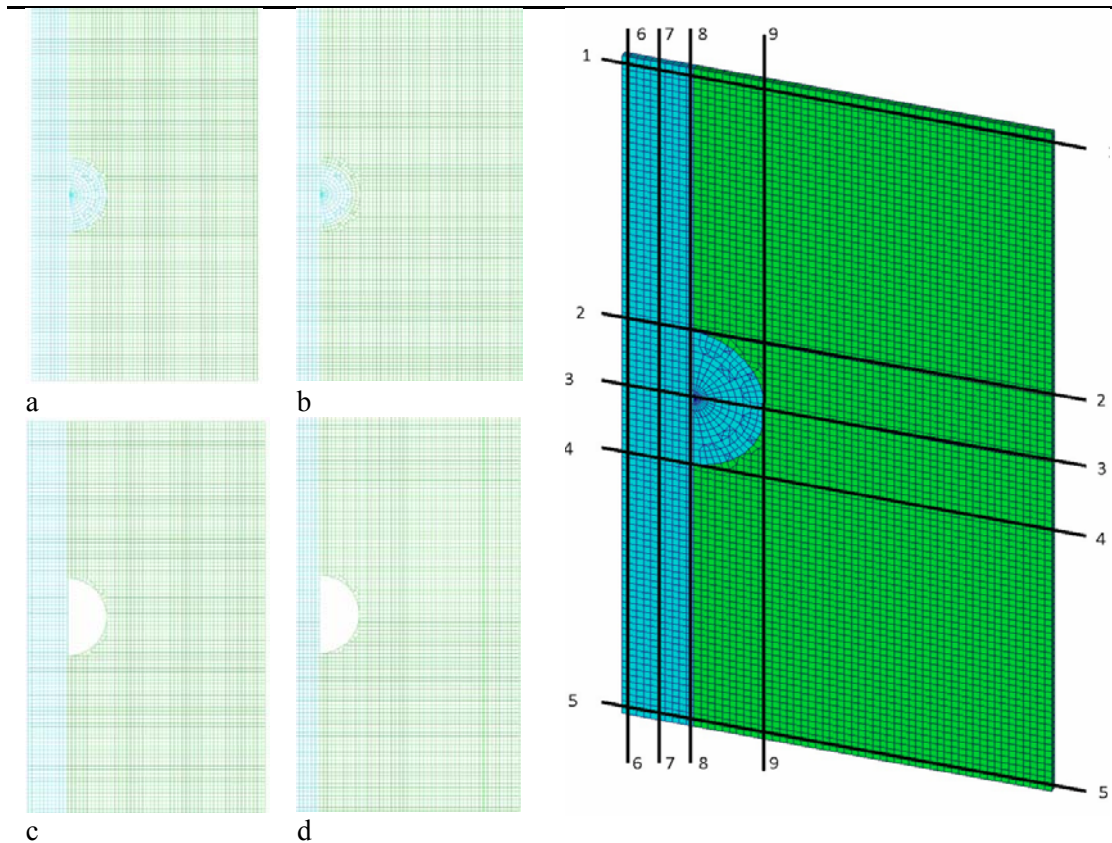


Рис. 2. Схемы расчета напряженного состояния покрытий

Т а б л и ц а 1

Максимальные напряжения σ_x в покрытии
(г.Москва, толщина покрытия 1 мм, радиус пор 1 мм)

Месяц	Напряжения σ_x в заполненной поре, МПа			Напряжения σ_x в пустой поре, МПа		
	Край поры (напряжения в зоне контакта покрытия с подложкой)	Край поры (напряжения в покрытии на поверхности)	Центр поры (в зоне контакта покрытия с подложкой)	Край поры (напряжения в зоне контакта покрытия с подложкой)	Край поры (напряжения в покрытии на поверхности)	Центр поры (напряжения на поверхности покрытия)
Июль	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$-3,17 \cdot 10^{-3}$	$-21,07 \cdot 10^{-3}$	$0,81 \cdot 10^{-3}$	$-3,18 \cdot 10^{-3}$	$-8,76 \cdot 10^{-3}$
Август	$-7,7 \cdot 10^{-3}$	$3,04 \cdot 10^{-3}$	$20,26 \cdot 10^{-3}$	$0,81 \cdot 10^{-3}$	$3,05 \cdot 10^{-3}$	$3,58 \cdot 10^{-3}$
Сентябрь	$-20,77 \cdot 10^{-3}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$	$58,54 \cdot 10^{-3}$	$-2,26 \cdot 10^{-3}$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$24,84 \cdot 10^{-3}$
Октябрь	$-22,18 \cdot 10^{-3}$	$9,08 \cdot 10^{-3}$	$61,74 \cdot 10^{-3}$	$-2,57 \cdot 10^{-3}$	$9,24 \cdot 10^{-3}$	$25,55 \cdot 10^{-3}$
Ноябрь	$-22,06 \cdot 10^{-3}$	$3,94 \cdot 10^{-3}$	$60,89 \cdot 10^{-3}$	$-2,77 \cdot 10^{-3}$	$9,08 \cdot 10^{-3}$	$25,18 \cdot 10^{-3}$
Декабрь	$-16,12 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-3}$	$44,73 \cdot 10^{-3}$	$-1,96 \cdot 10^{-3}$	$6,68 \cdot 10^{-3}$	$18,49 \cdot 10^{-3}$
Январь	$-9,42 \cdot 10^{-3}$	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$26,27 \cdot 10^{-3}$	$-1,06 \cdot 10^{-3}$	$3,96 \cdot 10^{-3}$	$10,33 \cdot 10^{-3}$
Февраль	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$-1,35 \cdot 10^{-3}$	$-9,15 \cdot 10^{-3}$	$0,48 \cdot 10^{-3}$	$-1,37 \cdot 10^{-3}$	$-3,8 \cdot 10^{-3}$
Март	$28,42 \cdot 10^{-3}$	$-11,56 \cdot 10^{-3}$	$-79,04 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-3}$	$-11,97 \cdot 10^{-3}$	$-32,74 \cdot 10^{-3}$
Апрель	$25,13 \cdot 10^{-3}$	$-10 \cdot 10^{-3}$	$-68,77 \cdot 10^{-3}$	$2,79 \cdot 10^{-3}$	$-0,25 \cdot 10^{-3}$	$-28,5 \cdot 10^{-3}$
Май	$13,32 \cdot 10^{-3}$	$-5,52 \cdot 10^{-3}$	$-37,34 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$-5,63 \cdot 10^{-3}$	$-15,46 \cdot 10^{-3}$
Июнь	$7,47 \cdot 10^{-3}$	$-3,11 \cdot 10^{-3}$	$-21,23 \cdot 10^{-3}$	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$-3,18 \cdot 10^{-3}$	$-8,75 \cdot 10^{-3}$

Максимальные напряжения σ_x в покрытии
(г.Тюмень, толщина покрытия 1 мм, радиус пор 1 мм)

Месяц	Напряжения в заполненной поре, МПа			Напряжения в пустой поре, МПа		
	Край поры (напряжения в зоне контакта покрытия с подложкой)	Край поры (напряжения в покрытии на поверхности)	Центр поры (напряжения в зоне контакта покрытия с подложкой)	Край поры (напряжения в зоне контакта покрытия с подложкой)	Край поры (напряжения в покрытии на поверх-ности)	Центр поры (напряжения на поверхности покрытия)
Июль	$10,64 \cdot 10^{-3}$	$-4,32 \cdot 10^{-3}$	$-28,37 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$-4,44 \cdot 10^{-3}$	$-12,21 \cdot 10^{-3}$
Август	$-21,49 \cdot 10^{-3}$	$8,76 \cdot 10^{-3}$	$59,94 \cdot 10^{-3}$	$-2,69 \cdot 10^{-3}$	$3,95 \cdot 10^{-3}$	$24,69 \cdot 10^{-3}$
Сентябрь	$-27,19 \cdot 10^{-3}$	$11,21 \cdot 10^{-3}$	$76,04 \cdot 10^{-3}$	$-3,43 \cdot 10^{-3}$	$11,39 \cdot 10^{-3}$	$31,43 \cdot 10^{-3}$
Октябрь	$-2,27 \cdot 10^{-3}$	$13,5 \cdot 10^{-3}$	$90,88 \cdot 10^{-3}$	$-4,24 \cdot 10^{-3}$	$13,73 \cdot 10^{-3}$	$37,7 \cdot 10^{-3}$
Ноябрь	$-3,45 \cdot 10^{-3}$	$9,89 \cdot 10^{-3}$	$91,47 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-3}$	$13,66 \cdot 10^{-3}$	$37,72 \cdot 10^{-3}$
Декабрь	$-0,45 \cdot 10^{-3}$	$4,34 \cdot 10^{-3}$	$66,61 \cdot 10^{-3}$	$-3,08 \cdot 10^{-3}$	$10,13 \cdot 10^{-3}$	$27,71 \cdot 10^{-3}$
Январь	$8,19 \cdot 10^{-3}$	$-3,46 \cdot 10^{-3}$	$29,36 \cdot 10^{-3}$	$-1,41 \cdot 10^{-3}$	$4,44 \cdot 10^{-3}$	$12,22 \cdot 10^{-3}$
Февраль	$34,21 \cdot 10^{-3}$	$-14,41 \cdot 10^{-3}$	$-23,25 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$-3,49 \cdot 10^{-3}$	$-9,62 \cdot 10^{-3}$
Март	$34,21 \cdot 10^{-3}$	$-14,43 \cdot 10^{-3}$	$-97,16 \cdot 10^{-3}$	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$-14,63 \cdot 10^{-3}$	$-40,21 \cdot 10^{-3}$
Апрель	$26,26 \cdot 10^{-3}$	$-10,74 \cdot 10^{-3}$	$-97,16 \cdot 10^{-3}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$-14,63 \cdot 10^{-3}$	$-40,25 \cdot 10^{-3}$
Май	$26,04 \cdot 10^{-3}$	$-10,72 \cdot 10^{-3}$	$-72,59 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$-10,85 \cdot 10^{-3}$	$-30,18 \cdot 10^{-3}$
Июнь	$-19,3 \cdot 10^{-3}$	$-8,11 \cdot 10^{-3}$	$-54,68 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$-8,23 \cdot 10^{-3}$	$-22,6 \cdot 10^{-3}$

При уменьшении толщины покрытия напряжения возрастают (см. рис. 3–7).

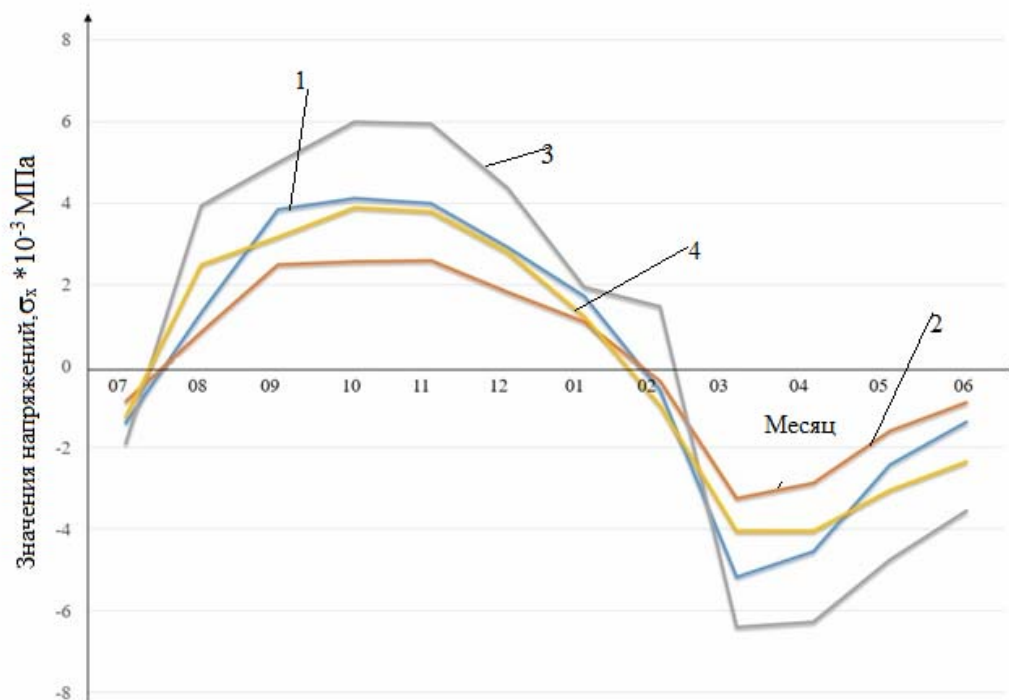


Рис. 3. Значения напряжений в краевой зоне поры на поверхности покрытия $h=0,6$ мм:

- 1 – Москва, заполненная пора; 2 – Москва, пустая пора;
3 – Тюмень, заполненная пора; 4 – Тюмень, пустая пора

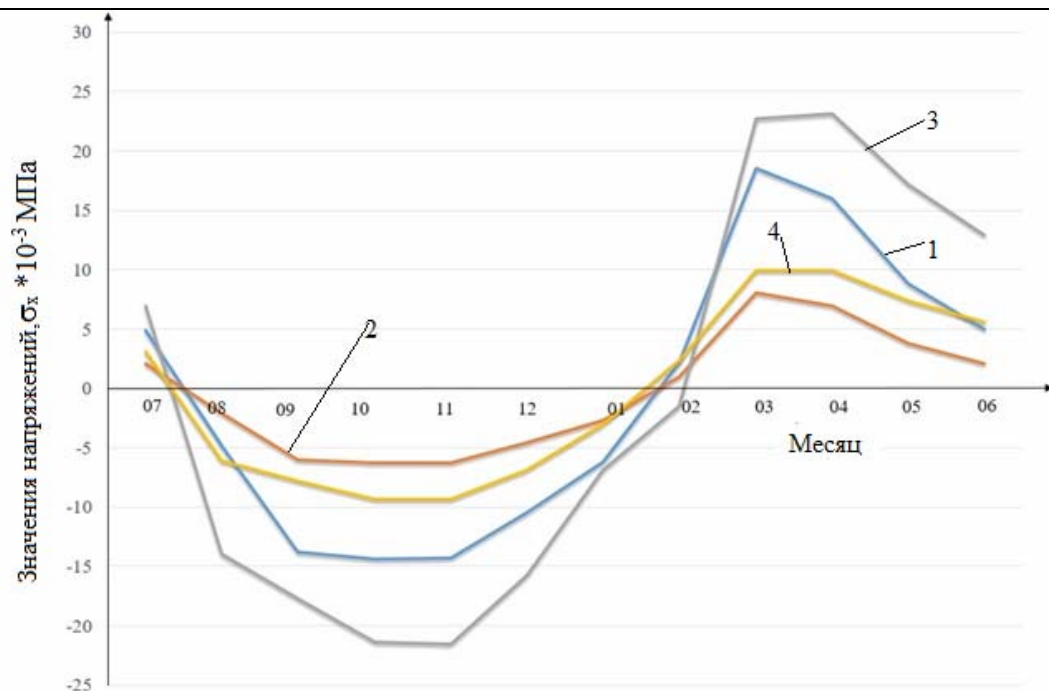


Рис. 4. Значения напряжений в краевой зоне поры в месте контакта покрытия с подложкой, толщина покрытия $h=0,6$ мм:

- 1 – Москва, заполненная пора; 2 – Москва, пустая пора;
3 – Тюмень, заполненная пора; 4 – Тюмень, пустая пора

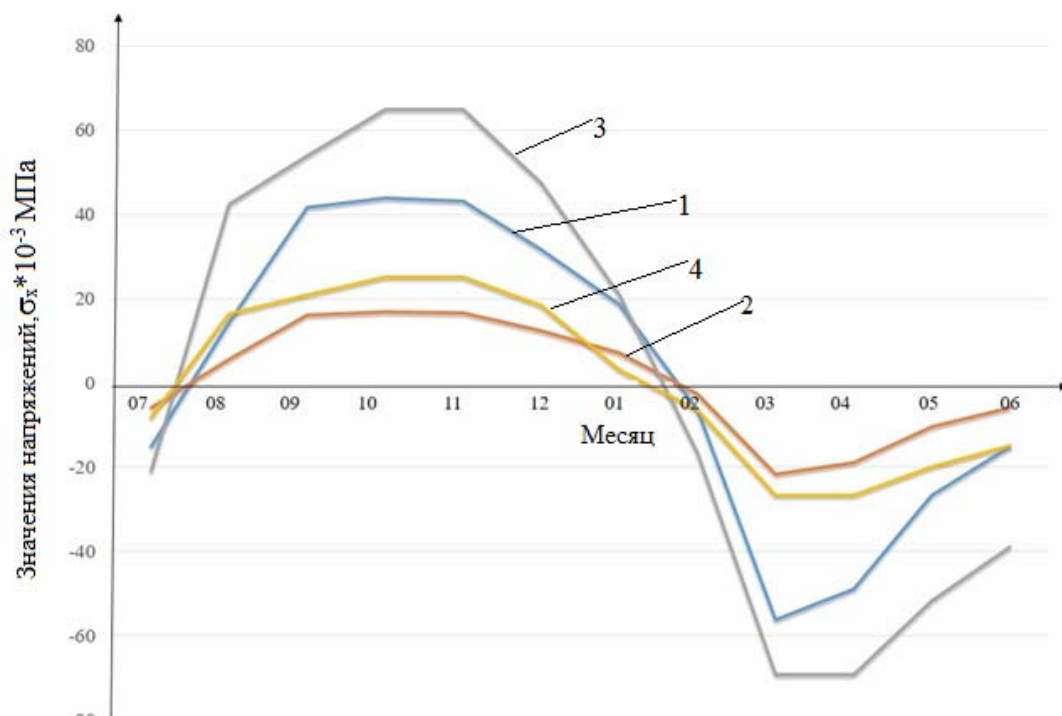
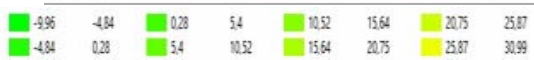
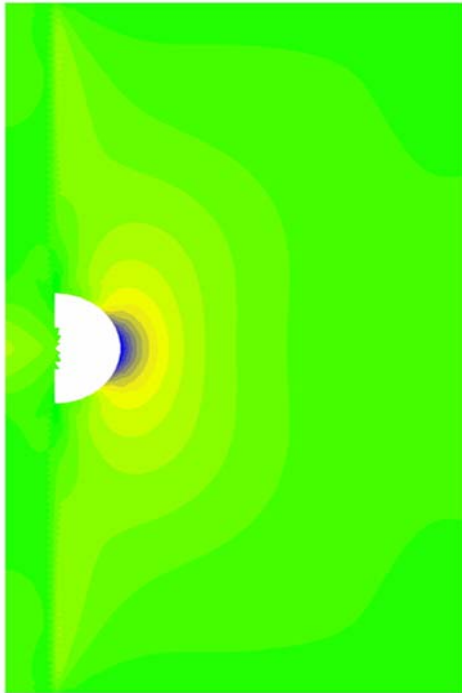


Рис. 5. Значения напряжений в центре поры на поверхности покрытия (т.к. именно там они максимальные), толщина покрытия $h=0,6$ мм:

- 1 – Москва, заполненная пора; 2 – Москва, пустая пора;
3 – Тюмень, заполненная пора; 4 – Тюмень, пустая пора

а



б

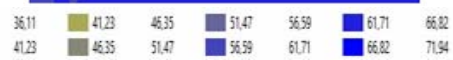
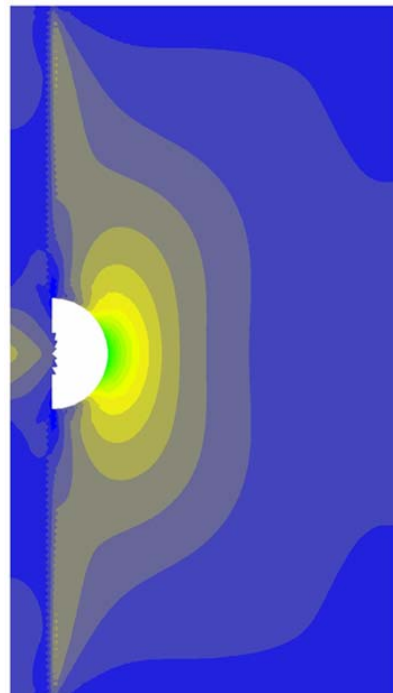
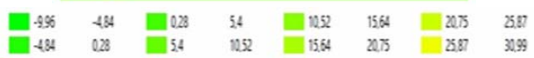
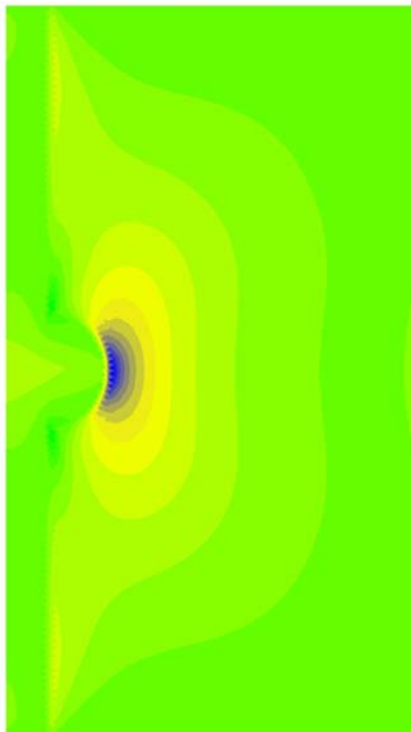


Рис. 6. Распределение напряжений σ_x в полимерцементовом покрытии толщиной 0,6 мм для условий г.Москвы (незаполненная пора):
а – октябрь месяц; б – март месяц

а



б

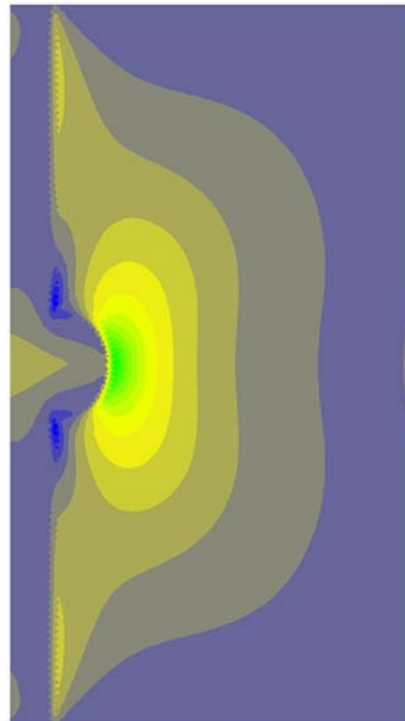


Рис. 7. Распределение напряжений σ_x в полимерцементовом покрытии толщиной 0,6 мм для условий г.Москвы (заполненная пора):
а – октябрь месяц; б – март месяц

Длительная когезионная прочность полимеризвестковых покрытий составляет $R_{\text{длит}}=0,93$ МПа. Растрескивания покрытий в результате действия термических напряжений наблюдаться не будет.

Повышению стойкости покрытий будет способствовать создание оптимальных реологических свойств лакокрасочного материала, обеспечивающих более полный контакт отверждающегося покрытия с цементной подложкой. Следовательно, одним из путей повышения стойкости защитно-декоративных покрытий является создание такой структуры пор на поверхности цементной подложки, которая способствовала бы их более полному заполнению красочным составом.

Список литературы

1. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христоролюбов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2004. – № 8. – С. 10–12.
2. Zubov, P.I. Структура и свойства полимерных покрытий / П.И. Zubov, Л.А. Сухарева. – М., 1982.
3. Сухарева, Л.А. Долговечность полимерных покрытий / Л.А. Сухарева. – М.: Химия, 1984. – 240 с.
4. Loganina, V.I. The influence of surface quality of coatings on their deformation properties / V.I. Loganina // Contemporary Engineering Sciences. – 2014. – Vol. 7, № 33–36. – P. 1935–1941.
5. Логанина, В.И. Повышение качества лакокрасочных покрытий строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина, Л.П. Орентлихер. – М.: АСВ, 2007.
6. Loganina, V.I. Evaluation of the destruction of the coating depending on its thickness / V.I. Loganina, Ju.P. Skachkov, O.V. Tarakanov, Yu.G. Ivashchenko // Research Journal of Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 9. – P. 891–893.
7. Логанина, В.И. Оценка напряженного состояния отделочного слоя на основе состава с применением синтезированных алюмосиликатов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, М.В. Арискин, З.Н. Родионова, М.А. Садовникова // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – № 2. – С. 77–79.
8. Логанина, В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния лакокрасочного покрытия в зависимости от качества его внешнего вида / В.И. Логанина, И.В. Волков, В.В. Голубев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2008. – № 7 (595). – С. 26–30.
9. Loganina, V.I. Assessment of the Stress State of the Coating in Depending on the Porosity of the Cement Substrate / V.I. Loganina, Ju.P. Skachkov // Key Engineering Materials. Volume: Engineering Materials and Technology. – 2017. – №737. – P.179–183.
10. Бабков, В.В. Работа штукатурных покрытий в составе современных теплоэффективных наружных стен зданий / В.В. Бабков, Д.А. Сеницын, А.Е. Чуйкин, Р.С. Кильдибаев, О.А. Реззов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №8. – С.22–29.
11. Горчаков, Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков, Л.П. Орентлихер, В.И. Савин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 144 с.

References

1. Loganina, V.I. Evaluation of the decorative properties of paint and varnish coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislicyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paints and varnishes and their application. – 2004. – No. 8. – P. 10–12.
2. Sukhareva, L.A. Durability of polymer coatings / L.A. Sukhareva. – M.: Khimiya, 1984. – 240 p.
3. Zubov, P.I. Structure and properties of polymer pokrytiy / P.I. Zubov, L.A. Suhareva. – M.: Chemistry, 1982. – 256 p.

4. Loganina, V.I. The influence of surface quality of coatings on their deformation properties / V.I. Loganina // Contemporary Engineering Sciences. – 2014. – Vol. 7, № 33–36. – P. 1935–1941.
5. Loganina, V.I. Improving the quality of paint and varnish coatings for building products and structures / V.I. Loganina, L.P. Orentlicher. – M.: ACV, 2007.
6. Loganina, V.I. Evaluation of the destruction of the coating depending on its thickness / V.I. Loganina, Ju.P. Skachkov, O.V. Tarakanov, Yu.G. Ivashchenko // Research Journal of Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 9. – P. 891–893.
7. Loganina, V.I. Assessment of the stress state of the finishing layer based on the composition with the use of synthesized aluminosilicates / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, M.V. Ariskin, Z.N. Rodionova, M.A. Sadovnikova // Academic Bulletin UralNIIproekt RAASN. – 2014. – No. 2. – P. 77–79.
8. Loganina, V.I. Evaluation of the stress-strain state of the paintwork depending on the quality of its appearance / V.I. Loganina, I.V. Volkov, V.V. Golubev // News of higher educational institutions. Construction. – 2008. – No. 7 (595). – P. 26–30.
9. Loganina, V.I. Assessment of the Stress State of the Coating in Depending on the Porosity of the Cement Substrate / V.I. Loganina, Ju.P. Skachkov // Key Engineering Materials. Volume: Engineering Materials and Technology. – 2017. – №737. – P.179–183.
10. Babkov, V.V. The work of plaster coatings in the composition of modern heat-efficient external walls of buildings / V.V. Babkov, Yu.S. Sinitsyn, A.E. Chuikin, R.S. Kildibaev, O.A. Rezvov // Engineering and construction journal. – 2012. – №8. – P.22–29
11. Gorchakov, G.I. Composition, structure and properties of cement concretes / G.I. Gorchakov, L.P. Orentlicher, V.I. Savin [etc.]. – M.: Stroyizdat, 1976. – 144 p.

УДК 666.942

DOI 10.54734/20722958_2022_2_53

Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова,
д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова

Рахимбаев Шарк Матросулович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: hahaleva7@mail.ru

Толыпина Наталья Максимовна,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: tolypina.n@yandex.ru

Аниканова Татьяна Викторовна,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Архитектурные конструкции»
E-mail: anik.tv@yandex.ru

Хахалева Елена Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: hahaleva7@mail.ru

Belgorod State Technological University
named after V.G.Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, st.Kostyukova, 46,
BSTU named after V.G.Shukhov

Rakhimbayev Shark Matrosulovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Construction Materials Science,
Products and Structures»
E-mail: hahaleva@intbel.ru

Tolypina Natalia Maksimovna,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Construction Materials Science,
Products and Structures»
E-mail: tolypina.n@yandex.ru

Anikanova Tatiana Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Architectural Structures»
E-mail: anik.tv@yandex.ru

Khakhaleva Elena Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Construction Materials
Science, Products and Structures»
E-mail: hahaleva@intbel.ru

К ВОПРОСУ ОБ АНОМАЛЬНОМ СХВАТЫВАНИИ И ТВЕРДЕНИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Ш.М. Рахимбаев, Н.М. Толыпина, Т.В. Аниканова, Е.Н. Хахалева

Предложено считать ложное схватывание частным случаем от аномального. Рассмотрена кинетика структурообразования цементов с разным характером схватывания. Изложены методы идентификации аномального схватывания по величине интервала схватывания $(\tau_{final} - \tau_{start})/\tau_{start} > 3$, кинетике структурообразования, тепловыделения и изменения активности ионов кальция в жидкой фазе цементного теста нормальной густоты.

Ключевые слова: цементное тесто, аномальное схватывание, кинетика тепловыделения

ON THE QUESTION OF ABNORMAL SETTING AND HARDENING OF PORTLAND CEMENT

Sh.M. Rakhimbayev, N.M. Tolypina, T.V. Anikanova, E.N. Khakhaleva

It is proposed to consider false setting as a special case of an abnormal one. The kinetics of the structure formation of cements with different character of setting is considered. Methods of identification of abnormal setting by the size of the setting interval $(\tau_{final} - \tau_{start})/\tau_{start} > 3$, the characteristics of structure formation, heat release and changes in the activity of calcium ions in the liquid phase of cement dough of normal density are proposed.

Keywords: cement dough, abnormal setting, heat release kinetics

Ложное, или – в более общем смысле – аномальное схватывание, известно давно [1-4], но исследовано оно до последнего времени недостаточно. Это объясняется тем, что в последние два-три десятилетия благодаря совершенствованию технологии производства портландцемента, особенно системы дозировки гипса при измельчении,

а также замкнутой схеме помола клинкера аномальное схватывание стало встречаться реже, чем в XX веке [5-7]. В публикациях последнего времени, посвященных срокам схватывания цементных систем, аномальное схватывание не упоминается [8-12], за редким исключением [13-16]. Но, к сожалению, это явление встречается и в XXI веке; поэтому снижение интереса к этой проблеме вряд ли оправданно. Ложное, или аномальное, схватывание, вызывая преждевременное загустевание бетонных смесей, нарушает технологию их укладки. Значительно хуже то, что бетонные изделия, изготовленные на цементе с аномальным схватыванием, обычно имеют внутренние напряжения, поэтому недостаточно ударо- и трещиностойки [4]. В связи с этим данная проблема требует дополнительных исследований.

Для определения сроков схватывания использовали цементы Невьянского и Белгородского цементных заводов. Сроки схватывания устанавливали с помощью прибора Вика. При испытании одной из партий высокоалюминатного цемента с добавкой 0,3 % декстрина авторам удалось наблюдать очень интересное и редкое явление, когда начало схватывания теста с В/Ц = 0,5 при температуре 75 °С наступило через 15 минут, но через 30 минут оно самопроизвольно исчезло, затем было зафиксировано иглой Вика через 40 минут. В течение 6 часов наблюдения это повторялось три раза. Конец схватывания при этом так и не наступил. Через 1 сутки после приготовления тесто превратилось в цементный камень. Декстрин, который в этой дозировке должен был замедлить начало схватывания до 3-5 часов, выступил как ускоритель начала (но не конца) схватывания. Таким образом, у этого цемента нет определенного (одного) времени начала схватывания, так как оно периодически исчезает. Такое явление встречается редко, но оно существует. Его авторы предлагают называть ложным схватыванием и относить к крайнему случаю аномального.

За последние десятилетия предложено несколько способов идентификаций аномального схватывания. По методике НИИ Цемента, если цементное тесто в процессе приготовления сильно загустевает, а при последующем перемешивании вновь разжижается, то такому цементу присуще ложное схватывание. Методика позволяет выявлять ложное схватывание, но случаи слабовыраженной аномальности можно пропустить. Эта методика носит лишь качественный характер и не лишена субъективности.

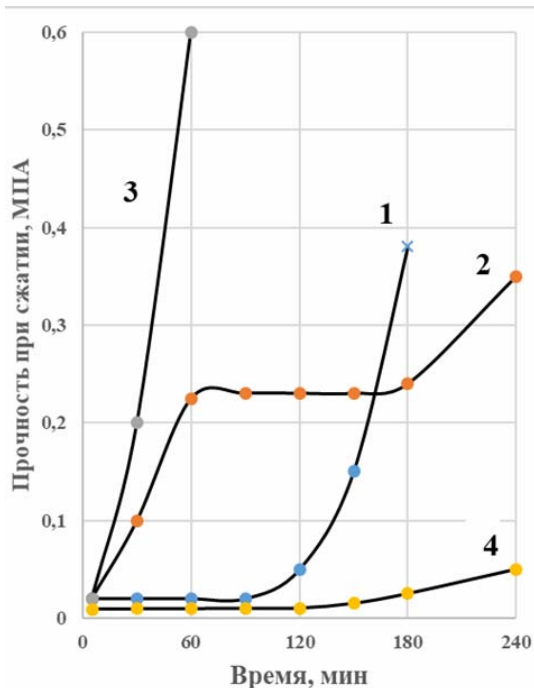


Рис. 1. Кинетика структурообразования цемента с разным характером схватывания: 1 – нормальное; 2 – аномальное; 3 – быстрое; 4 – замедленное

Можно выявить наличие аномального схватывания по кинетике структурообразования цементного теста, если использовать метод пенетрации. При этом мерой структурной прочности цементного теста служит величина, обратная глубине проникновения в цементное тесто индентора обычно конической формы. На рис. 1 показаны виды кривых кинетики структурообразования цемента с разным характером схватывания.

Как видно из рис. 1, цементы с нормальными свойствами имеют индукционный период длительностью 45-100 минут и более, во время которого структурная прочность цементного теста находится на грани чувствительности установки. По окончании индукционного периода структурная прочность цементной системы резко растет по экспоненциальному закону.

Быстротсхватывающиеся цементные системы (с добавкой повышенных дозировок ускорителей схватывания) имеют очень короткий индукционный период,

равный нескольким минутам, по окончании которого структурная прочность резко возрастает. У цементов с аномальным схватыванием начальный участок кривой кинетики структурообразования схож с быстросхватывающимися смесями, рост структурной прочности прекращается и либо стабилизируется на низком уровне, либо падает.

Метод пенетрации является очень информативным, но требует специального оборудования. Кроме того, при пенетрации вносятся искажения в процесс структурообразования, что особенно важно при аномальном схватывании.

В связи с изложенным, первым автором данной работы предложена количественная методика оценки степени аномальности схватывания цементного теста с применением стандартного прибора Вика, которая вообще не требует каких-либо дополнительных действий, кроме общепринятых определений времени начала (τ_{start}) и конца (τ_{final}) схватывания. По предложенной методике на основе измерения τ_{start} и τ_{final} рассчитывается относительная величина интервала схватывания K_{si} :

$$K_{si} = \frac{\tau_{final} - \tau_{start}}{\tau_{start}}.$$

У нормальных и быстросхватывающихся цементов этот интервал обычно не превышает 2-3. Если этот интервал больше 3, то мы предлагаем относить такой цемент к числу аномальных по срокам схватывания.

Закономерности влияния времени начала схватывания на K_{si} представлены на рис. 2, на котором отражены результаты многочисленных экспериментальных данных, полученных с использованием в основном цементов Белгородского цементного завода и отдельных проб продукции 12 других предприятий.

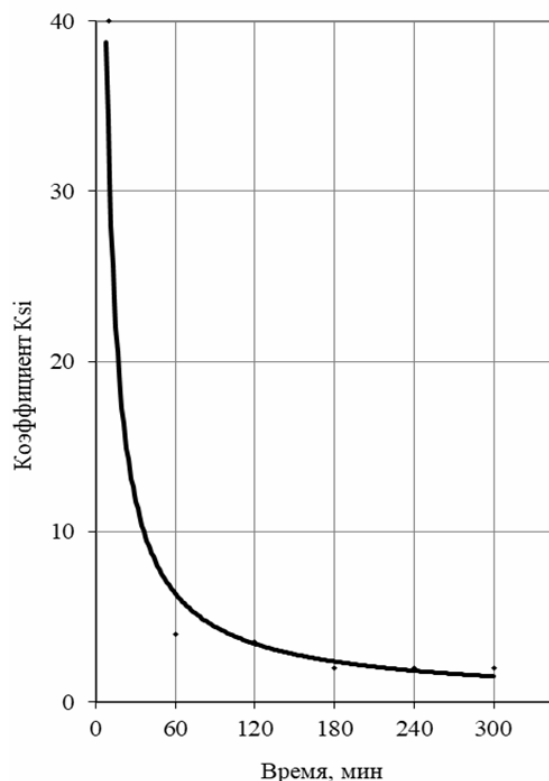


Рис. 2. Зависимость коэффициент интервала схватывания от времени начала схватывания

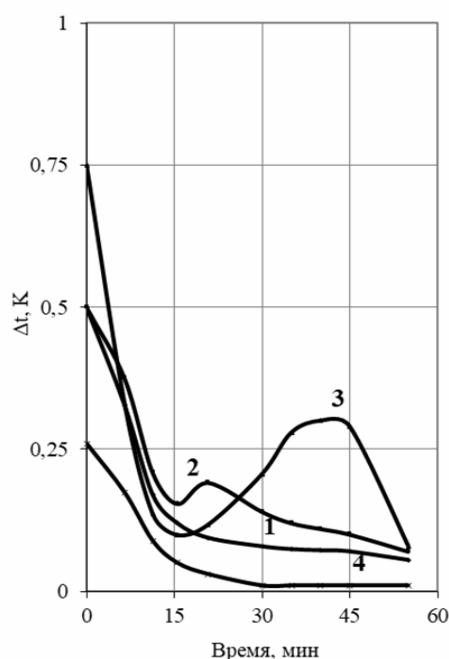
Из графика следует, что если время начала схватывания больше 50-60 минут, то интервал схватывания мало зависит от последнего. Однако из этого правила есть исключения. Иногда начало схватывания может наступить через 70-80 минут, а конец — через 8-10 часов. Такой цемент вряд ли удобен для работников строительной индустрии. В связи с этим неоправданно то, что, по ГОСТ 31108-2016 «Цементы обще-

строительные. Технические условия», в Евростандарте (DIN EN 197-1-2000 Cement) и в других нормативных требованиях к цементу время конца схватывания исключено.

Изложенные выше методы идентификации аномального схватывания позволяют достаточно надежно выявлять дефектные цементы. Наиболее простым и надежным количественным методом является метод, основанный на определении относительного интервала схватывания с использованием прибора Вика. Однако он трудно поддается автоматизации и цифровизации. В этой связи представляют интерес экспериментальные исследования по выявлению особенностей кинетики тепловыделения и изменения активности ионов Ca^{2+} в жидкой фазе цементного теста с различным характером схватывания (рис. 3) [17].

Анализ приведенных экспериментальных данных показывает, что большой интерес для разработки автоматизированного и быстрого контроля наличия аномалий при схватывании представляет измерение кинетики тепловыделения и активности ионов Ca^{2+} в жидкой фазе цементного теста.

а



б

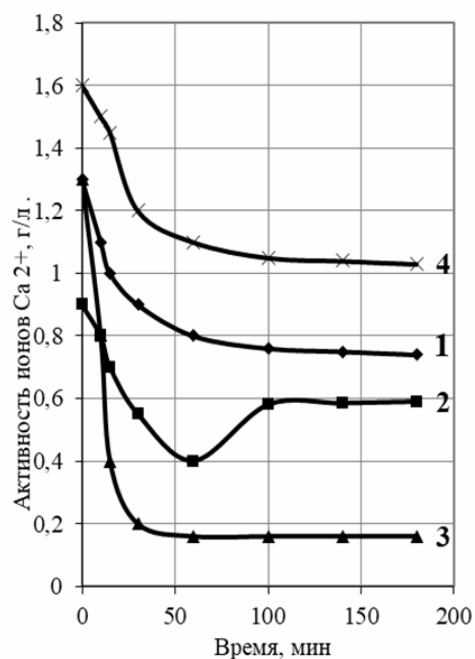


Рис. 3. Кинетика тепловыделения (а) и изменения активности ионов Ca^{2+} в жидкой фазе цементного теста (б) с различным характером схватывания:

1 – нормальное; 2 – аномальное; 3 – быстрое; 4 – замедленное

Сопоставление приведенных экспериментальных данных (см. рис. 1 и 3) свидетельствует о том, что по характеру кинетики структурообразования, тепловыделения и кинетики изменения содержания ионов Ca^{2+} в жидкой фазе цементного теста цементы с аномальным схватыванием занимают промежуточное положение между нормальными и быстросхватывающимися цементами (с добавкой 1 % Na_2CO_3). При этом начальный участок кривых кинетики процессов тепловыделения и изменения активности ионов Ca^{2+} , а также кинетики структурообразования у цементов с аномальным схватыванием схож с быстросхватывающейся смесью, а конечный – с нормальным цементом. Это согласуется с тем, что при малых дозировках ускорителей схватывания (0,2-0,3 % Na_2CO_3 , NaOH и др.) нормальный цемент проявляет аномальные свойства, а при увеличении дозировки этих реагентов до 1-2 % наступает быстрое схватывание.

Еще одним методом идентификации аномального схватывания могло бы быть измерение электродного потенциала, который появляется у металлической пластины, опущенной в цементное тесто нормальной густоты [18, 19]. Однако этот метод дает недостаточно стабильные результаты и чрезмерно метеочувствителен.

Таким образом, цементное тесто с аномальными свойствами является системой с недостаточно ускоренным схватыванием.

Механизм и причины аномального схватывания требуют дополнительных исследований. Считается, что одной из главных и частых причин аномального схватывания является нагрев цемента до 100-120 °С [1]. При этом гипс, добавляемый в цемент при помоле, частично обезвоживается и превращается в полуводный сульфат кальция. Последний отличается очень короткими сроками схватывания (начало от 4 минут). Поскольку содержание гипса невелико (5-8 % от массы цемента), прочность структуры цементного теста может достигать величины, соответствующей началу схватывания системы. Возможно, что вклад в структурную прочность цементного теста вносят также электроповерхностные явления, обусловленные процессами коагуляции положительно заряженных гидроалюминатных фаз и отрицательно заряженных частиц гипса, образующихся при гидратации $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ и поэтому имеющих очень высокую удельную поверхность, особенно в первые 10-15 минут.

Покрывание частиц алюминатных фаз пленкой гипса придает их поверхности отрицательный заряд, что затрудняет диффузию ионов кальция в жидкую фазу и тормозит гидратацию безводных частиц. Еще большее тормозящее действие на гидратацию клинкерных минералов оказывает повышенная растворимость гипса (2 г/л CaO против 1.15-1.2 г/л у $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и особенно $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$). Таков механизм действия малых количеств $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$. Уместно отметить, что при дозировке этого соединения, равной 10-20 %, наступает быстрое нормальное схватывание с короткими сроками и начала, и конца схватывания с коэффициентом интервала схватывания $K_{si} < 2-3$.

Очень неприятным видом схватывания является скрытая, или отложенная, аномалия, впервые описанная Калоузеком [2], когда при испытании на заводе-производителе цемент имеет нормальное схватывание, а через 1-2 недели и позже преобладает аномальное схватывание. В связи с этим при бетонировании особо ответственных объектов каждая партия цемента перед затворением водой должна подвергаться проверке на аномальность. Механизм этого явления не описан. Возможно, что его причиной является переход гипса, добавленного при помоле, в полуводный сульфат кальция в результате взаимодействия его со свободной известью, содержащейся в цементе, либо с такими активными фазами, как трехкальциевый алюминат (C_3A) и др.

Анализ приведенных выше экспериментальных данных дает основания для предположения, что у аномальных цементов есть фактор, вызывающий быстрое начало схватывания, но его недостаточно для ускорения конца схватывания. Отсюда следует, что ввод малых количеств замедлителя схватывания удлиняет время начала, почти не затрагивая время конца схватывания. Нами установлено, что смеси замедлителя и ускорителя схватывания действуют по правилу аддитивности, что облегчает их подбор.

Ввод минеральных добавок кислого состава (молотый кварц, зола-унос ТЭС, кислый шлак, глины в тампонажных смесях и т.п.) ослабляет аномальные свойства цементных систем. Так же, но слабее действует мелкий заполнитель из кварцевого песка.

Для борьбы с запоздалой (скрытой) аномалией необходимо контролировать свойства цемента за 1-2 дня до его применения. Это особенно важно для стран с влажным и жарким климатом.

Водорастворимые фосфаты являются значительно более сильными замедлителями схватывания цементных систем, чем сульфаты, их использование в качестве добавки вместо гипса в виде фосфогипса в большинстве случаев способно предотвратить аномальное схватывание.

Проявление аномального загустевания и схватывания нарушает технологический процесс изготовления изделий и конструкций [20]. Еще более нежелательные последствия имеет свойство цемента с аномальным схватыванием проявлять задержки при твердении и даже сбросы прочности в сроки твердения 7-14 суток [21].

Для предотвращения появления партий цемента с аномальным схватыванием необходимо прежде всего совершенствовать технологию и оборудование на цементных

заводах, обеспечить точность дозировки гипса, так как при его недостатке аномальное схватывание обеспечено. Важно при помоле не допускать перегрева цемента благодаря хорошей аспирации мельниц.

В данной работе изложены основные, наиболее часто встречающиеся случаи аномального схватывания. Известен ряд других факторов, которые менее исследованы. Большую роль при этом играет состояние алюминатной и алюмоферритной фазы портландцемента. Наибольшую опасность с точки зрения аномального схватывания представляет клинкер, в котором алюминатная фаза находится в виде C_3A , а не входит в состав стекловидного алюмоферрита. Значительную роль играет также высокое содержание щелочей, особенно если они представлены ионами Na^+ , а не K^+ .

При аномальном схватывании часто нарушается кинетика твердения цементного камня. Чаще всего это выражается в задержке роста прочности в возрасте 3-14 сут или даже сбросе прочности в этот интервал времени. Возможен также сброс прочности в отдаленные сроки твердения (28 сут-6 мес.). На рис. 4 приведены примеры таких аномалий. Но наибольший ущерб качеству бетонных изделий из цементов с аномальным схватыванием наносится в процессе их изготовления. Если бетонная смесь из-за преждевременного загустевания теряет удобоукладываемость, рабочие зачастую добавляют в нее воду до восстановления подвижности, что в последующем приводит к недобору прочности бетона и ухудшению других эксплуатационных характеристик.

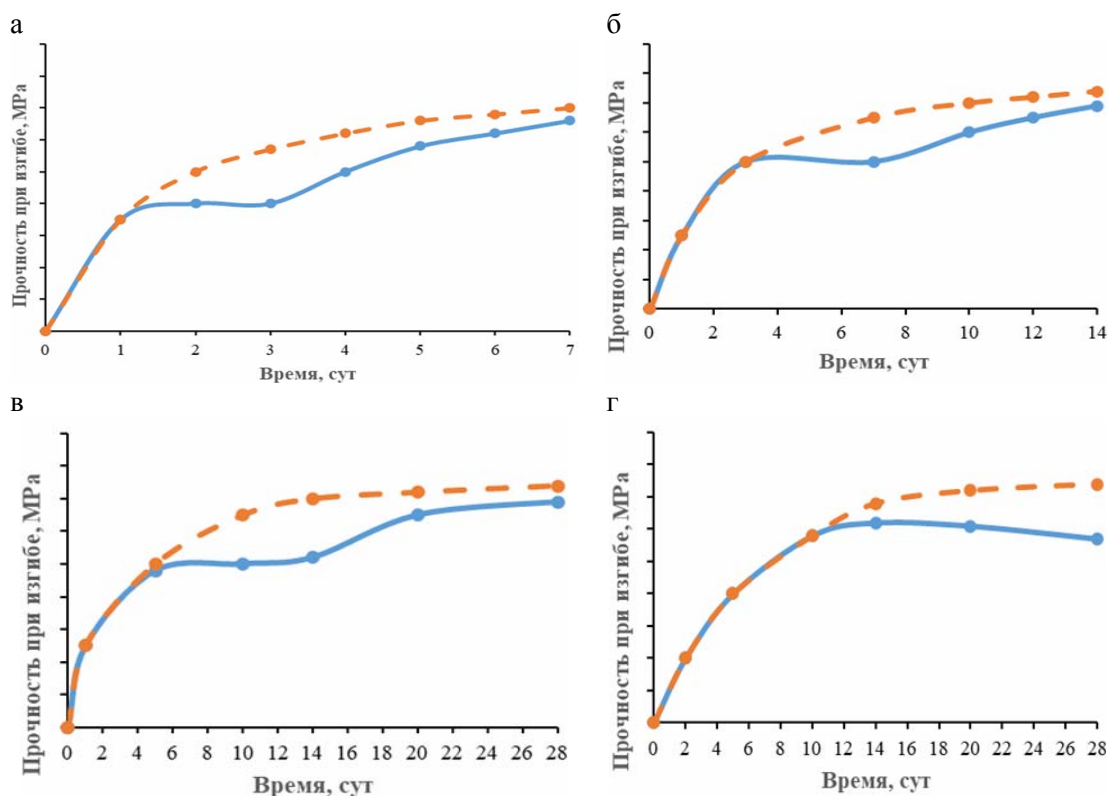


Рис. 4. Различные виды аномалий при твердении цементных систем: задержка роста в различные периоды времени (а, б, в); сброс прочности (г):
 - - - - - нормальное твердение; ———— аномальное твердение

В настоящее время накоплено недостаточно материала для объяснения механизма аномального схватывания. Имеющиеся данные дают основание предположить, что аномальное схватывание обусловлено нарушением (задержкой) синтеза этtringита и других алюмосодержащих фаз с кристаллизацией их в более поздние сроки в затвердевшей структуре камня, что снижает его трещиностойкость и приводит к задержке твердения либо даже к сбросу прочности. Чтобы избежать негативных последствий аномального схватывания, целесообразно восстановить в нормативных документах на портландцемент пункт, нормирующий время конца схватывания.

Список литературы

1. Ли, Ф.М. Химия цемента и бетона: пер. с англ. / Ф.М. Ли. – М.: Стройиздат, 1961. – 646 с.
2. Калоузек, Г.Л. Применение дифференциального термического анализа при изучении системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ / Г.Л. Калоузек // Труды III Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1958. – С. 206–219.
3. Калоузек, Г.Л. Процессы гидратации на ранних стадиях твердения цемента / Г.Л. Калоузек // Труды VI Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 65–76.
4. Будников, П.П. Ложное схватывание цемента / П.П. Будников, И.В. Кравченко // Цемент. – 1964. – № 3. – С. 3–5.
5. Ямагуши, Г. Оценка скорости гидратации цементных соединений и портланд-цемента при помощи рентгенографического анализа / Г. Ямагуши, К. Такемото, Х. Юшикава, С. Такаги // Труды IV Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1964. – С. 368–372.
6. Кондо, Р. Кинетика и механизм гидратации цемента / Р. Кондо, С. Уэда // Труды V Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1970. – С. 341–346.
7. Лохер, Ф.Б. Исследование механизма гидратации / Ф.Б. Лохер, В. Рихартц // Труды VI Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 122–123.
8. Харалд, Ю. Использование противоморозной добавки и ускорителей схватывания для цемента NITCAL® / Ю. Харалд // Технология бетонов. – 2015. – № 1–2 (102–103). – С. 33–37.
9. Ткач, Е.В. Влияние органоминеральных модификаторов на нормальную плотность и сроки схватывания цемента / Е.В. Ткач, Г.М. Рахимова, С.А. Сейдинова, А.О. Икишева, М.К. Дадиева // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11. – С. 1220–1223.
10. Вовк, А.И. Факторы, определяющие эффективность ускорителей для торкрет-бетона / А.И. Вовк // Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2019. – № 2 (55). – С. 32–41.
11. Ван Нес Блессинг, Л.К. Быстротвердеющие и быстротвердеющие смешанные вяжущие на основе портландского, алюминатного и сульфоалюминатного цементов / Л.К. Ван Нес Блессинг // Цемент и его применение. – 2015. – № 2. – С. 145–147.
12. Писклак, Т.Д. Активаторы схватывания цемента для цементных композиций с замедленным схватыванием и связанные с ними способы: пат. на изобретение RU № 2618540 / Писклак Т.Д., Анапиоу К., Отиено П.А., Морган Р.Г., Боул П.Д., Бразерс Л.Е.; опублик. 04.05.2017.
13. Петрова, Т.М. Методы предупреждения ложного схватывания / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко, М.И. Милачев, Д.М. Милачев // Строительные материалы. – 2007. – № 7. – С. 30–31.
14. Петрова, Т.М. Оценка и методы предупреждения ложного схватывания цементов с пластифицирующими добавками / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко, М.И. Милачев, Д.М. Милачев // Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2007. – № 1. – С. 85–88.
15. Рахимбаев, Ш.М. Экологичный портландцемент / Ш.М. Рахимбаев // Технологии бетонов. – 2010. – № 7–8 (48–49). – С. 18–19.
16. Феднер, Л.А. Требования к цементам для бетонов различного назначения / Л.А. Феднер, С.Н. Ефимов, П.А. Зайцев // Цемент и его применение. – 2005. – № 3. – С. 7–8.
17. Баратов, Е.А. Особенности ранних стадий гидратации и регулирования структурообразования цементов с аномалиями при схватывании: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Баратов. – М.: Гос. ВНИИ цемент. пром-сти, 1988. – 16 с.
18. Козлова, В.К. Потенциометрический способ определения эффективности добавок, замедляющих схватывание цементов / В.К. Козлова, В.Г. Григорьева, А.М. Маноха // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1–2. – С. 69–73.

19. Рахимбаев, Ш.М. Изменение электрохимического потенциала в процессе гидратации цементов с различными видами схватывания / Ш.М. Рахимбаев, Е.А. Баратов // Физико-химические аспекты производства строительных материалов: сб. докл. науч.-практ. конф. – М.: Изд-во МИСИ, 1986. – С. 13–15.

20. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1986. – 472 с.

21. Акиева, Е.А. Прогнозирование марочной прочности цементных систем по результатам краткосрочных испытаний и минералогическому составу: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Акиева. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2006. – 21 с.

References

1. Li, F.M. Chemistry of cement and concrete: translated from the english / F.M. Li. – M.: Stroyizdat, 1961. – 646 p.

2. Kalouzek, G.L. Application of differential thermal analysis in the study of the $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ system / G.L. Kalouzek // Proceedings of the III International congress on cement chemistry. – M.: Stroyizdat, 1958. – P. 206–219.

3. Kalouzek, G.L. Hydration processes at the early stages of cement hardening / G.L. Kalouzek // Proceedings of the VI International congress on cement chemistry. – M.: Stroyizdat, 1976. – P. 65–76.

4. Budnikov, P.P. False setting of cement / P.P. Budnikov, I.V. Kravchenko // Cement. – 1964. – No. 3. – P. 3–5.

5. Yamagushi, G. Evaluation of the hydration rate of cement compounds and Portland cement using X-ray analysis / G. Yamagushi, K. Takemoto, H. Yushikawa, S. Takagi // Proceedings of the IV International congress on cement chemistry. – M.: Stroyizdat, 1964. – P. 368–372.

6. Kondo, R. Kinetics and mechanism of cement hydration / R. Kondo, S. Ueda // Proceedings of the V International congress on cement chemistry. – M.: Stroyizdat, 1970. – P. 341–346.

7. Locher, F.B. Investigation of the mechanism of hydration / F. B. Locher, V. Richartz // Proceedings of the VI International Congress on Cement Chemistry. – M.: Stroyizdat, 1976. – P. 122–123.

8. Harald, Yu. The use of antifreeze additives and setting accelerators for NITCAL® cement / Yu. Harald // Technology of concrete. – 2015. – No. 1–2 (102–103). – P. 33–37.

9. Tkach, E.V. The effect of organomineral modifiers on the normal density and setting time of cement / E.V. Tkach, G.M. Rakhimova, S.A. Seidinova, A.O. Ikisheva, M.K. Dadiyeva // Fundamental research. – 2012. – No. 11. – P. 1220–1223.

10. Vovk, A.I. Factors determining the effectiveness of accelerators for shotcrete / A.I. Vovk // Cement. Concrete. Dry mixes. – 2019. – No. 2 (55). – P. 32–41.

11. Van Ness Blessing, L.K. Fast-setting and fast-hardening mixed binders based on Portland, aluminate and sulfoaluminate cements / L.K. Van Ness Blessing // Cement and its application. – 2015. – No. 2. – P. 145–147.

12. Pisklak, T.D. Cement setting activators for cement compositions with delayed setting and related methods: Patent for invention RU No. 2618540/ Pisklak T.D., Anapiou K., Otieno P.A., Morgan R.G., Boal P.D., Brothers L.E. ; published 04.05.2017.

13. Petrova, T.M. Methods of preventing false grasping / T.M. Petrova, A.F. Serenko, M.I. Milachev, D.M. Milachev // Building materials. – 2007. – No. 7. – P. 30–31.

14. Petrova, T.M. Assessment and methods of preventing false setting of cements with plasticizing additives / T.M. Petrova, A.F. Serenko, M.I. Milachev, D.M. Milachev // Cement. Concrete. Dry mixes. – 2007. – No. 1. – P. 85–88.

15. Rakhimbayev, Sh.M. Eco-friendly Portland cement / Sh.M. Rakhimbayev // Concrete technologies. – 2010. – No. 7–8 (48–49). – P. 18–19.

16. Fedner, L.A. Requirements for cements for concrete for various purposes / L.A. Fedner, S.N. Efimov, P.A. Zaitsev // Cement and its application. – 2005. – No. 3. – P. 7–8.

17. Baratov, E.A. Features of the early stages of hydration and regulation of the structure formation of cements with anomalies during setting: auth. of dis... candidate of engineering sciences / E.A. Baratov. – M.: State Research Institute of cement. prom., 1988. – 16 p.
18. Kozlova, V.K. A potentiometric method for determining the effectiveness of additives that slow the setting of cements / V.K. Kozlova, V.G. Grigorieva, A.M. Manokha // Polzunovsky vestnik. – 2012. – No. 1–2. – P. 69–73.
19. Rakhimbayev, Sh.M. Change of electrochemical potential in the process of hydration of cements with various types of setting / Sh.M. Rakhimbayev, E.A. Baratov // Physico-chemical aspects of the production of building materials: Sat. dokl. scientific-practical conf. – M.: Publishing House of MISI, 1986. – P. 13–15.
20. Butt, Yu.M. Chemical technology of binding materials / Yu.M. Butt, M.M. Sychev, V.V. Timashev. – M.: Higher School, 1986. – 472 p.
21. Akieva, E.A. Prediction of the brand strength of cement systems based on the results of short-term tests and mineralogical composition: auth. of dis... candidate of engineering sciences / E.A. Akieva. – Belgorod: Publishing house of V.G. Shukhov BSTU, 2006. – 21 p.

Костромская государственная
сельскохозяйственная академия

Россия, 156530 Костромская обл.,
Костромской р-н, пос.Каравеево, Учебный
городок, д.34

Рыжов Александр Сергеевич,
аспирант 3-го года обучения,
архитектурно-строительный факультет
E-mail: kgsxa-ctu@yandex.ru

Титунин Андрей Александрович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: a_titunin@ksu.edu.ru

Kostroma State Agricultural Academy

Russia, 156530 Kostroma region, Karavaevo,
34, Training town

Ryzhov Aleksander Sergeevich,
3-year Postgraduate student, Faculty of
Architecture and Civil Engineering
E-mail: kgsxa-ctu@yandex.ru

Titunin Andrey Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: a_titunin@ksu.edu.ru

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ДРЕВЕСНО-МИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА НА ЕГО ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

А.С. Рыжов, А.А. Титунин

Приведены результаты сравнительных испытаний образцов теплоизоляционного композиционного материала из несортированных отходов деревообработки. Получены регрессионные модели, отражающие взаимосвязь структуры композита и его механических свойств, и графическая интерпретация результатов, а также рекомендован состав теплоизоляционного композита с показателями прочности при изгибе не ниже 0,5 МПа.

Ключевые слова: композиционные материалы, магнезит, древесные отходы, древесный наполнитель, эксплуатационные свойства

THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF WOOD-MINERAL COMPOSITE ON ITS STRENGTH INDICATORS

A.S. Ryzhov, A.A. Titunin

The article presents the results of comparative tests of samples of heat-insulating composite material from unsorted woodworking waste. Regression models reflecting the relationship between the composite structure and its mechanical properties and graphical interpretation of the results are obtained, and the composition of a thermal insulation composite with bending strength of at least 0.5 MPa is recommended.

Keywords: composite materials, magnesite, wood waste, wood filler, operational properties

Введение

Строительство, в том числе малоэтажное, динамично развивается в большинстве регионов Российской Федерации. Этим объясняется спрос на новые конструкционные и теплоизоляционные материалы в качестве альтернативы традиционному кирпичу, дереву, бетону и полимерам. В свете принятого 2 июля 2021 года Федерального закона № 296-ФЗ «О выбросах парниковых газов» работы в области энергосбережения и снижения углеродного следа на всех этапах жизненного цикла энергоэффективных материалов приобретают всё большую актуальность. Многие специалисты прогнозируют рост объемов производства строительных материалов на основе древесного сырья и минеральных вяжущих [1].

Создание таких композиционных материалов позволяет решать сразу две масштабные задачи: рациональное использование природных ресурсов за счет вторичной переработки сырья и получение новой продукции с высокими потребительскими свойствами при сравнительно низкой рыночной стоимости (себестоимость исходного сырья ниже, чем у большинства традиционных конструкционных и теплоизоляционных материалов).

Теоретический анализ

Одним из самых известных и распространенных древесных композитов с эксплуатационными свойствами как теплоизоляционного, так и конструкционного материала является арболит. Арболит представляет собой хорошо знакомый всем бетон, имеющий в своем составе органический заполнитель (чаще всего это древесная щепа). Состав арболита определяет его достоинство – экологичность. К тому же опилки армируют смесь, поэтому блоки из него имеют большую прочность на изгиб, нежели цементный камень, газобетон и тому подобное. Это позволяет, в частности, строить дом без армирования стен. Арболит является долговечным экологичным материалом, который обладает высокими теплосберегающими свойствами. Для обогрева помещений со стенами из арболита толщиной 30 см требуется в два раза меньше энергоносителей, чем для помещений со стенами из кирпича толщиной 75 см [2]. Эффективность применения арболита в капитальном строительстве обусловлена не только его физико-механическими характеристиками, но и достаточной конкурентоспособностью [3].

При производстве арболита в состав смеси вводят определенное количество химических добавок, нейтрализующих действие «цементных ядов» – сахаров, содержащихся в древесине и препятствующих процессу гидратации цемента. Можно использовать другой вид вяжущего – магнезитовый цемент, применение которого позволяет исключить введение в структуру композита хлористого кальция или жидкого стекла. Материалы на основе магнезитового цемента (магнезита) обладают повышенной огнеупорностью, не чувствительны к грибкам, плесени и т.п.

Как отмечается в ряде работ, свойства композиционного материала во многом зависят от параметров наполнителя, самого магнезита и технологии приготовления смеси [4]. При этом установлено, что для получения конструкционного материала соотношение магнезита и наполнителя должно быть 1:2. Для придания композиционному материалу теплоизоляционных свойств нужно увеличивать долю древесного наполнителя. В этом случае из-за уменьшения количества вяжущего и числа связей между частицами наполнителя в структуре композита произойдет снижение прочностных свойств материала. Очевидно также, что на прочность связей между древесными частицами будет влиять фракционный состав наполнителя: чем больше мелких частиц, тем больше их удельная поверхность и, следовательно, требуется больше вяжущего, чтобы обеспечить формирование прочных связей в композиционном материале. Поскольку информационный поиск не выявил каких-либо сведений о взаимосвязи фракционного состава древесного наполнителя с эксплуатационными свойствами древесно-минерального композита, были проведены лабораторные исследования процесса структурообразования композиционного материала на основе древесной стружки хвойных пород.

Экспериментальная часть

Цель исследований заключалась в установлении влияния состава композита на его механические свойства. В качестве варьируемых факторов приняты доля магнезита M , %, доля мелких частиц в составе древесного наполнителя $Оп$, %, и концентрация бишофита $Б$, %. В качестве выходных величин приняты: Y_1 – прочность при статическом изгибе ($\sigma_{из}$), МПа; Y_2 – прочность композита при сжатии ($\sigma_{сж}$), МПа. За основу принят В-план второго порядка [5]. Диапазоны и уровни варьирования факторов указаны в табл. 1. Число дублированных опытов в каждой точке плана было принято равным 6.

План эксперимента и результаты статистической обработки полученных результатов, а именно среднее значение выходной величины $\bar{Y}_i$, величина дисперсии S_i^2 и вычисленное по уравнению регрессии значение выходной величины $\hat{Y}_i$, представлены в табл. 2. При статистической обработке результатов эксперимента и проверке однородности дисперсий по критерию Кохрена G были сделаны выводы об однородности дисперсий для выходных величин: для прочности композита при статическом изгибе

$G_p = 0,19$; $G_T = 0,21$; $G_p < G_T$; для прочности композита при сжатии $G_p = 0,165$; $G_T = 0,21$; $G_p < G_T$.

Т а б л и ц а 1

Диапазоны, уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначения уровней варьирования		Уровни варьирования			Интервал варьирования Δ_i
	Натуральные	Кодированные	-1	0	+1	
Доля магнезита, %	М	X_1	60	70	80	10
Доля мелкой фракции в древесных отходах, %	Оп	X_2	20	35	50	15
Концентрация раствора бишофита, %	Б	X_3	5	10	15	5

Т а б л и ц а 2

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X_1	X_2	X_3	Прочность при изгибе, МПа			Прочность при сжатии, МПа		
				$\bar{Y}_1$	S_1^2	$\hat{Y}_1$	$\bar{Y}_2$	S_2^2	$\hat{Y}_2$
1	+	+	+	1,701	0,003	1,691	3,125	0,132	3,017
2	-	+	+	0,470	0,004	0,505	0,707	0,083	0,693
3	+	-	+	1,860	0,032	1,885	3,858	0,280	3,644
4	-	-	+	0,688	0,028	0,699	0,613	0,083	0,444
5	+	+	-	1,220	0,010	1,267	2,109	0,091	1,943
6	-	+	-	0,238	0,001	0,377	0,961	0,113	0,843
7	+	-	-	1,212	0,034	1,193	2,633	0,131	2,570
8	-	-	-	0,238	0,005	0,303	0,563	0,117	0,594
9	+	0	0	1,212	0,028	1,240	2,650	0,119	2,793
10	-	0	0	0,231	0,001	0,202	0,781	0,124	0,643
11	0	+	0	0,840	0,004	0,850	1,220	0,126	1,129
12	0	-	0	0,920	0,001	0,910	1,401	0,104	1,318
13	0	0	+	0,770	0,012	0,816	1,370	0,086	1,454
14	0	0	-	0,410	0,007	0,406	1,100	0,112	0,993

Зависимости предела прочности древесно-минерального композита при изгибе от варьируемых факторов в кодированных и натуральных обозначениях факторов представлены в виде уравнений (1) и (2). Регрессионные модели, отражающие взаимосвязь прочности древесно-минерального композита при сжатии и варьируемых факторов, также представлены в кодированных (3) и натуральных (4) обозначениях.

$$Y_1 = 0,611 + 0,519X_1 - 0,03X_2 + 0,205X_3 + 0,11X_1^2 + 0,269X_2^2 - 0,067X_2X_3 + 0,074X_1X_3; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{и}} = 4,216 - 0,117 \cdot \text{М} - 0,0768 \cdot \text{Оп} - 0,0313 \cdot \text{Б} + 0,001 \cdot \text{М}^2 + 0,0012 \cdot \text{Оп}^2 - 0,00089 \cdot \text{Оп} \cdot \text{Б} + 0,00148 \cdot \text{М} \cdot \text{Б}; \quad (2)$$

$$Y_2 = 1,221 + 1,075X_1 - 0,095X_2 + 0,231X_3 + 0,495X_1^2 - 0,219X_1X_2 + 0,306X_1X_3; \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{сж}} = 18,419 - 0,5956 \cdot \text{М} + 0,0959 \cdot \text{Оп} - 0,3822 \cdot \text{Б} + 0,00495 \cdot \text{М}^2 - 0,00146 \cdot \text{М} \cdot \text{Оп} + 0,00612 \cdot \text{М} \cdot \text{Б}. \quad (4)$$

Полученные регрессионные модели были использованы для проверки статистической гипотезы об однородности дисперсии адекватности $S_{ад}^2$ и дисперсии воспроизводимости S_y^2 . Положительный результат проверки показал, что дисперсии $S_{ад}^2$ и S_y^2 однородны: расчетные значения критерия Фишера для уравнений (1) и (3) соответственно равны 1,03 и 2,12. Табличное значение критерия Фишера $F_T = (q = 0,05; f_y = 70) = 2,16$. Расчетные значения критерия Фишера оказались меньше табличного значения ($F_p < F_T$); следовательно, математические модели адекватны и позволяют вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Для анализа влияния варьируемых факторов в кодированном обозначении на прочность композита при изгибе и при сжатии были построены графические зависимости, которые приведены на рис. 1–4.

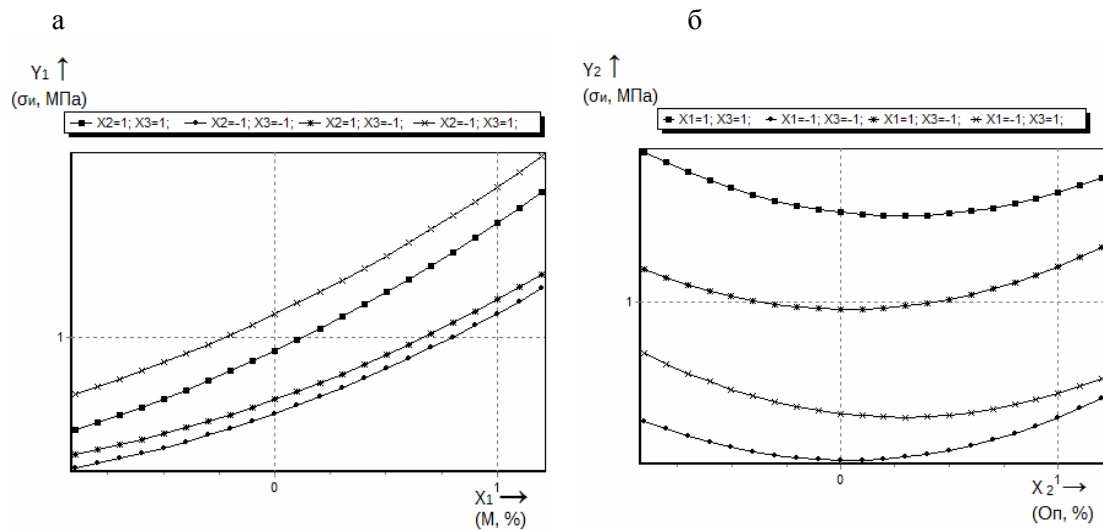


Рис. 1. График зависимости прочности на изгиб:
а – от магнетита; б – от доли опилок мелкой фракции в древесных отходах

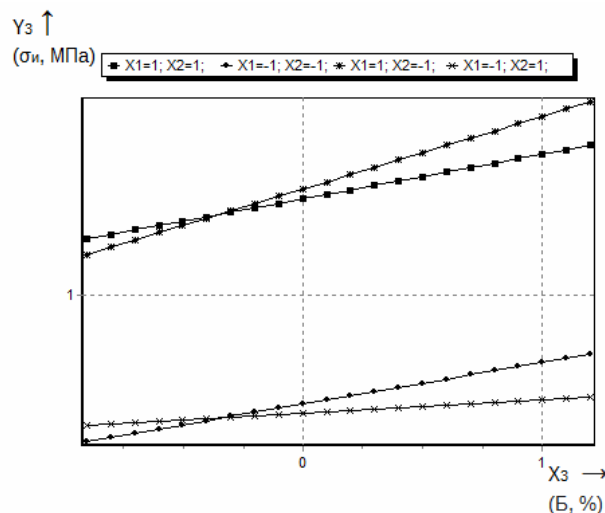


Рис. 2. График зависимости прочности на изгиб от концентрации раствора бишофита

Анализ этих зависимостей показал, что при увеличении доли добавки магнетита предел прочности композиционного материала при изгибе постоянно растет (рис. 1, а). Это можно объяснить увеличением числа связей между частицами наполнителя, на поверхности которых имеется достаточное количество раствора магнетита, что и приводит к созданию прочной структуры материала. При этом (рис. 1, б) с увеличением доли опилочной фракции в составе древесного наполнителя прочность при

изгибе сначала снижается, затем постоянно возрастает, что можно объяснить некоторым увеличением плотности материала. Максимальное значение прочности при изгибе соответствует минимальной доле опилочной фракции.

Увеличение концентрации раствора бишофита способствует улучшению схватываемости магнезита с древесными частицами и росту прочности при изгибе в целом (см. рис. 2).

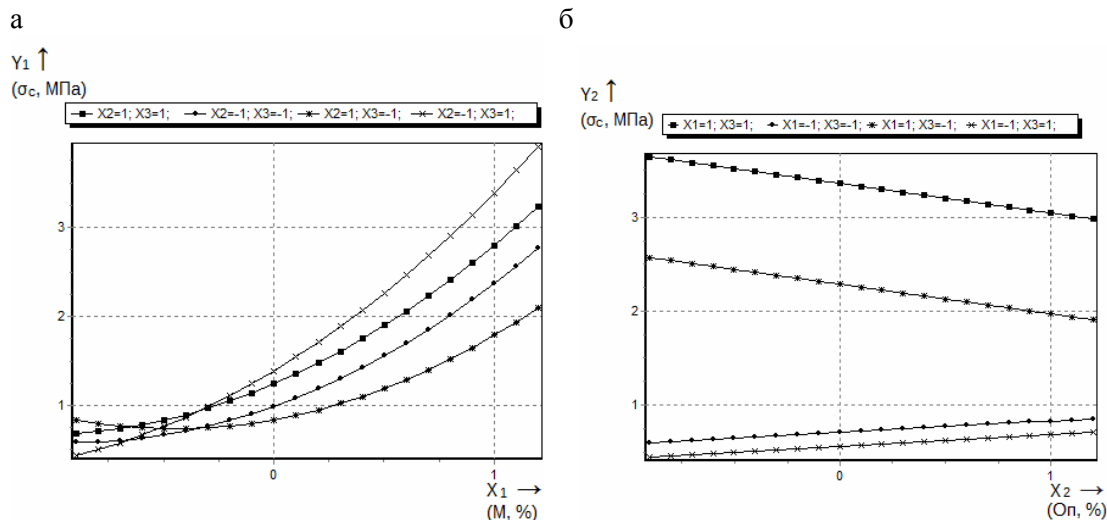


Рис. 3. График зависимости прочности на сжатие:
а – от доли магнезита; б – от доли опилок мелкой фракции в древесных отходах

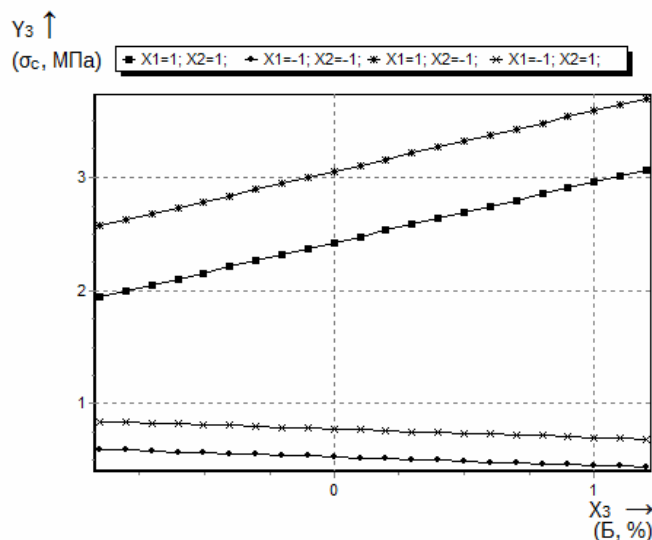


Рис. 4. График зависимости прочности на изгиб от концентрации раствора бишофита

Предел прочности при сжатии с увеличением доли добавки магнезита также постоянно растет, как и прочность при изгибе (рис. 3,а). Характер взаимосвязи доли опилочной фракции в древесном наполнителе и прочности при сжатии отличается от характера зависимости прочности при изгибе. Это объясняется тем, что при приложении любой нагрузки в древесно-минеральном композите возникают внутренние напряжения двух видов: напряжения в самих древесных частицах и напряжения на границе «магнезит – древесина». В любом случае эти напряжения являются касательными по отношению к поверхности частиц как в сжатой зоне образца, так и в растянутой. С увеличением доли опилочной фракции в составе древесного наполнителя существенно возрастают число мелкодисперсных частиц и суммарная удельная

поверхность наполнителя. Вследствие этого снижается число адгезионных и когезионных связей между компонентами в структуре композита.

Выводы и рекомендации

Для получения теплоизоляционного древесно-минерального композита с прочностью при изгибе не ниже 0,5 МПа рекомендуется следующий состав композита: доля магнезита – 65 %; доля мелкой фракции в древесных отходах – 50 %; концентрация раствора бишофита – 15 %. С увеличением доли мелкой фракции прочность древесно-минерального композита снижается вследствие уменьшения необходимых адгезионных и когезионных связей в структуре материала.

Список литературы

1. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов / Р.Г. Сафин, В.В. Степанов, Э.Р. Хайруллина, А.А. Гайнуллина, Т.О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – 52 с.
2. Наназашвили, И.Х. Справочник по производству и применению арболита / И.Х. Наназашвили. – М.: Стройиздат, 1987. – 107 с.
3. Березина, Е.А. Особенности применения арболита в жилищном строительстве / Е.А. Березина, В.А. Репин // Вестник магистратуры. – Йошкар-Ола, 2018. – 61 с.
4. Полищук, А.И. Производство арболита как одно из перспективных направлений комплексной переработки древесины / А.И. Полищук, А.В. Рубинская, В.Н. Трофимук, Н.Г. Чистова. – Лесосибирск: Лф СибГТУ, 2012. – 75 с.
5. Елизаров, С.В. Композиционные материалы, их механико-структурный анализ и некоторые новые области: автореф. дис. ... д-ра техн. наук (05.23.05) / Елизаров Сергей Вадимович. – СПб.: КНИТУ, 2000. – 45 с.
6. Вахнина, Т.Н. Методы и средства научных исследований: в 2 ч. Ч.2: Расчетно-графические и исследовательские работы / Т.Н. Вахнина. – Кострома: КГТУ, 2015. – 75 с.
7. Шитова, И.Ю. Современные композиционные строительные материалы / И.Ю. Шитова, Е.Н. Самошина, С.Н. Кислицына, С.А. Болтышев. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 136 с.
8. Ермолина, А.В. Теплоизоляционный материал на основе древесноволокнистых продуктов / А.В. Ермолина, П.В. Миронов // Химия растительного сырья. – Красноярск: СГТУ, 2011. – 200 с.

References

1. Modern building composite materials based on wood waste / R.G. Safin, V.V. Stepanov, E.R. Khairullina, A.A. Gainullina, T.O. Stepanova // Bulletin of the Kazan Technological University. – 2014. – 52p.
2. Nanazashvili, I.Kh. Handbook on the production and use of wood concrete / I.Kh. Nanazashvili. – M.: Stroyizdat, 1987. – 107 p.
3. Berezina, E.A. Features of the use of wood concrete in housing construction / E.A. Berezina, V.A. Repin // Bulletin of the Magistracy. – Yoshkar-Ola, 2018 – 61 p.
4. Polishchuk, A.I. Production of wood concrete as one of the promising areas of integrated wood processing / A.I. Polishchuk, A.V. Rubinskaya, V.N. Trofimuk, N.G. Chistova. – Lesosibirsk: SibGTU, 2012. – 75 p.
5. Elizarov, S.V. Composite materials, their mechanical and structural analysis and some new areas: author. dis. doc. of Sciences (05.23.05) / Elizarov Sergey Vadimovich. – St. Petersburg: KNRTU, 2000. – 45 p.
6. Vakhnina, T.N. Methods and means of scientific research: At 2 p. Part 2: Calculation and graphic and research work / T.N. Vakhnina. – Kostroma: KSTU, 2015. – 75 p.
7. Shitova, I.Yu. Modern composite building materials / I.Yu. Shitova, E.N. Samoshina, S.N. Kislitsina, S.A. Boltyshev. – Penza: PGUAC, 2015. – 136 p.
8. Ermolina, A.V. Heat-insulating material based on wood fiber products / A.V. Ermolina, P.V. Mironov // Chemistry of plant raw materials. – Krasnoyarsk: SSTU, 2011 – 200 p.

УДК 691.175.5/.8

DOI 10.54734/20722958_2022_2_68

*Вятский государственный университет*Россия, 610000, г. Киров,
ул. Московская, д. 36,
тел.: (8332) 74-25-65**Волошкой Алексей Николаевич,**
старший преподаватель кафедры
«Строительные конструкции и машины»
E-mail: usr20462@vyatsu.ru*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет*Россия, 430005, г. Саранск, Республика
Мордовия, ул. Большевистская, д. 68,
тел.: (8342) 22-29-34**Авдонин Валерий Викторович,**
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Прикладная механика»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru*Vyatka State University*Russia, 610000, Kirov, 36, Moskovskaya St.,
tel.: (8332) 74-25-65**Volotskoy Aleksey Nikolaevich,**
Senior Lecturer of the department «Building
Structures and Machines»
E-mail: usr20462@vyatsu.ru
*National Research Mordovia State University*Russia, 430005, Saransk, Republic of
Mordovia, 68, Bolshevistskaya St.,
tel.: (8342) 22-29-34**Avdonin Valeriy Viktorovich,**
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Applied Mechanics»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ*

А.Н. Волошкой, В.В. Авдонин

Изучены вопросы физического старения вибропоглощающих полимерных материалов на основе этиленвинилацетата, модифицированных каучуками различных марок, при оценке их прочностных характеристик. Содержание каучука в полимерном композите составляло 20 % по объему. Для определения прочностных характеристик использовалась разрывная машина «Shimadzu». Установлено, что у вибропоглощающих полимерных материалов на основе этиленвинилацетата, модифицированных каучуками, с течением времени происходит снижение прочности при растяжении. Выяснено, что процент снижения прочностных характеристик в результате физического старения полимерного материала зависит от степени совместимости этиленвинилацетата и каучука. Показано, что с помощью работы адгезии можно спрогнозировать, какой из полимерных композитов больше (меньше) подвергнется физическому старению.

Ключевые слова: этиленвинилацетат, полимерные материалы, каучук, прочность при растяжении

ESTIMATION OF DYNAMICS OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF DAMPING POLYMER MATERIALS BASED ON ETHYLENE- VINYL ACETATE OVER TIME

A.N. Volotskoy, V.V. Avdonin

The issues of physical aging of vibration-absorbing polymeric materials based on ethylene-vinyl acetate modified with rubbers of various grades have been studied assessing the strength characteristics of modified composites. The rubber content in the polymer composite was 20 % by volume.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00301, <https://rscf.ru/project/21-79-00301/>.

To determine the strength characteristics, a «Shimadzu» tensile testing machine was used. It is found that rubber-modified vibration-absorbing polymeric materials based on ethylene-vinyl acetate decrease in tensile strength with time. It is found that the percentage of reduction in strength characteristics as a result of physical aging of the polymer material depends on the degree of compatibility of ethylene-vinyl acetate and rubber. It is shown that using the work of adhesion it is possible to predict which of the polymer composites will undergo physical aging more (less).

Keywords: ethylene-vinyl acetate, polymer materials, rubber, tensile strength

Введение. Полимерные материалы представляют собой важнейший сегмент в современном материаловедении. По сравнению с металлами у полимеров выше соотношение прочность/вес, меньше плотность, лучше стойкость к коррозии и соотношение цена/качество. Одной из областей применения полимерных материалов является вибропоглощение строительных конструкций при низкочастотной вибрации.

Объектом исследования являлись вибропоглощающие композиционные полимерные материалы для полов в помещениях различного назначения. Такие материалы должны иметь высокие показатели прочности при действии на них динамической (преимущественно ударной) нагрузки [1, 2]. Исследуемые композиты имеют двухкомпонентную полимерную систему, состоящую из основного полимера – этиленвинилацетата (ЭВА) – и одного из трех каучуков следующих марок: бутадиен-нитрильный каучук СКН-40, хлорбутилкаучук ХБК-139, хлоропреновый каучук (ХПК) CR232. Каучуки добавляли к основному полимеру с целью улучшения прочностных свойств. В этом случае изменение прочностных характеристик композита будет зависеть от адгезионной прочности полимерной системы, на которую, в свою очередь, влияет степень совместимости ЭВА и каучука.

В полимерных материалах в процессе их хранения и эксплуатации могут возникать деструктивные процессы [3, 4], которые приводят к снижению заданных характеристик таких материалов с течением времени. Данное явление называется старением. Старение может «модифицировать» структуру полимеров на молекулярном, макромолекулярном уровнях и тем самым вызвать изменение прочностных характеристик [5].

Таким образом, целью работы являлось исследование динамики прочностных свойств ВПМ на основе ЭВА с течением времени при модификации каучуками различных марок.

Материалы и методы исследования. В качестве полимерной основы применялся этиленвинилацетат LG EVA ES 28005 («LG Chem», Южная Корея) с содержанием ВА звеньев 28 %. В качестве пластификатора – хлорпарафин ХП-470 (ХП) ТУ 2493-379-05763441-2002 (ВитаХим, Россия). Объемное содержание хлорпарафина в составе смеси 40 %.

Мел («ГЕОКОМ», Россия) использовался как инертный наполнитель. Объемное содержание наполнителя в составе полимерной композиции $(50 \pm 1) \%$. Эфир канифоли глицериновый (ЭК) ТУ 2435-063-05788576-2008 (ОАО «ОРГСИНТЕЗ», г. Нижний Новгород) – как модифицирующая добавка.

В качестве дополнительных полимеров применялись каучуки следующих марок: бутадиен-нитрильный каучук СКН-40, хлорбутилкаучук ХБК-139, хлоропреновый каучук (ХПК) CR232 с объемным содержанием 20 % по отношению к основному полимеру.

Полимерные смеси изготавливали с помощью лабораторного смесителя периодического действия с тангенциальными роторами. Первоначально перемешивали основной полимер при температуре 120°C при числе оборотов 44 об/мин в течение 20 минут. Далее полимер смешивали с пластификатором, добавляли наполнитель, модификатор и дополнительный полимер, а затем раскатывали на вальцах до получения материала однородной толщины.

Составы и марки исследуемых композитов приведены в табл. 1.

Составы и марки исследуемых композитов на основе ЭВА

№ п/п	Марка композита	Компоненты						
		ЭВА	ХП	Мел	ЭК	СКН-40	ХБК-139	ХПК CR232
		Содержание в %						
1	Без каучука	12,60	11,13	70,33	5,94	-	-	-
2	СКН	10,08	11,13	70,33	5,94	2,52	-	-
3	ХБК	10,08	11,13	70,33	5,94	-	2,52	-
4	ХПК	10,08	11,13	70,33	5,94	-	-	2,52

Условную прочность при растяжении определяли по ГОСТ Р 54553-2011 «Резина и термопластичные эластомеры. Определение упругопрочностных свойств при растяжении».

Условную прочность (f_p) образцов вычисляли по формуле

$$f_p = \frac{P}{d \cdot b_0}, \quad (1)$$

где P – сила, вызывающая разрыв образца, кгс; d – среднее значение толщины образца до испытания, см; b_0 – ширина образца до испытания, см.

Результаты исследования и их обсуждение. Вибропоглощающий полимерный материал на основе ЭВА без каучука имеет условную прочность при растяжении не более 1,38 МПа (рис. 1, а). Добавление любого из каучуков приводит к увеличению условной прочности при растяжении композита на основе ЭВА. На рис.1,а представлены прочностные характеристики вибропоглощающих полимерных материалов на основе ЭВА при добавлении каучуков различных марок. Композит с СКН-40 имеет наибольшую прочность по сравнению с другими композитами. Это может быть обусловлено тем, что СКН-40 имеет наибольшую прочность при растяжении по сравнению с другими каучуками, рассматриваемыми в данной работе.

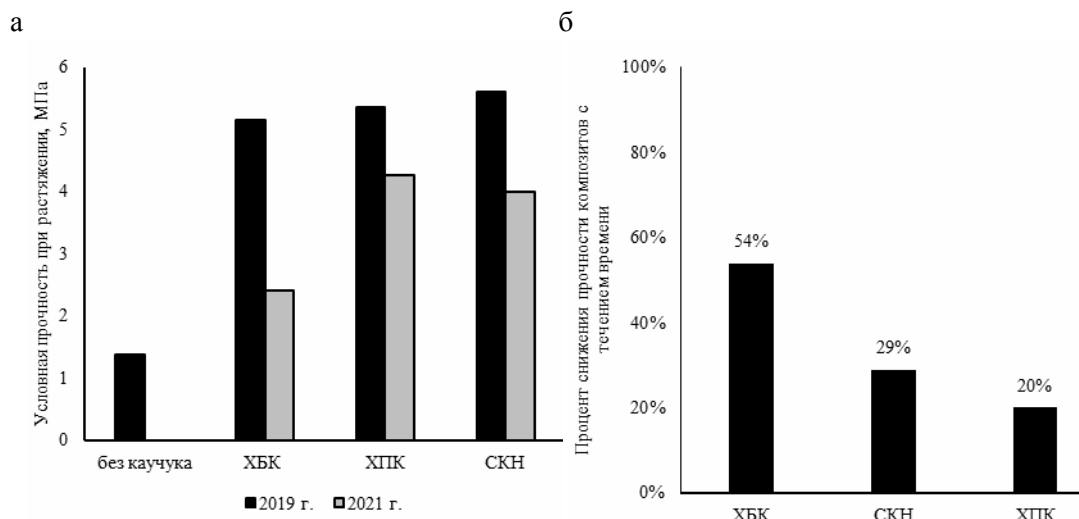


Рис. 1. Исследование композитов на основе ЭВА на старение:

а – условная прочность при растяжении; б – процент снижения прочности композитов с течением времени

Для оценки динамики прочностных свойств вибропоглощающих полимерных материалов на основе ЭВА с течением времени было проведено сравнение их характеристик по прошествии двух лет (см. рис. 1). Исследуемые материалы хранились на складе в сухом отапливаемом помещении.

Из рис. 1,а видно, что у всех композитов, модифицированных каучуками, с течением времени наблюдается снижение прочностных характеристик. У композита с ХБК-139 прочность при растяжении уменьшается на 54 процента. У композитов с СКН-40 и ХПК CR232 прочностные свойства снижаются на 29 и 20 процентов соответственно (см. рис. 1,б).

Стабильность свойств полимерных материалов зависит от физических и химических характеристик старения [6, 7]. К химическому старению можно отнести потерю боковых групп, гидролиз, сшивание при отверждении, которые являются необратимыми химическими реакциями. Физическое старение – проявление мелкомасштабных релаксационных процессов, которое может привести к изменению плотности, температуры стеклования, прочности при разрыве полимерных материалов [7].

Проводились исследования влияния физического старения на прочностные свойства вибропоглощающих полимерных материалов на основе ЭВА. Важным аспектом процесса физического старения полимерных смесей является роль межмолекулярных взаимодействий. Эффективность таких взаимодействий зависит от совместимости полимеров в композите. Совместимость определяется близкими значениями параметров растворимости компонентов. Кроме того, совместимость можно оценить через прочность адгезионной связи пропорционально обратимой работе адгезии W_{AB} [8, 9]:

$$W_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}, \quad (2)$$

где γ_A , γ_B – свободная поверхностная энергия (СПЭ) компонентов; γ_{AB} – свободная поверхностная энергия на границе раздела фаз.

Свободная поверхностная энергия любого материала согласно методу Оуэнса и Вендта состоит из двух компонентов [10]:

1. Дисперсионная составляющая СПЭ (γ^d).
2. Полярная составляющая СПЭ (γ^p).

Свободная поверхностная энергия на границе раздела фаз γ_{AB} определяется следующим выражением:

$$\gamma_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - 2 \cdot (\gamma_A^d \cdot \gamma_B^d)^{0.5} - 2 \cdot (\gamma_A^p \cdot \gamma_B^p)^{0.5}. \quad (3)$$

Из уравнения (2) видно, что чем больше СПЭ компонентов и меньше свободная поверхностная энергия на границе раздела фаз, тем больше работа адгезии и соответственно сильнее взаимодействие «ЭВА – каучук».

Данные в табл. 2 показывают различия в свободной поверхностной энергии каучуков и полярного этиленвинилацетата.

Т а б л и ц а 2

Свободная поверхностная энергия компонентов [10-12]

Параметр	Компонент			
	ЭВА	СКН-40	ХБК-139	ХПК CR232
γ^d , мДж/м ²	25	23,4	23,3	19,3
γ^p , мДж/м ²	13,6	5,9	4,6	23,7
Свободная поверхностная энергия γ , мДж/м ²	38	29,3	27,9	43

Из рис. 2 видно, что работа адгезии зависит от полярности каучука. Значение W_{AB} увеличивается, когда полярная часть свободной поверхностной энергии каучука возрастает. Наиболее полярной поверхностью обладает хлоропеновый каучук. Благодаря этому он хорошо совмещается с полярным этиленвинилацетатом. В результате чего композит с полимерной системой ЭВА/ХПК имеет самое высокое значение работы адгезии. В системах ЭВА/ХБК и ЭВА/СКН работа адгезии имеет близкие значения. Однако по результатам исследования образцов на старение композиты с ХБК теряют прочность примерно на 54 %. Это может быть обусловлено тем, что хлорбутилкаучук является менее полярным каучуком согласно параметру растворимости ($\delta \approx 16.6$ МПа) [13] из всех каучуков, рассматриваемых в данной работе. Кроме того,

свободная поверхностная энергия на границе раздела фаз ЭВА/ХБК самая высокая. Это приводит к уменьшению работы адгезии с течением времени, а также к снижению прочности композита на основе ЭВА.

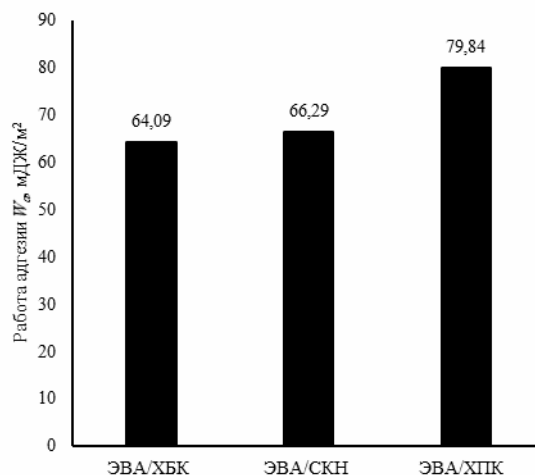


Рис. 2. Работа адгезии в системе ЭВА/каучук

Таким образом, можно сделать вывод, что полярность каучуков оказывает значительное влияние на прочностные свойства композитов на основе полярного термопластичного ЭВА. Хлоропреновый каучук марок CR232 и СКН-40 обладает большим сродством к этиленвинилацетату. Каучук ХБК-139 является ограниченно совместимым с ЭВА, так как с течением времени у композитов с данным каучуком наблюдается значительное снижение условной прочности при растяжении.

Заключение. По результатам проведенных исследований установлены экспериментальные зависимости условной прочности при растяжении от типа каучука для вибропоглощающих композиционных полимерных материалов на основе ЭВА.

Выяснено, что добавление любого из дополнительных полимеров приводит к увеличению условной прочности композита на основе ЭВА.

Установлено, что с течением времени условная прочность композитов на основе ЭВА, модифицированных каучуками, уменьшается. Наименьшее снижение прочности наблюдается у композитов, модифицированных каучуками марок СКН-40 и ХПК CR232.

Показано, что с помощью работы адгезии можно спрогнозировать, какой из полимерных композитов больше (меньше) подвергнется физическому старению.

Список литературы

1. Wu, J.H. Reinforcement of dynamically vulcanized EPDM/PP elastomers using organoclay fillers: dynamic properties of rubber vibration isolators and antivibration performance / J.H. Wu, C.H. Li, H.T. Chiu, Z.J. Shong, P.A. Tsai // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2009. – Vol. 22, № 5. – P. 503–509.
2. He, X. Damping properties of ethylene-vinyl acetate rubber/polylactic acid blends / X. He, M. Qu, X. Shi // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 4, № 3. – P. 15–22.
3. Заиков, Г.Е. Почему стареют полимеры / Г.Е. Заиков // Соросовский образовательный журнал. – 2017. – Т. 6, № 12. – С. 48–55.
4. Долган, М.И. Изменение свойств полимерных материалов в процессе старения при хранении / М.И. Долган // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2016. – № 3 (116). – С. 58–66.

5. Verdu, J. Effect of Aging on the Mechanical Properties of Polymeric Materials / J. Verdu // *Journal of Macromolecular Science, Part A*. – 1994. – Vol. 31, № 10. – P. 1383–1398.
6. White, J.R. Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect / J.R. White // *Comptes Rendus Chimie*. – 2006. – Vol. 9, № 11–12. – P. 1396–1408.
7. Utracki, L.A. *Polymer Blends Handbook* / L.A. Utracki., Ch.A. Wilkie. – Netherlands: Springer, 2014. – 2378 p.
8. Rothon, R. *Fillers for polymer application* / R. Rothon. – Switzerland: Springer, 2017. – 489 p.
9. Żenkiewicz, M. Methods for the calculation of surface free energy of solids / M. Żenkiewicz // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2007. – Vol. 24, № 1. – P. 137–145.
10. Stöckelhuber, K.W. Contribution of physico-chemical properties of interfaces on dispersibility, adhesion and flocculation of filler particles in rubber / K.W. Stöckelhuber, A. Das, R. Jurk, G. Heinrich // *Polymer*. – 2010. – Vol. 51, № 9. – P. 1954–1963.
11. Дулина, О.А. Влияние способа выделения каучука из латекса на свойства эластомерных материалов на основе бутадиен-нитрильных каучуков / О.А. Дулина, А.Д. Тарасенко, А.М. Буканов, А.А. Ильин // *Тонкие химические технологии*. – 2017. – Т. 12, № 4. – С. 85–90.
12. Starostina, I.A. *Polymer Surfaces and Interfaces. Acid-Base Interactions and Adhesion in Polymer-Metal Systems* / I.A. Starostina, O.V. Stoyanov, R.Ya. Deberdeev. – Canada: Apple Academic Press, 2014. – 177 p.
13. Ashok, N. EPDM–chlorobutyl rubber blends in γ -radiation and hydrocarbon environment: Mechanical, transport, and ageing behavior / N. Ashok, M. Balachandran, F. Lawrence, N. Sebastian // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2017. – Vol. 134, № 33. – Doi: 10.1002/app.45195.

References

1. Wu, J.H. Reinforcement of dynamically vulcanized EPDM/PP elastomers using organoclay fillers: dynamic properties of rubber vibration isolators and antivibration performance / J.H. Wu, C.H. Li, H.T. Chiu, Z.J. Shong, P.A. Tsai // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2009. – Vol. 22, № 5. – P. 503–509.
2. He, X. Damping properties of ethylene-vinyl acetate rubber/polylactic acid blends / X. He, M. Qu, X. Shi // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 4, № 3. – P. 15–22.
3. Zaikov, G.E. Why do polymers age / G.E. Zaikov // *Soros Educational Journal*. – 2017. – Vol. 6, № 12. – P. 48–55.
4. Dolgan, M.I. Changes in the properties of polymeric materials during aging during storage / M.I. Dolgan // *Bulletin of the Belarusian State Economic University*. – 2016. – №3 (116). – P. 58–66.
5. Verdu, J. Effect of Aging on the Mechanical Properties of Polymeric Materials / J. Verdu // *Journal of Macromolecular Science, Part A*. – 1994. – Vol. 31, № 10. – P. 1383–1398.
6. White, J.R. Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect / J.R. White // *Comptes Rendus Chimie*. – 2006. – Vol. 9, № 11–12. – P. 1396–1408.
7. Utracki, L.A. *Polymer Blends Handbook* / L.A. Utracki., Ch.A. Wilkie. – Netherlands: Springer, 2014. – 2378 p.
8. Rothon, R. *Fillers for polymer application* / R. Rothon. – Switzerland: Springer, 2017. – 489 p.
9. Żenkiewicz, M. Methods for the calculation of surface free energy of solids / M. Żenkiewicz // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2007. – Vol. 24, № 1. – P. 137–145.

10. Stöckelhuber, K.W. Contribution of physico-chemical properties of interfaces on dispersibility, adhesion and flocculation of filler particles in rubber / K.W. Stöckelhuber, A. Das, R. Jurk, G. Heinrich // *Polymer*. – 2010. – Vol. 51, № 9. – P. 1954–1963.
11. Dulina, O.A. Influence of the method of extraction of rubber from latex on the properties of elastomeric materials based on nitrile butadiene rubbers / O.A. Dulina, A.D. Tarasenko, A.M. Bukanov, A.A. Ilyin // *Fine Chemical Technologies*. – 2017. – Vol. 12, № 4. – P. 85–90.
12. Starostina, I.A. *Polymer Surfaces and Interfaces. Acid-Base Interactions and Adhesion in Polymer-Metal Systems* / I.A. Starostina, O.V. Stoyanov, R.Ya. Deberdeev. – Canada: Apple Academic Press, 2014. – 177 p.
13. Ashok, N. EPDM–chlorobutyl rubber blends in γ -radiation and hydrocarbon environment: Mechanical, transport, and ageing behavior / N. Ashok, M. Balachandran, F. Lawrence, N. Sebastian // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2017. – Vol. 134, № 33. – Doi: 10.1002/app.45195.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69.07

DOI 10.54734/20722958_2022_2_75

*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

Шеин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Механика»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Shein Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Mechanics»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Зернов Владимир Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»

Zernov Vladimir Victorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Mechanics»

Зайцев Михаил Борисович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механика»

Zaytsev Mihail Borisovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Mechanics»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НЕСУЩИХ КИРПИЧНЫХ СТЕН: СТРАХОВОЧНЫЕ СТОЙКИ

А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев

На основе практического опыта обследования строительных конструкций предложен вариант страховочной стойки для усиления разрушенных несущих кирпичных стен, на которые опираются стропильные фермы покрытия. Накопление локальных разрушений стен может привести к нарушению устойчивости положения исправных стропильных ферм и, как следствие, к аварийному состоянию здания в целом. Предлагаемое техническое решение позволит избежать аварии здания, а также эффективно и безопасно произвести восстановительные работы.

Ключевые слова: кирпичные стены, стропильные фермы, обследование, скрытые дефекты, усиление строительных конструкций, страховочные стойки

RESTORING OF BEARING BRICK WALLS OPERABILITY: SAFETY RACKS

A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev

Based on the practical experience of building structures survey, a variant of a safety rack is proposed to strengthen the destroyed bearing brick walls on which the roof trusses of the coating rest. Accumulation of local destruction of walls can lead to violation of the stability of the position of serviceable trusses and, as a result, to an emergency condition of the building as a whole. The proposed technical solution makes it possible to carry out restoration work efficiently and safely.

Keywords: brick walls, trusses, inspection, hidden defects, reinforcement of building structures, safety racks

Многолетний опыт обследования зданий и сооружений различного назначения (промышленных, гражданских) показывает, что причинами возникновения аварийных ситуаций, как правило, являются отсутствие плановых проверок технического состояния строительных конструкций и несвоевременное устранение обнаруженных дефектов [1–7].

Локальные разрушения отдельных строительных конструкций могут привести к аварийному состоянию здания и сооружения в целом. Причём ремонт непригодного элемента невозможен без усиления смежных конструкций, находящихся в исправном состоянии (исправное состояние – категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения, характеризующаяся отсутствием дефектов и повреждений, влияющих на снижение несущей способности и эксплуатационной пригодности). Поэтому зачастую возникает задача предупреждения аварий путём проведения комплекса мероприятий по усилению строительных конструкций.

Для предотвращения обрушения конструкций покрытия одного из домов культуры Пензенской области была экстренно сформирована группа специалистов ПГУАС. При обследовании состояния строительных конструкций обнаружены многочисленные следы замачивания стен, плит покрытия, потолков в зрительном зале, в административно-бытовых и хозяйственных помещениях. Намокание стен и потолков было вызвано разрушениями рубероидного ковра. Некоторые характерные дефекты кровли представлены на рис. 1, 2.



Рис. 1. Дефект стыка рубероидного ковра



Рис.2. Трещина в рубероидном ковре длиной 6 м и шириной раскрытия до 15 мм над несущей стеной зрительного зала

В результате замачивания и многолетних сезонных периодов замораживания и оттаивания сырых стен произошло существенное разрушение кирпичной кладки. Наиболее глубокие повреждения возникли в северной несущей стене зрительного зала, на которую опираются трапециевидные односкатные стальные фермы покрытия пролётом 15 м, установленные с шагом 6 м. По фермам уложены железобетонные ребристые плиты с утеплителем, цементно-песчаной стяжкой и рубероидным кровельным ковром. В этой стене между опорными узлами стропильных ферм разрушилась и расслоилась кирпичная кладка на глубину до 300 мм при общей толщине стены 510 мм. Натурное обследование показало, что слой дефектной кладки крошится, легко отделяется от стены и падает на землю. Площадь замоченной и разрушенной кладки составляет примерно 30 м² (рис. 3).



Рис. 3. Несущая стена зрительного зала



Рис. 4. Фрагмент разрушенной несущей стены зрительного зала

В связи с тем, что намокание и разрушение достигли опорной зоны фермы, во избежание ее обрушения появилась необходимость проведения мероприятий по усилению и ремонту аварийной стены. В первую очередь нужно было обеспечить устойчивость положения стропильной фермы, расположенной рядом с очагом разрушения стены. (Опорный узел фермы расположен на границе замоченного участка стены над средним оконным проёмом, заложённым красным кирпичом, см. рис. 3, 4.

Конструкцию узла опирания стропильной фермы на стену установить не удалось из-за отсутствия чертежей, актов скрытых работ и невозможности проведения вскрышных работ. В связи с этим была запроектирована двухветвевая страховочная стойка, устанавливаемая у стены под опорной фасонкой фермы внутри здания (рис. 5).



Рис. 5. Опорный узел стропильной фермы

Стойка устанавливается на отдельный фундамент. Общий вид стойки представлен на рис. 6.

Сечение ветвей подобрано как для отдельно стоящей колонны каркасного здания. Устойчивость и совместная работа ветвей в плоскости стены обеспечиваются постановкой врезных соединительных планок. Кроме этого, ветви крепятся к стене хомутами, соединёнными со швеллерами, установленными снаружи стены. Для создания эффекта обоймы и обжата кирпичной кладки перед сваркой хомуты нагреваются. Включение стойки в работу осуществляется постановкой пластин-клиньев между фермой и оголовком стойки.

После установки страховочной стойки в проектное положение можно приступать к ремонту кирпичной стены.

Предложенное конструктивное решение может быть использовано при восстановлении работоспособного состояния кирпичных стен с глубокими повреждениями для зданий со стропильной системой покрытия.

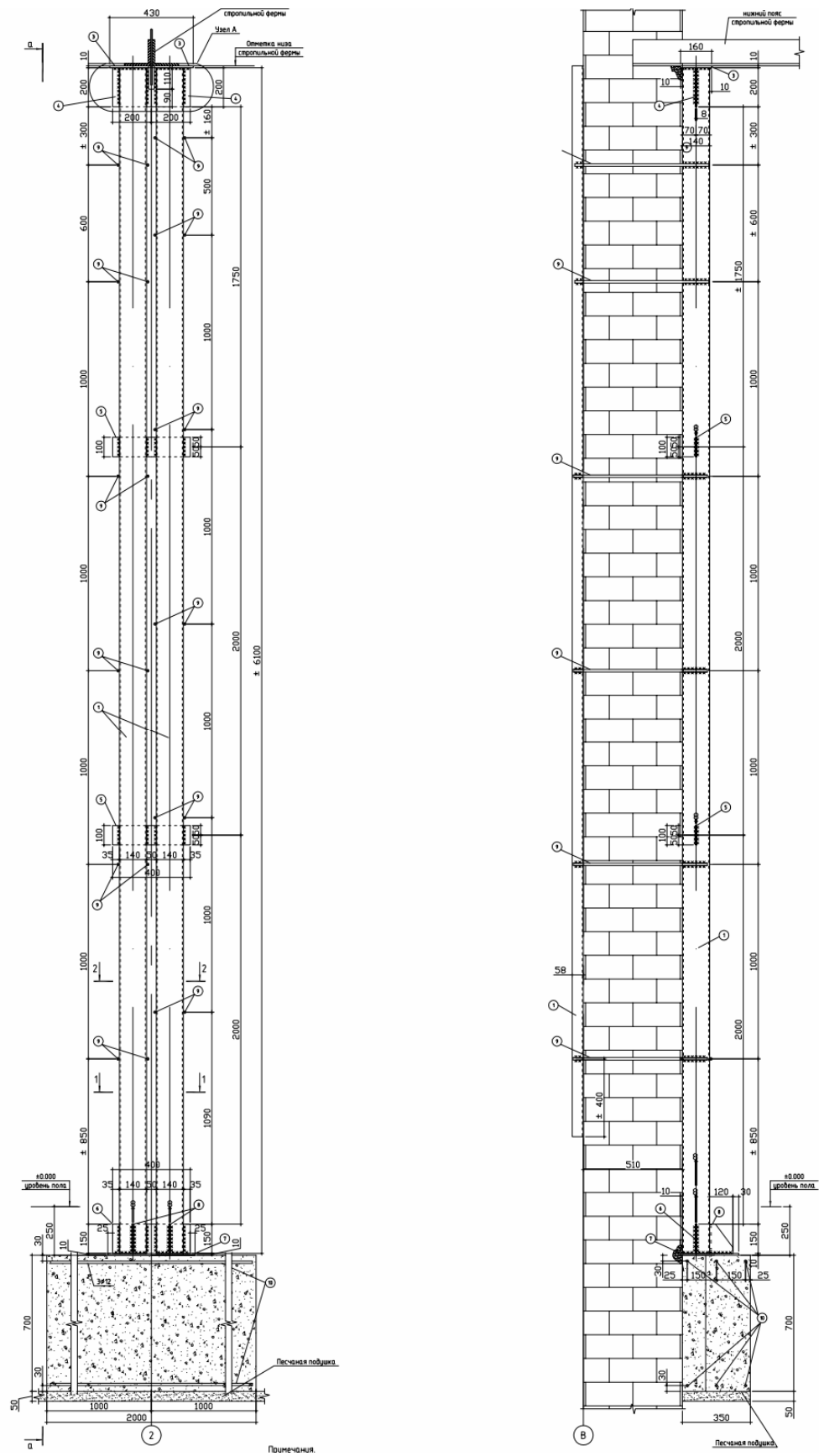


Рис. 6. Общий вид страховочной стойки

Выводы

1. Представлено эффективное противоаварийное мероприятие – установка страховочной стойки для усиления разрушенных несущих кирпичных стен, на которые опираются стропильные фермы покрытия.
2. Предложенное конструктивное решение может быть использовано при восстановлении работоспособного состояния кирпичных стен с глубокими повреждениями со стропильной системой покрытия.

Список литературы

1. Шеин, А.И. Нормативно-правовые документы и регламенты в обеспечении надёжности зданий и сооружений / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, И.В. Зернов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3 (32). – С.94–98.
2. Шеин, А.И. Опыт обследования зданий и сооружений / А.И. Шеин, С.В. Бакушев, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2017. – №5. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukciizdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file
3. Зернов, В.В. Опыт использования запаса несущей способности стропильной фермы при реконструкции производственного цеха / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2018. – №7. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomerazhurnala/no7/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/7.20/at_download/file
4. Зернов, В.В. Поэтапное усиление строительных конструкций надземной части галереи подачи песка и щебня РБУ / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Я.А. Азимова // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №3. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomerazhurnala/no3/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/3.24/at_download/file
5. Шеин, А.И. Влияние конструктивного и эксплуатационного отказов на долговечность строительных конструкций / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2. – С.64–71
6. Зернов, В.В. Вариант замены несущих строительных конструкций при реновации здания ресторана «Бочка» в г. Пенза / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2018. – №8. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/stroitelnye-konstrukciizdaniya-i-sooruzheniya/8.14/at_download/file
7. Зернов, В.В. Усиление железобетонных перекрытий с сосредоточенными нагрузками нагрузкой / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, В.И. Гераськин // Моделирование и механика конструкций. – 2015. – №1. – URL: <http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/stroitelnye-konstrukciizdaniya-i-sooruzheniya/usilenie-zhelezobetonnyh-perekrytii-s-sosredotochennyminagruzkami/view>

References

1. Shein, A.I. Regulatory documents and regulations in ensuring the reliability of buildings and structures / A.I. Shein, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, I.V. Zernov // Regional architecture and engineering. – 2017. – No.3 (32). – P.94–98.
2. Shein, A.I. Experience of inspection of buildings and structures / A.I. Shein, S.V. Bakushev, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – No. 5. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukciizdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file
3. Zernov, V.V. The experience of using the load-bearing capacity of a truss during the reconstruction of a production shop / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2018. – No.7. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomerazhurnala/no7/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/7.20/at_download/file
4. Zernov, V.V. Step-by-step reinforcement of building structures of the aboveground part of the gallery of sand and crushed stone supply of the RBU / V.V. Zernov, M.B. Zai-

tsev, Ya.A. Azimova // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – No.3. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomerazhurnala/no3/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/3.24/at_download/file

5. Shein, A.I. The influence of structural and operational failures on the durability of building structures / A.I.Shein, V.V.Zernov, M.B.Zaitsev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No.2. – P.64–71

6. Zernov, V.V. The option of replacing load-bearing building structures during the renovation of the building of the restaurant «Barrel» in Penza / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2018. – No.8. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/stroitelnye-konstrukciizdaniya-i-sooruzheniya/8.14/at_download/file

7. Zernov, V.V. Reinforcement of reinforced concrete floors with concentrated loads by load / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, V.I. Geraskin // Modeling and mechanics of structures. – 2015. – No. 1. – URL: <http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/stroitelnye-konstrukciizdaniya-i-sooruzheniya/usilenie-zhelezobetonnyh-perekrytii-s-sosredotochenyminagruzkami/view>

УДК 625.745.1:691

DOI 10.54734/20722958_2022_2_82

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Тарасеева Нелли Ивановна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Геотехника
и дорожное строительство»
E-mail: gds@pguas.ru

Крылов Александр Сергеевич,
магистрант
E-mail: gds@pguas.ru

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

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,
тел.: (84722) 30-99-47

Кузнецов Дмитрий Алексеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автомобильные
и железные дороги»
E-mail: roads-bstu@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

Taraseeva Nelli Ivanovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Geotechnical engineering
and traffic construction»
E-mail: gds@pguas.ru

Krylov Aleksander Sergeevich,
Undergraduate
E-mail: gds@pguas.ru

*Belgorod state technological university
named after V.G. Shukhov*

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,
tel.: (84722) 30-99-47

Kuznetsov Dmitri Alekseevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Roads and railroads»
E-mail: roads-bstu@yandex.ru

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОСНОВЫ РАЗРУШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

Н.И. Тарасеева, А.С. Крылов, Д.А. Кузнецов

Определены причины, приводящие к практической невозможности эксплуатации мостов: местная коррозия арматуры, ослабляющая конструкцию несущей балки пролетного строения; изменение структуры в результате реакции щелочи с заполнителем в бетоне и др. Установлено, что проникновение агрессивных солей в структуру бетона начинается с поверхности; вредное воздействие продолжается внутри; время проникновения зависит от концентрации хлоридов, контактирующих с поверхностью бетона, а также от проницаемости бетона и относительной влажности окружающей среды. Выявлена связь ухудшения технологических и эксплуатационных показателей качества бетона и арматуры с образованием карбонатов и последующим разрушающим действием хлоридов. Показано, что при планировании зимнего содержания необходимо учитывать не только технологическое, но и физико-химическое воздействие применяемых материалов на основные конструкции транспортных сооружений.

Ключевые слова: автомобильные дороги, транспортные сооружения, разрушение, классификация, оценка, безопасность

PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES AND BASIS OF DESTRUCTION OF TRANSPORT STRUCTURES ON HIGHWAYS

N.I. Taraseeva, A.S. Krylov, D.A. Kuznetsov

The reasons leading to practical inability of operating bridges are determined: local reinforcement corrosion which weakens the structure of the supporting beam of the superstructure; change in the structure as a result of the reaction between alkali and aggregate in concrete, etc. It has been established that the penetration of aggressive salts into the structure begins from the surface; their

harmful effects continue inside the concrete; penetration time depends on the concentration of chlorides in contact with the concrete surface, as well as on the permeability of the concrete and the relative humidity of the environment. The relationship between the violation (deterioration) of technological and operational quality indicators of concrete and reinforcement with the formation of carbonates and the subsequent destructive effect of chlorides is revealed. It is shown that planning winter maintenance, it is necessary to take into account not only the technological, but also the physico-chemical impact of the materials used in the main structures of transport facilities.

Keywords: highways, transport facilities, destruction, classification, assessment, safety

Сопротивление мостовых сооружений разрушению определяется тремя основными факторами: свойствами материалов сооружения, напряженно-деформированным состоянием элементов сооружения, воздействием окружающей эксплуатационной среды. Все эти факторы в технологическом и эксплуатационном периодах жизненного цикла сооружения изменяются с течением времени, влияя друг на друга.

Свойства материала, определяющие сопротивляемость мостовых конструкций разрушению, зависят от:

- 1) исходных параметров материала;
- 2) модификации характеристик и свойств исходных материалов под влиянием технологической обработки в процессе изготовления конструкций (бетонирование, сварка, механическое деформирование);
- 3) изменения в процессе эксплуатации.

Первый фактор определяет исходную сопротивляемость материала воздействию нагрузки и эксплуатационной среды в заданных условиях, а второй и третий – характеризуют степень изменения этой сопротивляемости, поскольку эти причины могут как понижать, так и повышать её. Технологические изменения происходят в течение коротких, по сравнению с эксплуатационными, интервалов времени. Особенно значительное изменение свойств материала происходит при совместном воздействии нагрузки и эксплуатационной среды [1].

Напряженно-деформированное состояние сооружения определяется расчетными нагрузками на стадии проектировании с учётом отклонений, вызванных технологическими и эксплуатационными причинами.

Воздействие эксплуатационной среды (ЭС) определяется свойствами последней, характеризующими влияние внешних факторов (агрессивность атмосферы над проезжей частью, под мостовым сооружением, климатические воздействия, воздействие воды и льда, инженерно-геологические свойства грунтов, технические и технологические факторы эксплуатации и содержания элементов транспортного сооружения и т.д.). Степень влияния среды зависит от технологических факторов (обеспечение условий контакта конструкции с элементами ЭС – температуры, давления, скорости изменения среды), от наличия или отсутствия необходимой защиты от воздействия внешних факторов, от эксплуатационных изменений в составе и характере воздействия внешней среды.

Балки пролетных строений могут быть изготовлены из дерева, стали или железобетона. Каждый материал имеет присущие ему проблемы эксплуатации и содержания. При исследовании проезжей части моста уделяли особое внимание обеспечению водоотвода и наружным разрушениям. В железобетонных пролетных строениях часто обнаруживаются недостатки в водоотводе и протекании гидроизоляции балластного корыта, что приводит к излишнему насыщению бетона водой, замораживанию в холодный период и, как следствие, коррозии арматуры при оттаивании. Серьёзные проблемы создает применение на мостах с цементобетонным покрытием солей для борьбы с образованием наледи.

Как известно, использование хлоридов непосредственно на инженерных сооружениях запрещено, однако при перемещении транспортных средств по автомобильной дороге возможно попадание солей в рифленую часть колеса и перенос вредных примесей на мостовое полотно, на поверхности которого в процессе эксплуатации возможно появление незначительных трещин, сколов и других повреждений. Также на состояние внешних и внутренних частей конструктивных элементов транспортного

сооружения влияют различные виды выветривания, например физическое и химическое. Физическое выветривание происходит в результате действия сезонного изменения температур и, как следствие, температурного расширения/уменьшения материалов и конструкций, в объеме появляются мелкие трещины в защитном слое бетона основных несущих конструктивных элементов или цементобетонном/асфальтобетонном покрытии проезжей части моста. В случае попадания влаги из атмосферных осадков или техногенных воздействий замерзание при понижении температуры приводит к увеличению объемных деформаций, что делает ответственные конструкции более уязвимыми.

Воздействие хлоридов на железобетонные и металлические части инженерных сооружений как проявление химического выветривания наблюдается в условиях контакта со средой, отличающейся высоким их содержанием, такой, как морская вода, или при использовании химических противогололедных материалов (ПГМ), защищающих от образования наледи проезжую часть [2].

Проникновение агрессивных солей в конструкцию начинается с поверхности, и вредное воздействие продолжается внутри бетона. Время проникновения зависит от следующих факторов: концентрация хлоридов, контактирующих с бетонной поверхностью; проницаемость бетона; наблюдаемая относительная влажность. Хлор попадает в бетон и достигает арматурных стержней, снимает с металлических элементов пассивирующую пленку оксидов железа, в результате металлические стержни подвергаются процессам коррозии. Коррозия протекает при сочетании двух факторов, причем они оба необходимы для этого процесса: первый – это хлориды, которые снимают с арматурных стержней пассивирующую пленку оксидов железа, и второй – это влага, содержащая кислород. Соли, используемые зимой на дорогах в качестве противообледенительных реагентов, попадают в глубь бетонной конструкции во время таяния, вызывают коррозию и разрушение. Как только этот процесс начнется, в каких бы транспортно-эксплуатационных условиях ни находилось сооружение, коррозия будет продолжаться с увеличенной скоростью, поскольку образуются легкодоступные пути для проникновения агрессивных веществ в виде мелких и больших трещин, сколов. Концентрация хлоридов, поддерживающая коррозию арматурных стержней, прямо пропорциональна pH бетона: чем выше щелочность, тем больше концентрация хлоридов, которая требуется для начала процесса коррозии. Учитывая теоретические данные и результаты исследования физико-химических процессов, можно связать нарушение (ухудшение) технологических и эксплуатационных показателей качества бетона и арматуры с образованием карбонатов и последующим разрушающим действием хлоридов. При формировании солей угольной кислоты pH бетона снижается, что делает его уязвимым даже в тех частях сооружения, где концентрация хлоридов сравнительно невелика.

Регулярный осмотр состояния деформационных швов, покрытия и подходов является неотъемлемой частью мероприятий по содержанию моста, который позволяет выполнить оценку и своевременно либо разработать предупредительные и защитные мероприятия, либо усилить или заменить разрушающиеся конструктивные элементы.

Обследование моста в г. Пензе выявило несколько причин, способных привести к нарушению его несущей способности и ограничению эксплуатации: значительные разрушения ригеля, что спровоцировано реакцией между щелочью, содержащейся в цементе, и заполнителем, а также местную коррозию арматуры, ослабляющую конструкцию несущей балки пролетного строения (рис. 1).

Взаимодействие щелочей цемента с заполнителями бетона может приобретать существенные масштабы и приводить к серьезному разрушению бетонных элементов транспортных сооружений. Некоторые типы заполнителей, например, содержащие реакционноспособный кремнезем, взаимодействуют с двумя щелочами калия и натрия, которые находятся в цементе, или, как говорилось выше, солями этих металлов, которые поступают извне в форме хлорида натрия (NaCl) (противообледенительные реагенты, морская вода). В результате реакции образуется гель, который сильно расширяется в присутствии влаги и создает силы, разламывающие бетон

вокруг этих соединений. Взаимодействие щелочей цемента с заполнителями бетона [3] представляет собой медленно протекающий гетерогенный процесс, поскольку он связан с составом заполнителей, содержащих аморфный кремнезем. В результате реакции в подобных условиях образуются силикаты натрия и гидратированный калий, отличающиеся чрезвычайной объемистостью. Реакции взаимодействия щелочей цемента с заполнителями бетона проявляются в защитном слое конструктивного элемента. При этом на поверхности появляются микро- и макротрещины или даже начинается подрыв небольших участков бетона над областями, где в заполнителях имеется реакционноспособный кремнезем (явление вспучивания). Как только начинается разрушение бетона, ускорить реакцию способна дополнительная влажность как природного, так и техногенного происхождения (например, промыв отбойников от грязи). Дополнительный источник риска – циклы заморзания и оттаивания, характерные для климата средней полосы России.



Рис. 1. Дефекты конструкции моста: разрушение защитного слоя бетона, скол, коррозия арматуры

Негативное воздействие льда проявляется только в тех случаях, когда вода в жидкой фазе проникает внутрь бетона. Это не означает, что бетон должен быть абсолютно сухим, однако нельзя допускать, чтобы уровень влажности превышал определенную величину, называемую «критическим насыщением». Следовательно, количество воды в порах должно быть меньше данной величины; расширившись при превращении в лед, она должна оставаться в пределах полостей и не создавать напряжения. Однако если вода заполняет или почти заполняет весь объем пор, а затем замерзает, лед начнет ломать бетон, создавая внутреннее давление. Чтобы ограничить негативные последствия влияния низких температур, необходимо принять меры к сокращению капиллярной микропористости и стимулировать макропористость (чтобы размеры полостей составили 100–300 мкм). Для этого при приготовлении бетона используют воздухововлекающие добавки, которые поддерживают соотношение между водой и цементом на низком уровне, используют морозостойкие заполнители.

В автомобильно-дорожных мостах выщелачивание раствора является следствием повреждения дорожного покрытия, а именно трещин и сдвигов в асфальтобетонном слое, а также закупорки водоотводных трубок и нарушения работы водоотводных устройств (рис. 2, 3).



Рис. 2. Выщелачивание бетона:
а – близ водоотводной трубки; б – на поверхности бетона массивной опоры (быка)
(автодорожный мост, г. Пенза)



Рис. 3. Выщелачивание извести из бетона на монолитных участках сопряжения балок
пролетного строения

Явление выщелачивания представляет собой удаление цементного камня вследствие механического воздействия воды на бетон (см. рис. 2, 3). Процесс усиливается, если вода отличается слабокислой реакцией, что может быть вызвано содержащейся в ней агрессивной углекислотой, которой особенно много в чистой воде из природных источников (родники, горные реки), также этому способствуют промышленные выбросы, или серная кислота органического происхождения, которая образуется в сточных водах канализационных систем.

Арматура в бетоне играет исключительно важную роль, так как воспринимает растягивающее напряжение от внешней нагрузки, обеспечивая прочность конструкции, поэтому коррозия недопустима.

Под влиянием щелочной среды цементного бетона ($\text{pH}=12,5-12,6$) стальная арматура пассивируется, т.е. защищается от окисления. Однако щелочность защитного слоя бетона в результате воздействия воды и содержащихся в воздухе двуокисей углерода CO_2 и серы SO_2 постепенно снижается, и, если её значение оказывается ниже значений $\text{pH}=9,5$, в арматуре начинаются окислительные процессы.

При анализе агрессивных воздействий на железобетонные конструкции учитываются факторы, сопутствующие коррозии арматуры, и разрабатываются соответствующие защитные мероприятия [4, 5]. Например, использование углеродистого тканого холста внизу мостового полотна не только показало улучшение изоляционной способности частично разрушенной плиты, но и позволило увеличить сопротивление нагрузкам в растянутой нижней зоне (рис. 4).



Рис. 4. Использование углеродистого тканого холста для усиления мостового полотна

Дефекты выщелачивания бетона ликвидируют после вскрытия балласта путем восстановления гидроизоляционного слоя и очистки водоотводных трубок. Таким образом, организовать защиту бетона можно как на стадии проектирования, определяя материал конструкций с учетом условий эксплуатации, что немаловажно, так и непосредственного на стадии эксплуатации и содержания транспортного сооружения. Качественно выполненные текущие осмотры позволяют своевременно предупредить появление дефектов, приводящих впоследствии к разрушению.

Выводы

Изучены физико-химические процессы и явления, приводящие к разрушению транспортных сооружений. Выявлено, что наличие повреждений в мостовом полотне, гидроизоляции и железобетоне основных элементов сооружения приводит к проникновению агрессивных компонентов вглубь и возникновению коррозии, что в дальнейшем способно спровоцировать ослабление и даже разрушение несущих конструкций пролетных строений, ригелей, опор. Поэтому следует с осторожностью выбирать ПГМ для транспортных сооружений, поскольку большинство запатентованных противогололедных материалов содержат в своем составе хлориды, которые изменяют температуру плавления льда и достаточно активно могут применяться на автомобильных дорогах разного назначения или городских улицах, но ограниченно – на мостах и путепроводах. Выявлено, что даже незначительное количество агрессивного для металлических элементов реагента может привести к опасным последствиям, поэтому важно применять композиции, содержащие ингибиторы коррозии. Показано при планировании зимнего содержания учитывать не только технологическое, но и физико-химическое воздействие используемых материалов на основные конструкции транспортных сооружений.

Таким образом, выполнение работ по содержанию транспортных сооружений в полном объеме и с высоким качеством замедляет процесс ухудшения их транспортно-эксплуатационных показателей и увеличивает срок службы.

Список литературы

1. Аварии мостовых сооружений и их причины / С.А. Дергунов, А.Б. Сатюков, А.Ю. Спирина, С.В. Сериков // Вестник КГУСТА. – 2019. – № 2 (64). – С. 289–294.

2. Ковалев, Н.С. Улучшение свойств асфальтобетона и противогололедных асфальтобетонных покрытий: монография / Н.С. Ковалев. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2017. – 183 с.
3. Вернигорова, В.Н. Коррозия строительных материалов: монография / В.Н. Вернигорова, Е.В. Королев, А.И. Еремкин, Ю.А. Соколова. – М.: Изд-во «Палеотип», 2007. – 176 с.
4. Тарасеева, Н.И. Применение современных конструктивных решений проектирования при ремонте мостовых сооружений / Н.И. Тарасеева, А.А. Кузнецов, А.В. Калашников // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №3.
5. Воскресенский, А.В. Влияние производственных факторов на долговечность железобетонных конструкций / А.В. Воскресенский, Н.И. Тарасеева, М.В. Рогулина // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2014. – № 09. – С. 49–53.

References

1. Accidents of bridge structures and their causes / S.A. Dergunov, A.B. Satyukov, A.Yu. Spirina, S.V. Serikov // Vestnik KGUSTA. – 2019. – No. 2 (64). – P. 289–294.
2. Kovalev, N.S. Improving the properties of asphalt concrete and anti-icing asphalt concrete coatings: monograph / N.S. Kovalev. – Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2017. – 183 p.
3. Vernigorova, V.N. Corrosion of building materials: monograph / V.N. Vernigorova, E.V. Korolev, A.I. Eremkin, Yu.A. Sokolova. – M.: Paleotype Publishing House, 2007. – 176 p.
4. Taraseeva, N.I. Application of modern constructive design solutions for the repair of bridge structures / N.I. Taraseeva, A.A. Kuznetsov, A.V. Kalashnikov // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – №3.
5. Voskresensky, A.V. Influence of production factors on the durability of reinforced concrete structures / A.V. Voskresensky, N.I. Taraseeva, M.V. Rogulin // New University. Series: Engineering sciences. – 2014. – No. 09. – P. 49–53.

УДК 69

DOI 10.54734/20722958_2022_2_89

ООО «Современные строительные решения»

Россия, г.Пенза, ул.Аксакова 38г.

Саденко Денис Сергеевич,
инженер, кандидат технических наук
E-mail: sadenko_d@list.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

Гарькин Игорь Николаевич,
доцент кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

LLC «Modern building solutions»

Россия, г.Пенза, ул.Аксакова 38г.

Sadenko Denis Sergeevich,
Leading engineer, Candidate of Sciences
E-mail: sadenko_d@list.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

Garkin Igor Nikolaevich,
Associate Professor of the department
«Quality Management and Construction Technologies»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

Ariskin Maksim Vasilevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building Constructions»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

ОСНОВЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин, М.В. Арискин

На примере Пензенской области приводятся основы научно-технического сопровождения строительства социально значимых объектов. Дается анализ несущей способности плиты перекрытия с вырезом с последующим проведением натурных испытаний. По результатам исследований разработаны рекомендации по рациональной эксплуатации социально значимых объектов.

Ключевые слова: строительство, сопровождение, методы исследований, плиты перекрытия, вырезы, несущая способность, безопасность эксплуатации

BASICS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT OF CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS

D.S. Sadenko, I.N. Garkin, M.V. Ariskin

Based on the example of the Penza region, the basics of scientific and technical support for the construction of socially significant facilities are given. An analysis of the bearing capacity of a floor slab with a cutout is given, followed by field tests. Based on the results of the research, recommendations are developed for the operation of socially significant facilities.

Keywords: construction, maintenance, research methods, floor slabs, cutouts, load-bearing capacity, operational safety

Постановка задачи. При производстве строительно-монтажных работ нередко возникает необходимость оценки реальной несущей способности строительных конструкций (например, в проектной и технической документации на ж/б изделия не всегда могут содержаться точные сведения об их реальных характеристиках) [1..3]. Поэтому является актуальным проведение экспериментальных исследований по оценке несущей способности ж/б плит перекрытия с вырезом в условиях нормального функционирования и возможности их безопасной эксплуатации на объектах

строительства (разработка модели в комплексе SCAD [4]; проведение натурных испытаний (нагружение плиты); сопоставление экспериментальных и теоретических результатов).

Теоретические и натурные исследования. В результате теоретических исследований в комплексе SCAD (рис. 1, 2; изополя перемещений для плиты 5960 мм) было выявлено, что напряжения в плите не увеличиваются, за исключением напряжений t_{xy} ; напряжения s_x локально выросли в 2,8 (140/49) раза, а s_y – в 1,19 (156/131) раза. Наиболее опасными являются касательные напряжения, которые возникают локально и могут привести к локальным разрушениям плиты в месте реза (хотя они не превышают расчетных сопротивлений). Заполнение отверстий в месте реза является обязательным условием для предотвращения скалывания элемента.

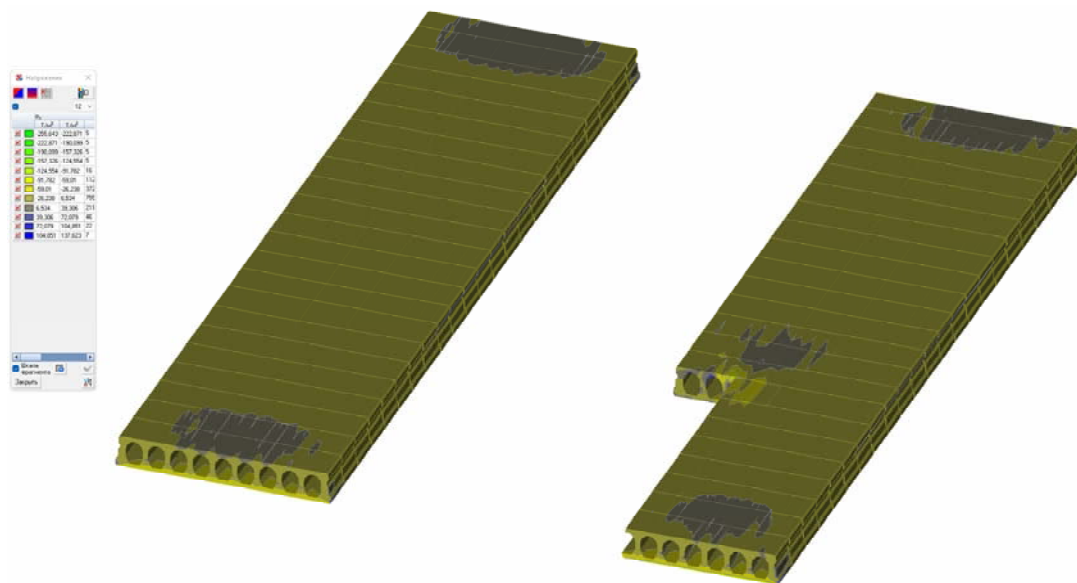


Рис. 1. Напряжения s_x

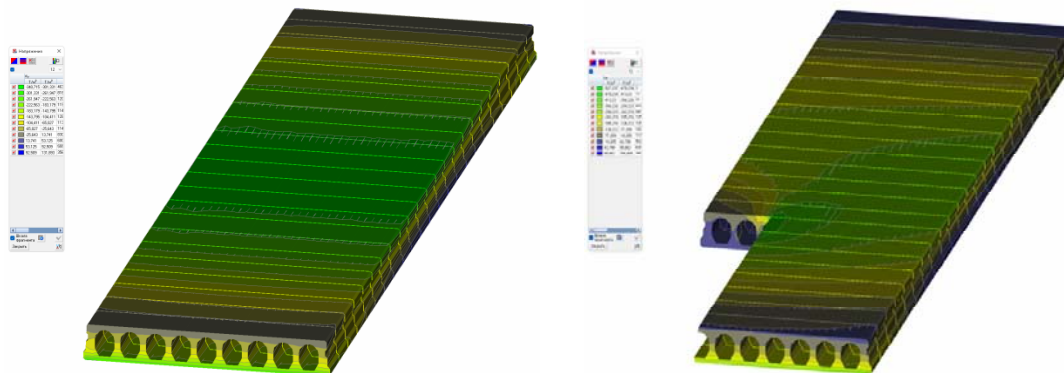


Рис. 2. Напряжения s_y

Натурные испытания (рис. 3) проводились по следующему алгоритму:

- для соответствия требованиям нормативных документов была подготовлена ж/б плита перекрытия с вырезом ПБ – 8.1 с установкой на опоры и обязательным выдерживанием при положительной температуре не менее 24 часов;
- в местах проведения испытаний визуально осмотрено состояние ж/б плиты с вырезом на предмет наличия дефектов и повреждений в конструктивных элементах, узлах, стыках и соединениях (наклонные, вертикальные и горизонтальные трещины, нормальные трещины в растянутой зоне и наклонные трещины у опор, отслоение или разрушение защитного слоя бетона);

- выполнены обмерочные работы испытываемой конструкции на соответствие проектной документации и сравнение их с уже установленными на объекте;
- произведена разметка площадок установки грузов;
- подготовлены и взвешены штучные грузы в виде блоков ФБС;
- проведены испытания бетона в конструкции плиты перекрытия неразрушающим ультразвуковым методом.



Рис. 3. Проведение натурных испытаний

Испытание плиты перекрытия с вырезом ПБ 8.1н ПБ60-15-8К7-30-1 происходило согласно рекомендуемой схеме нагружения. Загружение участков конструкций осуществлялось поэтапно контрольной нагрузкой согласно табл. 1 и с обязательным соблюдением следующих правил:

- для балочных изделий длина грузов в направлении пролета не должна превышать $1/6$ пролета;
- нагружение следует производить в направлении от опор к середине, симметрично относительно середины пролета;
- между штучными грузами по всей высоте рядов должны быть зазоры не менее 50 мм.

Данные нагрузки даны в соответствии с СП «Нагрузки и воздействия», а также с учетом конструктивных особенностей плиты перекрытия с вырезом ПБ 8.1н ПБ60-15-8К7-30-1.

При составлении методики проведения испытаний значение контрольной нагрузки для проверки прочности определялось умножением нормативной нагрузки на коэффициент безопасности C , соответствующий несущей способности конструкции и определенный с учетом расчетных сопротивлений материалов и принятой схемы нагружения (значение коэффициента безопасности C для изгибаемых конструкций плит из тяжелого бетона с армированием рабочей (продольной) арматурой класса А500 составляет 1,3 (ГОСТ 8829-2018)).

Т а б л и ц а 1

Значения контрольной нагрузки с учетом коэффициента безопасности,
при поэтапном нагружении строительной конструкций

№ п/п	Место- нахождение конструкции	Нормативная нагрузка по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»		По требованию ГОСТ 8829-2018 по назначению контрольных нагрузок, с коэффициентом безопасности к нагрузке $C = 1,3$, кПа (кгс/м ²)	Предельно допустимая нагрузка согласно проекту 123-КЖ.И6 (ООО «Полиспроект»), кПа (кгс/м ²)	Поэтапное нагружение строительных конструкций, кПа (кгс/м ²)			
		Нормативное значение равномерно распределенных кратковременных нагрузок для квартир жилых зданий п. 8.3	Коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,3$			1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Производст- венный стенд	1,5 (150)	1,95	2,535	8,0	3,4 (300)	6,8 (600)	8,84 (800)	10,0 (1000)
2	Общая нагрузка при испытании нагружением	Согласно проектной и нормативной документации на площадь плиты без выреза – 7,91, кг				2689	5378	6991,4	8604
		Фактическая нагрузка на общую площадь, кг				2640	5460	7400	9340

Каждый этап делится на ступени (доли), каждая из которых не должна превышать 10 % контрольной нагрузки по прочности и по образованию и ширине раскрытия трещин, а также 20 % контрольной нагрузки по жесткости. После приложения каждой доли нагрузки испытываемые конструкции следует выдерживать под нагрузкой не менее 10 мин. Выдерживание конструкций после загрузки по каждому этапу должно составлять не менее 30 минут.

В случае раскрытия трещин более 0,4 мм, а также при достижении предельно допустимого прогиба $f_u \geq 0,005$ необходимо срочно приостановить нагружение, зафиксировать нагрузку и произвести разгрузку конструкций (предельное значение прогиба в середине пролета составляет 30 мм; приложение Д.2 СП 20.13330.2016 СП «Нагрузки и воздействия» для испытываемой конструкции).

Для загрузки конструкции с целью равномерного распределения веса по всей площади использовались следующие изделия:

1 этап. Нагружение: ФБС 12.3.3-Т m 240 кг – 11 шт. = 2640 кг;

2 этап. Нагружение: ФБС 9.4.6-Т 470 кг – 6 шт. = 2820 кг;

3 этап. Нагружение: ФБС 24.3.6-Т 970 кг – 2 шт. = 1940 кг;

4 этап. Нагружение: ФБС 24.3.6-Т 970 кг – 2 шт. = 1940 кг.

Итого суммарная нагрузка на площадь плиты $S=7,91$ м² должна была составлять 9340 кг (до разрушения).

График проведения испытания представлен в табл. 2.

Сроки проведения испытаний

№ п/п	Наименование работ	1-е сутки (раб. день)	2-е сутки (раб. день), мин								
			Загружение / Выдерживание		Загружение / Выдерживание		Загружение / Выдерживание		Загружение / Выдерживание		Разгружение
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Подготовительные работы										
2	1-й этап		10	10							
3	2-й этап				10	10					
4	3-й этап						30	30			
5	4-й этап								30	30	
6	Разгружение										

После загрузки конструкций во время выдержки под нагрузкой, указанной в табл. 1, по каждому этапу осуществлялись: фиксирование прогиба конструкции под нагрузкой; тщательный осмотр состояния плиты перекрытия на предмет возникновения дефектов и повреждений (наклонные, вертикальные и горизонтальные трещины, нормальные трещины в растянутой зоне и наклонные трещины у опор, отслоение или разрушение защитного слоя бетона).

После выдерживания нагрузки по 3-му этапу в течение 30 минут был произведен осмотр конструкции и дальнейшее поэтапное ее разгружение в обратном порядке. Нагружение и фиксация прогибов конструкции происходило под контролем специалистов, представителей заказчика и технического надзора. Результаты проведения испытаний ж/б плиты перекрытия представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Проведение натурных испытаний ж/б плиты перекрытия
с контролем основных параметров

№ п/п	Кол-во нагружаемых грузов	Контролируемые показатели			
		Суммарная нагрузка на плиту перекрытия, кг	Новые дефекты и повреждения	Нормальные трещины в растянутой зоне	Фактический прогиб, мм
1	2	3	4	5	6
1 этап (ФБС 12.3.3-Т $m_{шт}=240$ кг)					
1	1 блок	240	не выявлены	не выявлены	
2	2 блока	480	не выявлены	не выявлены	
3	3 блока	720	не выявлены	не выявлены	
4	4 блока	960	не выявлены	не выявлены	0,1
5	5 блоков	1200	не выявлены	не выявлены	0,2
6	6 блоков	1440	не выявлены	не выявлены	0,32
7	7 блоков	1680	не выявлены	не выявлены	0,71
8	8 блоков	1920	не выявлены	не выявлены	0,95
9	9 блоков	2160	не выявлены	не выявлены	1,25
10	10 блоков	2400	не выявлены	не выявлены	1,52
11	11 блоков	2640	не выявлены	не выявлены	1,95

1	2	3	4	5	6
Осмотр конструкции после выдержки под нагрузкой					
2 этап (ФБС 9.4.6-Т $m_{шт}=470$ кг)					
12	1 блок	3110	не выявлены	не выявлены	
13	2 блока	3580	не выявлены	не выявлены	2,43
14	3 блока	4050	не выявлены	не выявлены	2,75
15	4 блока	4520	не выявлены	не выявлены	3,2
16	5 блоков	4990	не выявлены	не выявлены	3,9
17	6 блоков	5460	не выявлены	не выявлены	8,4
Осмотр конструкции после выдержки под нагрузкой					
3 этап (ФБС 9.4.6-Т $m_{шт}=970$ кг)					
18	1 блок	6430	не выявлены	не выявлены	12,7
19	2 блока	7400	не выявлены	не выявлены	16,0
		Σ7400			16,0

ВЫВОДЫ

Показано:

- деформации во всех плоскостях не превышают предельно допустимых значений, установленных нормативной документацией;
- напряжения в плите не увеличиваются, за исключением напряжений t_{xy} ; напряжения s_x локально выросли в 2,8 раза, а s_y – в 1,19 раза (заполнение бетоном места отпила является обязательным);
- при вырезе части плиты преднапряжение в канатах снижается на 4-6 % (возможно появление наклонных трещин в месте отпила, рекомендуется снизить эксплуатационную расчетную нагрузку на плиту на 10-15 %, т.е. до 680-720 кг/м²);
- предельная нагрузка, при которой начинаются разрушения конструкции, составит 1080-1200 кг/м².

Установлено:

- класс бетона по прочности соответствует проектным значениям – В30;
- в процессе загрузки дефекты, влияющие на снижение несущей способности, не выявлены;
- максимальный фактический прогиб f после загрузки 3-го этапа при фактической нагрузке 935,5 кг на 1 м² (коэффициент безопасности к нагрузке – 1,3) для ж/б плиты составил 16 мм (требование пп. 15.1.1 СП 20.13330.2016 ($f \leq f_u$) выполняется).

Таким образом, на основе полученных данных не потребуются дальнейшее проведение дорогостоящих и ресурсоемких работ по приведению конструкций в нормативное техническое состояние [5...7].

Список литературы

1. Логанина, В.И. Обеспечение качества и повышение конкурентоспособности строительной продукции: монография / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов. – Пенза, 2014. – 176 с.
2. Саденко, Д.С. Причины дефектов при производстве монолитных железобетонных конструкций, связанных с коррозией бетона / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4 (45). – С. 105–109.
3. Гарькин, И.Н. Деформативно-прочностные свойства монолитных железобетонных перекрытий / И.Н. Гарькин, Д.С. Саденко // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42). – С. 126–129.
4. Арискин, М.В. Анализ причин падения башенного крана на основе построения модели в SCAD 11.5 / М.В. Арискин, И.Н. Гарькин // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10–2. – С. 243–247.

5. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Seylaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. –2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
6. Гарькина, И.А. Из опыта разработки материалов специального назначения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 235.
7. Garkina, I. Tasks of building materials from the viewpoint of control theory / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 737. – P. 578–582.

References

1. Loganina, V.I. Ensuring quality and improving the competitiveness of construction products: monograph / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov. – Penza, 2014. – 176 p.
2. Garkin, I.N. Deformative-strength properties of monolithic reinforced concrete ceilings / I.N. Garkin, D.S. Sadenko // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1 (42). – P. 126–129.
3. Sadenko, D.S. Causes of defects in the production of monolithic reinforced concrete structures associated with concrete corrosion / D.S. Sadenko, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 4 (45). – P. 105–109.
4. Ariskin, M.V. Analysis of the reasons for the fall of a tower crane based on the construction of a model in SCAD 11.5 / M.V. Ariskin, I.N. Garkin // Fundamental research. – 2016. – No. 10–2. – P. 243–247.
5. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Seylaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. –2016. – Vol. 11, No. 11. – P. 2461–2464.
6. Garkina, I.A. From the experience of developing materials for special purposes / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // Modern problems of science and education. – 2014. – No. 5. – P. 235.
7. Garkina, I. Tasks of building materials from the viewpoint of control theory / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 737. – P. 578–582.

УДК 624.01

DOI 10.54734/20722958_2022_2_96

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Мартышкин Даниил Олегович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: historical95@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

Ariskin Maksim Vasilevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building Structures»
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Martyshkin Daniil Olegovich,
Postgraduate of the department «Building
Structures»
E-mail: historical95@mail.ru

СОЕДИНЕНИЯ НА ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБАХ В ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин

Предложена методика определения несущей способности соединений деревянных конструкций с применением клеенных стеклопластиковых шайб. Представлены результаты испытаний образцов. Показана высокая несущая способность соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, стеклопластик, шайба, несущая способность

CONNECTIONS ON GLUED FIBERGLASS WASHERS IN WOODEN STRUCTURES

M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin

Method of determination bearing capacity of connections of wooden structures using glued fiberglass washers is presented. Results of samples tests are given. High bearing capacity of wooden structures connection is shown.

Keywords: wooden structures, connection, fiberglass, washer, bearing capacity

Введение. Соединения деревянных конструкций чаще всего выполняются с применением металлических вкладышей (гвозди, нагели, шпонки, шайбы, металлические зубчатые пластины), которые вставляются, ввинчиваются, впрессовываются или клеиваются в деревянные элементы, что обеспечивает передачу усилий от одного элемента другому. Обладающие достаточно большой несущей способностью, металлические рабочие вкладыши в процессе эксплуатации подвержены коррозии, что вызывает необходимость проведения антикоррозионных мероприятий как в процессе эксплуатации, так и при изготовлении соединений.

В [1] предлагается соединение немагнитное, коррозионно-стойкое и вместе с тем достаточно прочное. В основу предлагаемого соединения положена идея передачи сосредоточенного усилия, действующего на механические вкладыши на достаточно большую площадь по сравнению с размером самой связи, при этом саму связь предлагается выполнить из материала более прочного и жесткого, чем древесина и, кроме того, химически стойкого и немагнитного. В качестве материала шайб принят стеклопластик КАСТ-В.

В [2] рассмотрено напряженно-деформированное состояние образцов с клееными стеклопластиковыми шайбами. На основе теоретических и экспериментальных

исследований показана высокая несущая способность соединения в сравнении с аналогом на клеенных металлических шайбах [3].

Ниже рассматривается методика определения несущей способности соединений деревянных конструкций, выполненных с применением клеенных стеклопластиковых шайб. Представлены результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки.

Методика определения несущей способности

В качестве материала для деревянных элементов образцов принята древесина сосны 2 сорта. Стеклопластиковые шайбы изготовлены из стеклотекстолита КАСТ-В.

Технология изготовления образцов с применением стеклопластиковых шайб описана в [1]. Форма и размер образцов назначены из схемы их испытаний на сдвиг при сжатии, с соблюдением шага расстановки шайб S_1 и S_3 . Ориентировочные размеры S_1 и S_3 приняты в зависимости от диаметра шайб ($D_{ш}$). В качестве основного образца взят дощатый элемент с размерами (a , b , c). Основные параметры испытываемых образцов показаны на рис. 1.

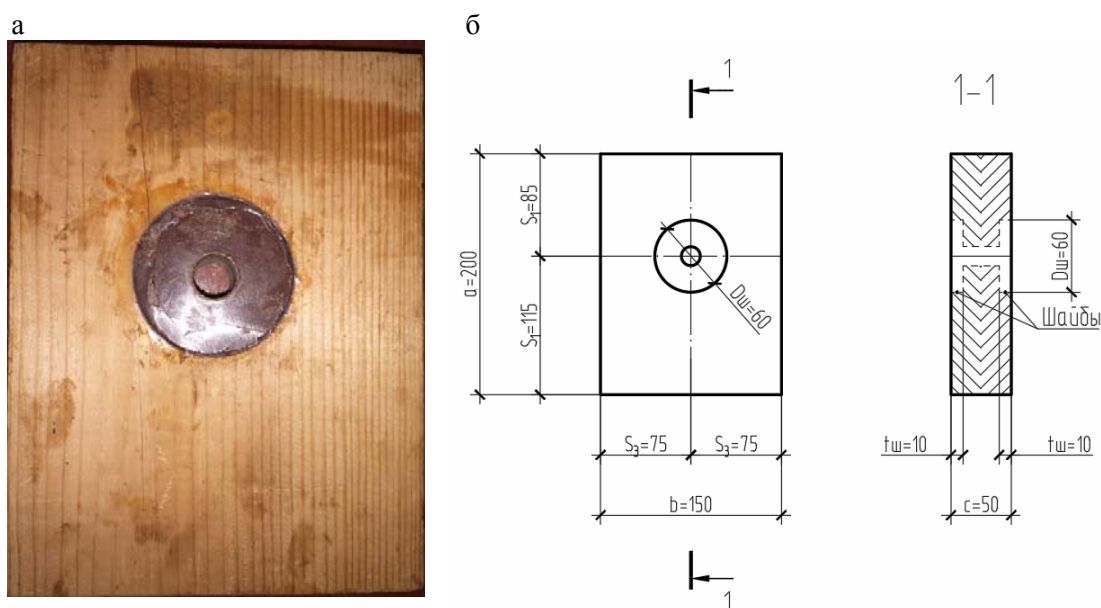


Рис.1. Образец на клеенных стеклопластиковых шайбах:
а – общий вид образца; б – размеры образца

Образцы испытывались по схеме, при которой нагружение образца производилось через стальную раму, имитирующую металлические накладные и передающую усилия на шайбы (рис. 2, 3).

Подготовка образца к испытаниям с металлической рамой включает в себя следующие операции:

- образец помещается в специальную П-образную стальную раму (см. рис. 2), через которую будет передаваться усилие на центральный болт;
- через отверстия в раме и шайбах пропускается центральный болт;
- полученная конструкция стягивается центральным болтом;
- после того как на образец устанавливаются измерительные приборы, он готов к испытаниям.

Все образцы маркировались по каждой серии. Схема маркировки показана на рис. 4.

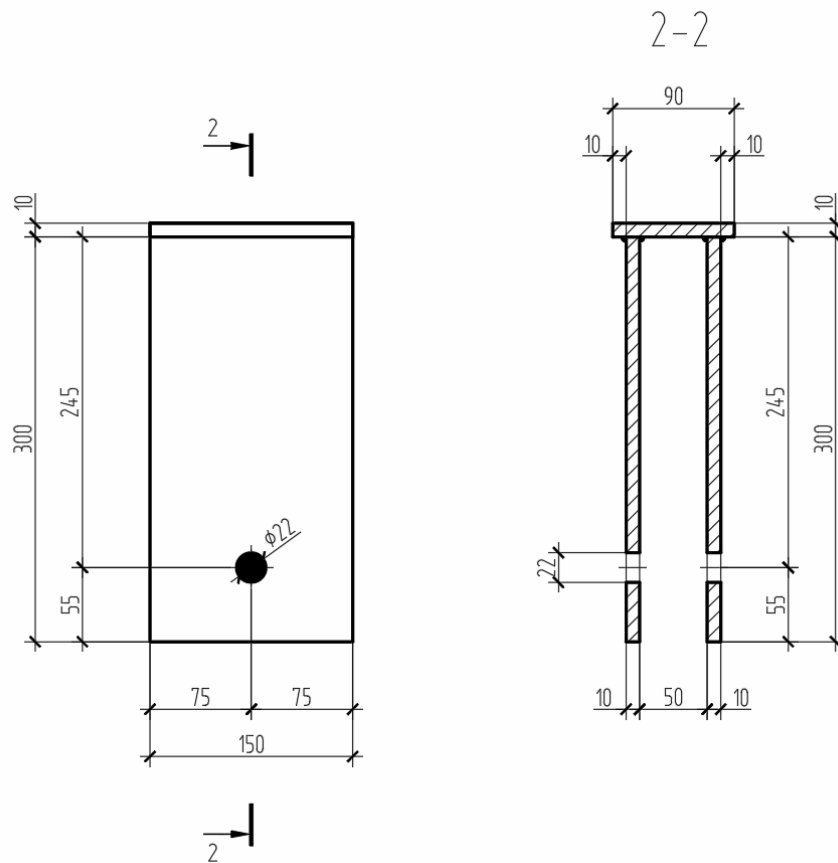


Рис. 2. Металлическая рама

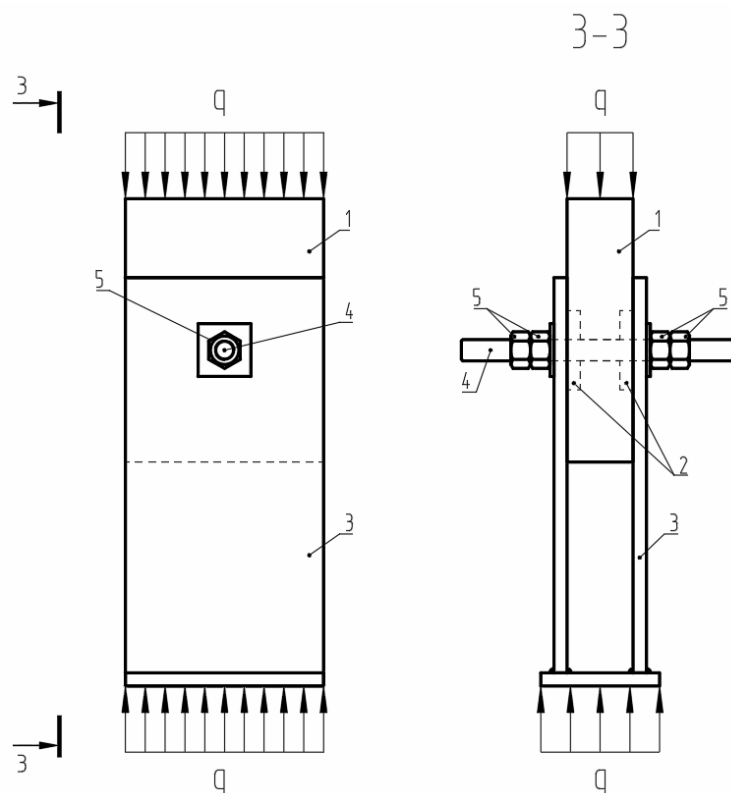


Рис. 3. Схема нагружения образца через металлическую раму:

1 – деревянный элемент; 2 – клеенные шайбы;
3 – металлическая рама; 4 – стяжной болт; 5 – гайки

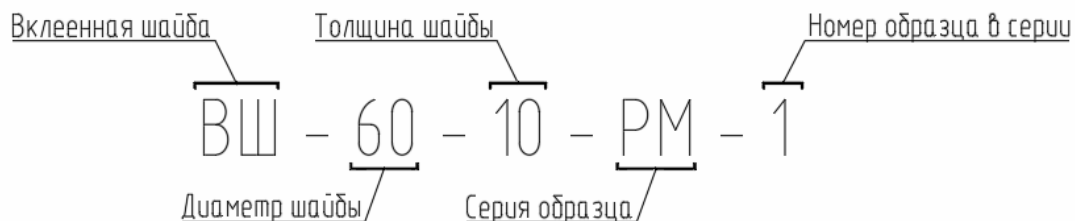


Рис. 4. Схема маркировки

Основные характеристики испытываемых образцов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики испытываемых образцов

Марка	Параметры					Кол-во образцов	Назначение серии образцов
	a , мм	b , мм	c , мм	$D_{ш}$, мм	$t_{ш}$, мм		
ВШ-60-10-РМ-1	200	150	50	60	10	5	Передача нагрузки через металлическую раму
ВШ-60-10-РМ-2							
ВШ-60-10-РМ-3							
ВШ-60-10-РМ-4							
ВШ-60-10-РМ-5							

Испытания образцов

Образцы испытывались на сжатие при нормальных температурно-влажностных условиях, т.е. при температуре 18-20°C и относительной влажности воздуха $W=60-65\%$.

Испытательная установка (рис. 5) состоит из силовой рамы, домкрата с максимальным давлением 20 МПа, устройства управления давлением 20 МПа ГТ 2.0.20, блока электронно-преобразующего ГТ 6.0.31.

а



б



Рис. 5. Испытательная установка:

а – силовая рама с домкратом и опорная площадка; б – устройство управления давлением 20 МПа ГТ 2.0.20 с блоком электронно-преобразующим ГТ 6.0.31

Передача нагрузки на образец осуществлялась гидравлическим прессом по заданному алгоритму.

Алгоритм проведения испытания состоит из 2-х этапов:

- на первом этапе для обжатия домкратом поверхности образца производится ступенчатое нагружение до 10 кН (величина ступени 1 кН, скорость нагружения 0,5 кН/с), которое выдерживается в течение 5 секунд, а затем сбрасывается до 0;
- на втором этапе происходит ступенчатое нагружение с аналогичной величиной ступени и скоростью нагружения; каждая ступень выдерживается в течение 5 секунд и повторяется непрерывно до полного разрушения образца.

Общий вид образца в испытательной установке показан на рис. 6.

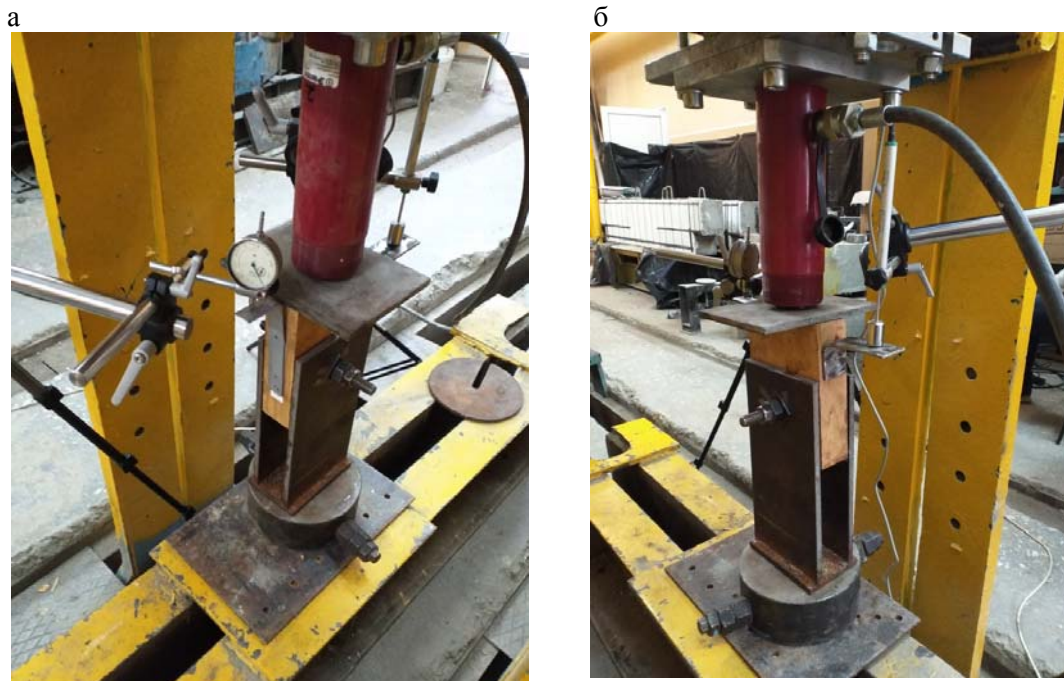


Рис.6. Общий вид образца в испытательной установке:

а – образец с закрепленным датчиком часового типа;

б – образец с электронным датчиком

Перед приложением нагрузки и в дальнейшем после каждой ступени нагружения снимались отсчёты по датчику часового типа и электронному датчику, подключенному к электронно-преобразующему блоку. Скорость нагружения принималась непрерывной и равномерной с фиксацией начального и конечного времени. В процессе испытаний осуществлялся осмотр образцов, фиксировались характер и вид их разрушения, величина разрушающей нагрузки. Результаты заносились в журнал испытаний.

Результаты испытаний

Испытание образцов проводилось возрастающей нагрузкой до их полного разрушения. За разрушающую нагрузку принималась такая ее величина, когда рост деформации сдвига в образцах в определенный интервал времени действия нагрузки происходил без заметного увеличения нагрузки.

Следует заметить, что в процессе нагружения образцов наблюдалось несколько промежуточных моментов, когда за определенное короткое время происходил скачкообразный рост деформации, без заметного увеличения нагрузки, однако это не приводило к общему разрушению образцов, а носило локальный характер. При последующем нагружении образцов нагрузка продолжала увеличиваться.

Общее разрушение образца сопровождалось интенсивным ростом сдвига деформаций без заметного увеличения нагрузки на сравнительно большом промежутке

времени. Эти деформации носили пластический характер, поскольку рост их был плавный, без скачков.

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки приведены в табл. 2, графики нарастания деформаций сдвига представлены на рис. 7. Графики отражают выраженную упругую работу древесины, и разрушение происходит хрупко, что показывает монолитность соединения.

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки

Марка образца	Диаметр шайбы $D_{ш}$, мм	Толщина шайбы $t_{ш}$, мм	Разрушающая нагрузка $P_{разр}$, кН
ВШ-60-10-PM-1	60	10	72,65
ВШ-60-10-PM-2			62,02
ВШ-60-10-PM-3			70,56
ВШ-60-10-PM-4			62,65
ВШ-60-10-PM-5			64,49

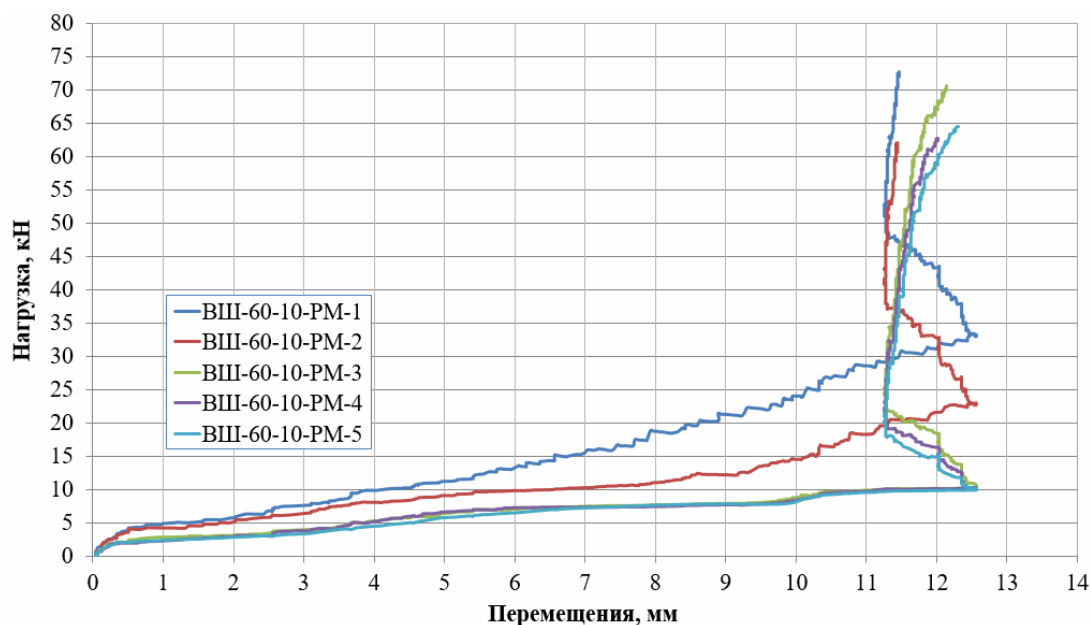


Рис. 7. Деформации сдвига в серии ВШ-60-10-PM

Общий вид разрушения образцов представлен на рис. 8.

По характеру разрушения образца можно сделать вывод, что при передаче нагрузки с центрального болта на клеенные шайбы максимальные напряжения возникают во клеенных стеклопластиковых шайбах, в результате чего они разрушаются в первую очередь. После чего происходит разрушение деревянного элемента образца.

Следует отметить, что на фактическую величину несущей способности испытанных соединений существенно повлиял недостаточный шаг S_1 и S_3 расстановки шайб в соединении (особенно S_1), о чем говорит то, что разрушение образцов произошло в результате раскалывания деревянных элементов на участке от торца до шайбы, т.е. на участке S_1 .

Сравнивая данные табл. 2 с результатами, представленными в [1], можно сделать вывод, что величины разрушающих нагрузок для трехсоставных образцов и образцов, испытанных через металлическую раму, различаются незначительно. На этом основании в дальнейших экспериментальных исследованиях рационально испытывать образцы в металлической раме.



Рис. 8. Общий вид разрушения образцов

Вывод. Предложена методика определения несущей способности соединений деревянных конструкций с применением клеенных стеклопластиковых шайб. Представлены результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки. Показана высокая несущая способность рассмотренного соединения в сравнении с аналогичными соединениями на клеенных стеклопластиковых шайбах, составленных из трех деревянных элементов.

Список литературы

1. Вдовин, В.М. Коррозионно-стойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций / В.М. Вдовин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4(41). – С. 103–108.
2. Арискин, М.В. Напряженно-деформированное состояние соединений на клеенных стеклопластиковых шайбах / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин, И.В. Ванин // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4(49). – С. 103–111.

3. Вдовин, В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.

References

1. Vdovin, V.M. Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures / V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No(41). – P. 103–108.
2. Ariskin M.V. Stress-strain state of joints on glued fiberglass washers / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, I.V. Vanin // Regional architecture and engineering. – 2021. – No(49). – P. 103–111.
3. Vdovin, V.M. Glued metal washers in the joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 698

DOI 10.54734/20722958_2022_2_104

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 «Теплогасоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Аверкин Александр Григорьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Теплогасоснабжение
и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Орлова Наталья Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогасоснабжение
и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

Мишин Андрей Алексеевич,
студент
E-mail: an.mishin299@gmail.com

Мочалов Александр Вячеславович,
студент
E-mail: alex.mo4alov2016@yandex.ru

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 Aleksander Grigorevich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat, Gas Supply and
Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Orlova Natalya Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Heat, Gas Supply and
Ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

Mishin Andrey Alekseevich,
Student
E-mail: an.mishin299@gmail.com

Mochalov Aleksander Vyacheslavovich,
Student
E-mail: alex.mo4alov2016@yandex.ru

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

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СГОРАНИЯ ЦЕРКОВНЫХ СВЕЧЕЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

А.И. Ерёмкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова,
А.А. Мишин, А.В. Мочалов

Актуальность проведенных исследований обусловлена реализацией Указа Президента РФ от 30 декабря 2021 г. № 745 «О проведении в Российской Федерации Года культурного наследия народов России». Представлены результаты исследования аэродинамических характеристик, направленного на разработку технических и конструктив-

ных решений по применению зонтов в системе местной вытяжной вентиляции для локализации и улавливания вредных веществ при сжигании церковных свечей в православных храмах, соборах и церквях. Приведены аналитические зависимости для расчета количества удаляемого воздуха, скоростных и температурных полей в свободном пространстве открытого вытяжного зонта над нагретыми поверхностями. Сравнительный анализ результатов численных расчетов температуры, скорости и расхода воздуха по аналитическим закономерностям разных авторов показал значительные расхождения полученных данных (до 50 %). Это подтверждает необходимость проведения дополнительных исследований аэродинамических характеристик воздуха, удаляемого вытяжным зонтом, с целью повышения эффективности локализации и улавливания вредных веществ (копоть, сажа, углекислый газ, водяной пар) при сгорании свечи. Кроме того, в настоящее время не проводятся теоретические и экспериментальные исследования аэродинамических характеристик конвективного потока в зоне всасывания открытого зонта, расположенного над открытым пламенем горящих церковных свечей при обряде богослужения. В статье приведены результаты авторских экспериментальных исследований температуры и скорости воздуха в зоне всасывания вытяжного зонта, оптимального количества отсасываемого (удаляемого) воздуха и структуры конвективного потока над горящими свечами. Определена высота установки вытяжного зонта над подсвечником. Комплексное решение локализации и улавливания вредностей в процессе сгорания церковных свечей позволит уберечь историко-культурное наследие в виде настенной живописи, икон, золочения и других архитектурных элементов убранства от загрязнений копотью, сажей, влагой в зале богослужения.

Ключевые слова: открытый вытяжной зонт, конвективный поток, отсасываемый воздух, поле температуры, подсвечник, церковная свеча, копоть, сажа, зона всасывания зонта, зал богослужения, убранство

INTEGRATED SOLUTION FOR LOCALIZATION OF POLLUTION IN THE PROCESS OF COMBUSTION OF CHURCH CANDLES IN ORTHODOX BUILDINGS

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova,
A.A. Mishin, A.V. Mochalov

The relevance of the proposed research is due to the implementation of the Decree of the President of the Russian Federation of December 30, 2021 No. 745 "On holding the Year of the Cultural Heritage of the Peoples of Russia in the Russian Federation". This article presents studies of aerodynamic characteristics aimed at developing technical and design solutions for the use of trapping in the local exhaust ventilation system to localize and trap harmful substances during the burning of church candles in Orthodox, cathedrals, and churches. Based on the analysis of studies carried out by the authors, the article presents analytical dependencies for calculating the amount of air removed, velocity and temperature fields in the free space of an open exhaust hood over heated surfaces. Comparative analysis of the results of numerical calculation of temperature, velocity and air flow according to the analytical patterns of the authors of this field of study showed significant discrepancies in the data obtained (up to 50 %) of the considered air parameters. This confirms the need for additional studies of the aerodynamic characteristics of the air removed by the exhaust hood in order to increase the efficiency of localization and trapping of harmful substances (soot, carbon dioxide, water vapor) during the combustion of a candle. In addition, there are currently no theoretical and experimental studies of the aerodynamic characteristics of the convective flow in the suction zone of an open trapping located above the open flame of burning church candles during the rite of worship. The article presents the results of the authors experimental studies of the temperature of the air velocity in the suction zone of the exhaust hood, the optimal amount of sucked (removed) air and the structure of the convective flow over burning candles. On the basis of the authors experimental studies, the height of the installation of the exhaust hood above the candlestick was determined. A comprehensive solution for the localization and trapping of harmful substances in the process of burning church candles will allow preserving the historical and cultural heritage in the form of wall paintings, icons, gilding and other architectural elements of decoration from pollution by soot, moisture in the worship hall.

Keywords: open exhaust hood, convective flow, exhausted air, temperature field, candlestick, church candle, soot, hood suction zone, worship hall, decoration

Вентиляция и кондиционирование воздуха залов богослужения православных культовых сооружений играют ключевую роль в обеспечении комфортной внутренней воздушной среды. Поддержание требуемых параметров воздуха в зале пребывания прихожан и персонала необходимо для создания комфортных условий и сохранности историко-культурного наследия в православных храмах, соборах и церквях [24–27].

Особенностью проведения православных ритуалов богослужения является применение большого количества горящих церковных свечей, в процессе сгорания которых выделяется значительное количество копоти, сажи, углекислого газа и тепловлаговыделений, которые переносятся воздушными потоками в пространство зала богослужения и абсорбируются на поверхностях архитектурных элементов, убранства культового сооружения, икон, настенной живописи, нанося им непоправимый ущерб. Подобная ситуация складывается даже при наличии в зале богослужения воздухообмена, организованного с помощью систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Подтверждением служат результаты многочисленных обследований, выполненных авторами в православных церквях, храмах и соборах Пензенского региона. Установлено, что историко-культурные ценности, размещенные в залах богослужения (внутреннее убранство), имеют неприглядный внешний вид из-за наличия на их поверхности смолянистого слоя копоти и сажи (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид загрязненного убранства церквей, храмов и соборов в Пензенском регионе

В процессе эксплуатации культовых сооружений приходится проводить дорогостоящие реставрационные работы для придания убранству первоначального вида.

Традиционно в православных культовых сооружениях проектируются и эксплуатируются общеобменные механические системы вентиляции в сочетании с естественной приточно-вытяжной вентиляцией. Для исключения рассеивания вредностей в воздушном пространстве зала богослужения и их локализации и удаления считается целесообразным применение местной вытяжной вентиляции с использованием вытяжных зонтов, установленных над подсвечниками в зоне горения свечей. Достоинствами данного подхода по сравнению с применением общеобменной вентиляции являются повышение качества воздуха в зале богослужения, обеспечение сохранности убранства, уменьшение производительности приточно-вытяжной системы вентиляции и кондиционирования воздуха, снижение финансовых затрат на внутренние реставрационные работы [24–27].

В статье приведены результаты исследований Н.В. Акинчева, В.В. Батурина, О.Н. Бабынина, В.М. Гусева, В.П. Жигалова, П.И. Килина, Б.Н. Кулешова, Г.Д. Лившица, И.И. Полосина, В.И. Полушкина, В.Н. Посохина, Т.Н. Роговой, А.А. Рымкевича, А.Г. Сотникова, И.Г. Старовойтова, В.Н. Талиева, Т.А. Фиалковской, И.А. Шепелева, В.М. Эльтермана и др. [1–23] в области изучения полей температуры и скоростей восходящих конвективных потоков от нагретых поверхностей, аэродинамических характеристик, технических и конструктивных решений по применению вытяжных зонтов для улавливания и удаления различных вредностей.

Авторами статьи предлагается инновационная система по типу местной вытяжной механической вентиляции для локализации, улавливания, а затем удаления вредностей (копоть, сажа и т.п.) непосредственно в местах их образования при сжигании свечей в зале богослужения, представляющая собой единый узел, состоящий из подсвечника с вытяжным зонтом (рис. 2).

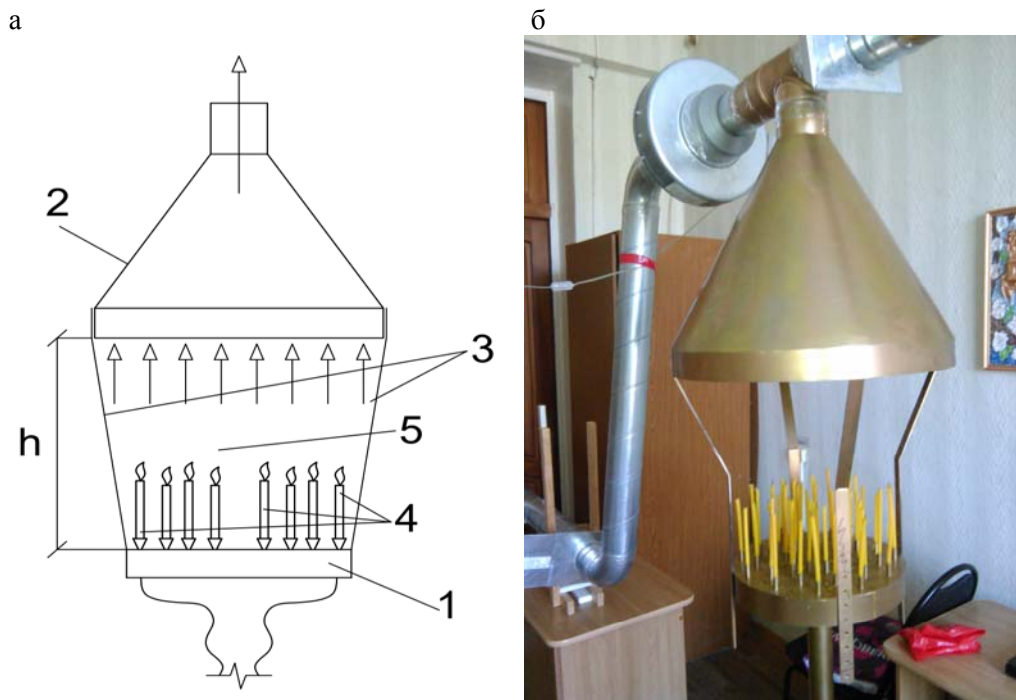


Рис. 2. Техническое решение для улавливания и удаления вредностей в процессе сгорания церковных свечей:

а – принципиальная схема конструкции; б – общий вид конструкции в натуральную величину; 1 – подсвечник; 2 – вытяжной зонт; 3 – стойки крепления зонта к подсвечнику; 4 – церковные свечи; 5 – свободное пространство между зонтом и горящими свечами; h – высота установки зонта над подсвечником, см

Эффективность работы системы вытяжной вентиляции зависит от технологических и конструктивных решений, в частности от обеспечения условий безопасности, полного укрытия источника образования вредностей, высоты установки вытяжного зонта над подсвечником, доступного для прихожан размещения свечей, соблюдения асимметричности направления движения удаляемого воздуха и конвективного потока, придания конструкции эстетического внешнего вида, создания оптимального аэродинамического сопротивления системы, обеспечения единства форм входного отверстия вытяжного зонта и столешницы подсвечника; соблюдения большего значения площади входного отверстия зонта по отношению к столешнице подсвечника, недопущения перетекания вредностей из-под зонта в зал богослужения.

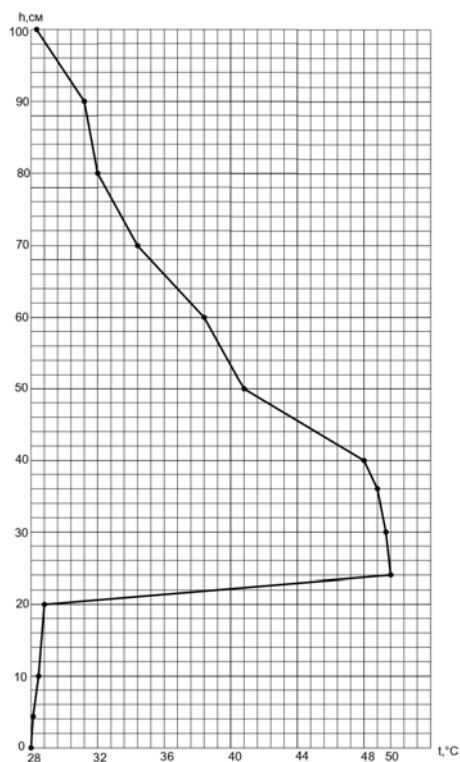
Разработка конструктивного решения подсвечника и вытяжного зонта как единого узла, его конфигурация, размеры и высота установки над подсвечником h , см, зависят от ряда факторов: тепловой мощности конвективного потока при сгорании свечей, объема воздуха в удаляемом конвективном потоке, скорости движения и температуры воздуха в зоне всасывания вытяжного зонта, наличия внешнего движения воздуха в зале установки зонта над подсвечником.

Определение параметров температуры t , °C, скорости воздуха v , м/с, в конвективном потоке, необходимых для уточнения расстояния h , см, от пламени свечи до нижней кромки зонта осуществлялось на экспериментальном стенде в лабораторных и натурных условиях.

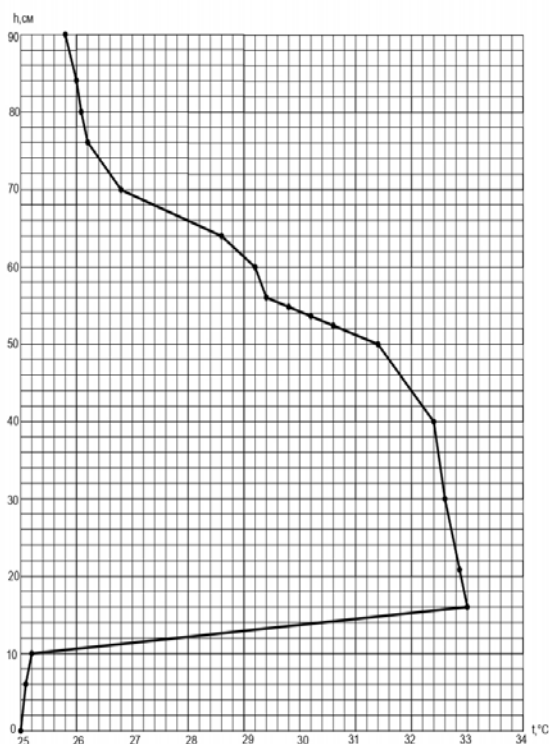
Полученные результаты экспериментальных исследований температуры t , °C, и скорости воздуха v , м/с, на оси поперечного сечения неизотермического конвек-

тивного потока от горящих свечей в свободном пространстве зонта в зоне всасывания представлены в виде графиков на рис. 3.

а



б



в

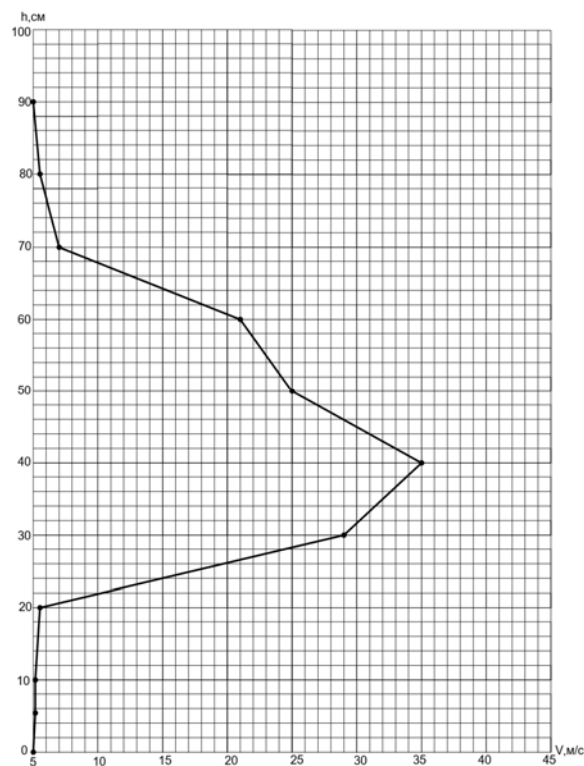


Рис. 3. Графики изменения температуры t , °C (а), скорости воздуха v , м/с (б), по высоте h , см, конвективного потока над одиночной горящей свечей и температуры воздуха (в) на оси конвективного потока над группой горящих свечей на подсвечнике

Из анализа полученных данных следует, что максимальные значения температуры (рис. 3, а) и скорости воздуха (рис. 3, б) в конвективном потоке над одиночно горящей свечей и температуры воздуха на оси конвективного потока над группой горящих свечей (рис. 3, в) наблюдаются на высоте h до 40 см. Следовательно, в зоне данного свободного пространства имеет место стабильный конвективный поток с максимальными значениями температуры и скорости воздуха в конвективном потоке. На основе полученных экспериментальных данных предлагается устанавливать вытяжной зонт на высоте $h = 40$ см от подсвечника до верхней кромки зонта. Это обеспечит эффективную работу вытяжного зонта по локализации, улавливанию и удалению вредностей в процессе сгорания свечей. В данной области конвективный поток более устойчивый к влиянию внешнего горизонтального воздушного потока в зале богослужения. Расстояние $h = 40$ см не будет создавать трудностей для прихожан при установке свечей над подсвечником. При расположении вытяжного зонта на высоте h более 40 см из-за неустойчивого конвективного потока возникает утечка вредностей из-под зонта в помещение.

Используя известные теоретические основы и закономерности процессов конвективного потока от нагретых поверхностей, впервые авторы разработали модель конвективного потока от открытого пламени группы отдельно горящих свечей (рис.4).

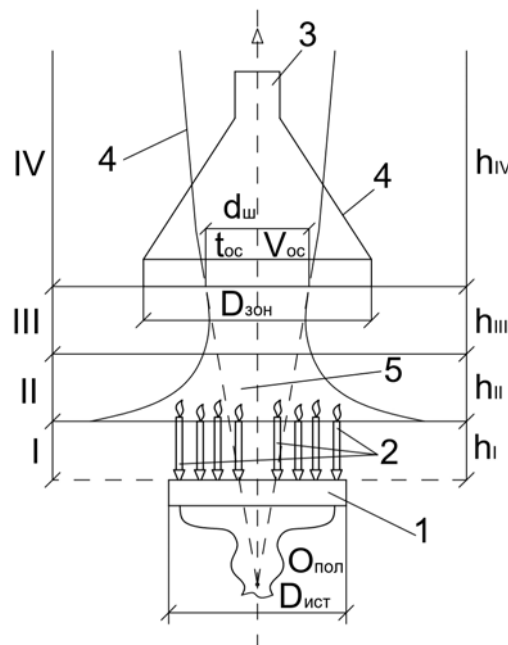


Рис. 4. Схема модели суммарной конвективной струи над горящими свечами и технологическое размещение вытяжного зонта:

I – пассивный участок струи; II – активный участок стока прилегающего воздуха;

III – участок разгона струи; IV – участок расширения струи;

$D_{зон}$ – диаметр входного сечения зонта, м; $D_{ист}$ – диаметр столешни со свечами, м; $O_{пол}$ – полог струи; $d_{ш}$ – диаметр «шейки» струи, м; h_I , h_{II} , h_{III} , h_{IV} – соответственно высота пассивного, активного, разгонного участков и участок расширения струи, м;

1 – подсвечник; 2 – горящие церковные свечи на столешне; 3 – вытяжной зонт;

4 – граница конвективной струи; 5 – зона свободного пространства струи

При построении схемы модели развития конвективной струи над горящими свечами рассматривались диаметр источника теплоты $D_{ист}$, м, диаметр входного сечения зонта $D_{зон}$, м, температура t , °C, и скорость воздуха v , м/с, на оси струи в центре всасывающего отверстия, размещение горящих свечей, диаметр шейки струи $d_{ш}$, м, полог и лучи, определяющие грань конвективной струи $O_{пол}$, участки струи I, II, III, IV. Были определены расстояние между участками h_I , h_{II} , h_{III} , h_{IV} и размещение вытяжного зонта с учетом структуры и стабильных параметров конвективной струи.

Анализ значений температуры t , °С, и скорости воздуха v , м/с на оси конвективной струи в зоне всасывания позволяет определить место размещения вытяжного зонта в структуре устойчивой конвективной струи. Исходя из этого следует, что пространство h , см, между горящими свечами и нижней кромкой вытяжного зонта захватывает пассивный I, активный II, разгонный III участки, где имеет место устойчивый конвективный поток при максимальных температуре и скорости воздуха в конвективном потоке, что подтверждается графиком на рис. 3.

Проведенное экспериментальное исследование и полученные результаты дополнительно к графикам на рис.3 позволяют обосновать место установки вытяжного зонта в конвективном потоке также на расстоянии $h = 40$ см. Это еще раз подтверждает эффективность локализации, улавливания и удаления вредностей при сгорании свечей из зала богослужения, обеспечивает сохранность исторических, художественных и культурных ценностей, а также создает комфортные условия для прихожан и персонала в православных культовых сооружениях.

Применение эффективной местной системы вытяжной вентиляции с использованием зонтов в залах богослужения позволит решить ряд важных задач: максимальное улавливание и удаление вредностей из зала богослужения; обеспечение минимального расхода воздуха в системе приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования воздуха; поддержание уровня ПДК вредных веществ в зале богослужения; снижение эксплуатационных расходов; сокращение затрат на реставрационные работы; в зале богослужения; сохранность убранства залов; создание комфортных условий для прихожан и персонала.

Авторами проведен анализ результатов исследований в области аэродинамических характеристик воздушных потоков в зоне всасывания вытяжных зонтов и различных местных отсосов, расположенных над нагретыми поверхностями и другими источниками вредностей [1–23]. На основе этого анализа в статье приводятся формулы для расчета скорости, температуры и расхода воздуха в зоне всасывания зонта. Расчетные значения данных характеристик конвективного потока необходимы при разработке системы местной механической и естественной вентиляции с вытяжным зонтом.

Ниже приводятся аэродинамические параметры конвективных потоков, полученные разными авторами [1, 5–12, 16].

В условиях естественной вытяжки загрязненного воздуха минимальный отсос из-под зонта L_3 , м³/ч, предлагается определять по формуле

$$L_3 = 3600\mu A_3 \sqrt{2gh \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right)} \quad (1)$$

или по формуле

$$L_3 = 3600\mu A_3 \sqrt{2gh \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right)}, \quad (2)$$

где ρ_1 , ρ_2 (кг/м³), t_1 , t_2 (°С) – соответственно плотность и температура воздуха внутри зонта и в помещении; μ – коэффициент расхода, $\mu = 0,75$; h – высота свободного пространства, м; A_3 – площадь входного сечения зонта, м².

Из формулы (1) следует, что значение L_3 главным образом зависит от высоты установки зонта над источником.

Известно, что аэродинамическая характеристика L_3 , м³/ч, воздушного стока в зоне всасывания зонта зависит от количества конвективной теплоты Q_k , ккал/ч, выделяемой от источника, находящегося под зонтом. Величину L_3 можно найти по следующей формуле:

$$L_3 = \frac{Q_k}{C(t_2 - t_1)}, \quad (3)$$

где C – объемная теплоемкость воздуха, при постоянном давлении составляет 0,24 ккал/(м³·°C), или 1,0 кДж/(кг·°C).

При известной величине Q_k минимальный отсос загрязненного воздуха рекомендуется определять по формуле

$$L_3 = 120(140)\sqrt{hQ_k A_3^2}. \quad (4)$$

При этом должно обеспечиваться условие недопущения выхода загрязненного воздуха из-под зонта в помещение.

В зоне всасывания зонта наряду с выделением теплоты присутствуют различные газы и пары. В зале богослужения при сгорании церковных свечей образуются кроме влаги CO₂, копоть и сажа [24-27].

Установлено, что в результате разности потенциала концентрации вредных веществ в зоне выделения и в помещении возможен прорыв вредных веществ из конвективного потока из-под зонта за счет турбулентной диффузии в помещение [4].

Скорость турбулентной диффузии $v_{\text{диф}}$, м/с, приближенно можно определить по формуле

$$v_{\text{диф}} = \frac{0,1237 t_2^n}{10^8 \sigma \sqrt{M_a}}, \quad (5)$$

где n – показатель степени (для H₂O, CO₂ равен 1,75, для других газов – 2); σ – толщина стенки зонта, м; M_a – молекулярный вес диффузионного газа.

При данной скорости турбулентной диффузии обеспечивается минимальное попадание вредных веществ из конвективного потока воздуха в помещение.

Для устранения возможности выхода вредных веществ из-под зонта необходимо снизить давление воздуха внутри зонта в зоне нижней кромки проема на величину P_a , кг/м²:

$$P_a = \rho_2 \frac{v_{\text{диф}}^2}{2} k, \quad (6)$$

где k – коэффициент запаса, равный 1,15.

Величина P_a обеспечивается за счет вытяжного вентилятора и естественного движения конвективного потока внутри зонта.

Аэродинамические исследования скоростных полей, проводимые на лабораторном стенде, позволили сделать вывод, что зонт над источником теплоты при сгорании свечей рекомендуется устанавливать на высоте свободного пространства от 300 до 400 мм в зоне устойчивого конвективного потока. При этом осевая скорость v_0 , м/с, на уровне кромки всасывающего отверстия зонта должна быть не ниже 0,4 м/с.

Количество воздуха (стока) L_k , м³/ч, подтекаемого к конвективной струе в зоне всасывания зонта над тепловым источником, предлагается вычислять по формуле

$$L_k = 67\sqrt[3]{Q_k h A_{\text{ист}}^2}, \quad (7)$$

где Q_k – количество конвективной теплоты, выделяемой нагретым источником, ккал/ч; $A_{\text{ист}}$ – площадь источника тепловыделения, м².

Значение Q_k , ккал/ч, рекомендуется рассчитывать по формуле

$$Q_k = \alpha_k A_{\text{ист}} (t_n - t_v), \quad (8)$$

где t_n , t_v – соответственно температура нагретой поверхности и воздуха в помещении, °C; α_k – коэффициент конвективного теплообмена, ккал/(ч·м²·°C), для стандартного воздуха определяется по формуле

$$\alpha_k = 1,3\sqrt[3]{t_1 - t_2}. \quad (9)$$

Наряду с формулами (1)–(4) расход воздуха, удаляемого вытяжным зонтом, при известных значениях A_3 , $A_{ист}$, L_k предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$L_3 = L_k \frac{A_3}{A_{ист}}, \quad (10)$$

где A_3 – площадь сечения зонта, m^2 ; при h менее $2,8\sqrt{A_3}$ применяется $A_3 = 1,5 A_{ист}$.

Объем расхода воздуха L_k , $m^3/ч$, в тепловой струе предлагается определять по формуле

$$L_k = 4,04 \cdot 10^{-2} \sqrt[3]{Q_k \cdot A_{ист}} h \quad (11)$$

или по формуле

$$L_k = 0,65 \sqrt[3]{Q_k \cdot A_{ист}} h, \quad (12)$$

где Q_k – количество конвективной теплоты, Вт.

Для обеспечения равномерного распределения скорости воздуха во входном сечении зонта необходимо соблюдать определенные конструктивные и установочные размеры и размерные соотношения зонта. В зависимости от угла раскрытия зонта нарушается равномерность распределения скорости в его входном сечении, при этом скорость v_x , м/с, в отдельных точках входного сечения зонта может значительно отличаться от средней скорости $v_{ср}$, м/с, в сечении. Например, при $\alpha=60^\circ$ отношение $v_x/v_{ср}=1$, а при $\alpha=90^\circ$ – $v_x/v_{ср}=1,65$. Во втором случае имеет место существенное отклонение скорости v_x от $v_{ср}$, и в результате необходимо отсасывать зонтом больший объем воздуха для удаления вредных [9, 10].

Значения v_x и $v_{ср}$ допустимо определять экспериментальным путем или рассчитывать по формуле

$$v_x = \frac{L_3}{4\pi r_x^2}, \quad (13)$$

где L_3 – секундный расход воздуха в приемном отверстии зонта, $m^3/с$; r_x – расстояние между произвольной точкой и центром входного отверстия вытяжного зонта; $4\pi r_x^2$ – поверхность сферы радиусом r , m^2 .

Из формулы (13) рекомендуется определить секундный расход L_x , $m^3/с$, и скорость v_x , м/с, воздуха в любой точке от центра входного отверстия зонта в зоне всасывающего потока по формулам:

$$L_x = \frac{\pi r_x^2}{4} v_x, \quad (14)$$

$$v_x = \frac{L_x}{4\pi r_x^2}. \quad (15)$$

Продолжая анализ результатов исследований в области конвективных потоков в зоне всасывания вытяжного устройства, обратимся к трудам П.И. Килина и Т.Н. Роговой [4], которые предлагают рассчитывать количество воздуха $L_{отс}$, $m^3/ч$, удаляемого местным вытяжным отсосом, с учетом теплоты от источника по формуле

$$L_{отс} = C_3 \cdot Q^{1/3} \cdot d_{эв}^{5/3} \cdot K_v \cdot K_\sigma, \quad (16)$$

где C_3 – коэффициент пропорциональности, $m^{4/3}/(Вт^{1/3}ч)$; Q – количество конвективной теплоты, выделяемой источником, Вт; $d_{эв}$ – эквивалентный диаметр источника, м; K_v – поправочный коэффициент на подвижность воздуха в помещении; K_σ – поправочный

коэффициент на наличие газовой составляющей в конвективном потоке, равный от 1,2 до 1,4.

Выводы:

1. Анализ существующих методик определения аэродинамических характеристик воздушного конвективного потока в зоне всасывания открытого зонта и конструктивных размеров и размерных соотношений зонта позволяет сделать следующие выводы. Приведенные значения L_k , Q_k , v_{oc} , v_x , L_x , L_z , h , $v_{диф}$ не имеют достаточных экспериментальных и теоретических подтверждений, и практическая их реализация применительно к поставленным задачам может быть затруднена. Поэтому актуальными остаются дополнительные исследования аэродинамических характеристик, направленные на разработку и научное обоснование альтернативных теоретических и экспериментальных исследований по применению вытяжных зонтов для улавливания и удаления вредностей, образующихся от открытого пламени в процессе сгорания церковных свечей в православных храмах.

2. Сравнительный анализ результатов различных авторских расчетов параметров температуры, скорости и расхода воздуха, удаляемого вытяжным зонтом, показал значительные расхождения данных (до 50 %), что доказывает необходимость проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований аэродинамических характеристик воздушных конвективных потоков над горящими церковными свечами в зоне всасывания вытяжных зонтов.

3. Традиционные методики определения аэродинамических характеристик конвективного потока в зоне всасывания вытяжного зонта не позволяют обосновать размеры и место установки зонта и, следовательно, эффективно локализовать, улавливать и удалять вредности при сгорании свечей в процессе проведения обрядов богослужения в православных культовых сооружениях.

4. Результаты исследований, выполненных авторами данной публикации, позволяют сделать вывод, что формирование конвективной струи над горящими свечами сопровождается образованием шейки (сужение конвективного потока), где имеются максимальные скорость и температура воздуха и высокая устойчивость потока. Эта особенность не учитывается общепринятыми методиками определения размеров и места установки вытяжного зонта над нагретым источником выделения загрязнения.

5. Решение выявленных авторами проблем позволяет найти оптимальное решение по обеспечению эффективной работы местной вытяжной системы вентиляции с использованием зонтов в залах богослужения православных культовых сооружений.

Список литературы

1. Сотников, А.Г. Систематизация и обобщение характеристик местных вытяжных устройств – основа инженерной методики проектирования эффективных СПВ / А.Г. Сотников, А.Г. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 6(32). – С. 54–59.
2. Столер, В.Д. Эффективные устройства местной вентиляции на промышленных объектах / В.Д. Столер, Ю.Л. Савельев, Ю.А. Иванов, В.Л. Шегал. – СПб.: Лань, 2017. – 252 с.
3. Пухкал, В.А. Влияние схемы организации воздухообмена в помещении на эффективность вытяжного зонта / В.А. Пухкал, В.Б. Панков // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 7. – С. 54–59.
4. Килин, П.И. Исследования закономерностей диффузионного распространения вредных примесей / П.И. Килин, Т.Н. Рогова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1996. – № 11. – С. 78–82.
5. Староверов, И.Г. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Справочник проектировщика / И.Г. Староверов. – М.: Стройиздат, 1977 – 502 с.
6. Богословский, В.Н. Отопление и вентиляция. Ч. II / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.Н. Титов. – М.: Стройиздат, 1976. – 439 с.

7. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979 – 295 с.
8. Конышев, И.И. Расчет некоторых пространственных всасывающих факелов / И.И. Конышев, А.Г. Чесноков, С.Н. Щадрова // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1976. – №4. – С. 103–116.
9. Шепелев, И.А. Воздушные потоки вблизи всасывающих отверстий / И.А. Шепелев // Труды НИИсантехники. – 1967. – №4. – С.34–48.
10. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.
11. Батурин, В.В. Основы промышленной вентиляции / В.В. Батурин. – М.: Профиздат, 1990. – 448 с.
12. Бабынин, О.Н. Выбор оптимального режима работы местных отсосов / О.Н. Бабынин, Б.Н. Кулешов // Проектирование отопительно-вентиляционных систем. – 1967. – №3. – С. 14–23.
13. Акинчев, Н.В. Исследование центрального отсоса от ванн электролитического рафинирования металлов / Н.В. Акинчев, В.П. Жигалов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. – М.: Профиздат, 1972. – № 75. – С. 14–18.
14. Гусев, В.М. Результаты исследования на модели укрытий алюминиевых электролизеров с обожженными анодами / В.М. Гусев, И.Н. Попченков, А.Ф. Смирнов // Исследования в области отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: темат. сб. науч. тр. – Л.: ЛИСИ, 1976. – №1(117). – С. 25–30.
15. Лифшиц, Г.Д. Модель для аналитических исследований местных отсосов при истечении вредности и всасываемого воздуха / Г.Д. Лифшиц // Известия Вузов. Строительство. – 1979. – №10. – С. 92–95.
16. Полосин, И.И. Исследование эффективности местных отсосов новых конструкций от промышленных гальванических ванн / И.И. Полосин, С.Н. Кузнецов, А.В. Портянников // Труды конференции / МГСУ. – М., 2007. – С. 153–157.
17. Полушкин, В.И. Вентиляция / В.И. Полушкин, С.М. Анисимов, В.Ф. Васильев, В.В. Дерюгин. – М.: Академия, 2008. – 416 с.
18. Посохин, В.Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования / В.Н. Посохин. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
19. Рымкевич, А.А. Управление системами кондиционирования воздуха / А.А. Рымкевич, М.Б. Халамейзер. – М.: Машиностроение, 1977. – 274 с.
20. Рымкевич, А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха / А.А. Рымкевич. – М.: Стройиздат, 1990. – 300 с.
21. Сотников, А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха. (Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС) / А.Г. Сотников. – СПб., 2012. – Т. I. – 420 с.; Т. II. – 408 с.
22. Эльтерман, В.М. Вентиляция химических производств / В.М. Эльтерман. – 1-е изд. – М.: Стройиздат, 1967. – 175 с.; 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Химия, 1971. – 238 с.; 3-е изд. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
23. Фиалковская, Т.А. Вентиляция при окраске изделий / Т.А. Фиалковская. – М.: Машиностроение, 1978. – 182 с.
24. Ерёмкин, А.И. Влияние санитарно-гигиенического состояния микроклимата в залах богослужения православных соборов на физиологическое состояние прихожан / А.И. Ерёмкин, И.К. Пономарева, А.Г. Багдасарян // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 6 (31). – С. 151–156.
25. Ерёмкин, А.И. Пути повышения качества микроклимата в зале богослужения Спасского кафедрального собора г. Пензы / А.И. Ерёмкин, К.А. Петрова, А.Г. Багдасарян, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4 (45). – С. 121–130.
26. Ерёмкин, А.И. Методика расчета воздухообмена системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов / А.И. Ерём-

кин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3 (44). – С. 161–168.

27. Ерёмкин, А.И. Теоретические основы и рекомендации по созданию местной вытяжной вентиляции продуктов сгорания свечей в зале богослужения / А.И. Ерёмкин, А.Г. Аверкин, В.А. Леонтьев, К.А. Петрова, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 195–202.

References

1. Sotnikov, A.G. Systematization and generalization of the characteristics of local exhaust devices – the basis of the engineering methodology for designing effective air handling units / A.G. Sotnikov, A.G. Borovitsky // Engineering and Construction Journal. – 2012. – No. 6(32). – P. 54–59.
2. Stoler, V.D. Effective local ventilation devices at industrial facilities / V.D. Stoler, Yu.L. Saveliev, Yu.A. Ivanov, V.L. Shegal. – St. Petersburg: Lan, 2017. – 252 p.
3. Pukhkal, V.A. Influence of the scheme of organization of air exchange in the room on the efficiency of the exhaust hood / V.A. Pukhkal, V.B. Pankov // Engineering Bulletin of the Don. – 2020. – No. 7. – P. 54–59.
4. Kilin, P.I. Studies of the regularities of diffusion distribution of harmful impurities. Izvestia of higher educational institutions / P.I. Kilin, T.N. Rogova // Ferrous metallurgy. – 1996. – No. 11. – P. 78–82.
5. Staroverov, I.G. Ventilation and air conditioning / I.G. Staroverov // Designer's Handbook. – M.: Stroyizdat, 1977. – 502 p.
6. Bogoslovsky, V.N. Heating and ventilation. Part II / V.N. Bogoslovsky, V.I. Novozhilov, B.D. Simakov, V.N. Titov. – M.: Stroyizdat, 1976. – 439 p.
7. Taliev, V.N. Aerodynamic ventilation / V.N. Taliev. – M.: Stroyizdat, 1979. – 295 p.
8. Konyshev, I.I. Calculation of some spatial suction torches / I.I. Konyshev, A.G. Chesnokov, S.N. Shchadrova // Izv. universities. Technology of the textile industry. – 1976. – No. 4. – P. 103–116.
9. Shepelev, I.A. Air flows near the suction holes / I.A. Shepelev // Proceedings of the Research Institute of Sanitary Engineering. – 1967. – No. 4. – P.34–48.
10. Shepelev, I.A. Aerodynamics of air flows in the room / I.A. Shepelev. – M.: Stroyizdat, 1978. – 144 p.
11. Baturin, V.V. Fundamentals of industrial ventilation / V.V. Baturin. – M.: Profizdat, 1990. – 448 p.
12. Babynin, O.N. The choice of the optimal mode of operation of local suction / O.N. Babynin, B.N. Kuleshov // Design of heating and ventilation systems. – 1967. – No. 3. – P. 14–23
13. Akinchev, N.V. Investigation of the central suction from the baths of electrolytic refining of metals / N.V. Akinchev, V.P. Zhigalov. – M.: Profizdat, 1972. – No. 75. – P. 14–18.
14. Gusev, V.M. Research results on the model of shelters of aluminum electrolyzers with baked anodes / V.M. Gusev, I.N. Popchenkov, A.F. Smirnov // Research in the field of heating, ventilation and air conditioning. Subject. Sat. scientific tr. – L.: LISI, 1976. – No. 1 (117). – P. 25–30.
15. Lifshits, G.D. Model for analytical study of local suction during the expiration of harmfulness and intake air / G.D. Lifshits // Izvestiya Vuzov. Construction. – 1979. – No. 10. – P. 92–95.
16. Polosin, I.I. Investigation of the effectiveness of local suction of new designs from industrial galvanic baths / I.I. Polosin, S.N. Kuznetsov, A.V. Portyannikov // Proceedings of the conference / MGSU. – M., 2007. – P. 153–157.
17. Polushkin, V.I. Ventilation / V.I. Polushkin, S.M. Anisimov, V.F. Vasiliev, V.V. Deryugin. – M.: Academy, 2008. – 416 p.
18. Posokhin, V.N. Calculation of local suction from heat and gas generating equipment / V.N. Posokhin. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 160 p.

19. Rymkevich, A.A. Control of air conditioning systems / A.A. Rymkevich, M.B. Halameyzer. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 274 p.
20. Rymkevich, A.A. System analysis of optimization of general ventilation and air conditioning / A.A. Rymkevich. – M.: Stroyizdat, 1990. – 300 p.
21. Sotnikov, A.G. Design and calculation of ventilation and air conditioning systems. (Full set of requirements, initial data and settlement information for CO, SPV, SCR, SGVS and SHS) / A.G. Sotnikov. – St. Petersburg: 2012. – T. I. – 420 p.; Vol. II. – 408 p.
22. Elterman, V.M. Ventilation of chemical production / V.M. Elterman. – 1st ed. – M.: Stroyizdat, 1967. – 175 p.; 2nd ed., add. and reworked. – M.: Chemistry, 1971. – 238 p.; 3rd ed. – M.: Chemistry, 1980. – 288 p.
23. Fialkovskaya, T.A. Ventilation when painting products / T.A. Fialkovskaya. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 182p.
24. Eremkin, A.I. Influence of the sanitary and hygienic state of the microclimate in the worship halls of Orthodox cathedrals on the physiological state of the parishioners / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, A.G. Bagdasaryan // Education and science in the modern world. Innovation. – 2020. – No. 6 (31). – P. 151–156.
25. Eremkin, A.I. Ways to improve the quality of the microclimate in the worship hall of the Cathedral of the Savior in Penza / A.I. Eremkin, K.A. Petrova, A.G. Bagdasaryan, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 4 (45). – P. 121–130.
26. Eremkin, A.I. Methodology for calculating the air exchange of a displacement air conditioning system in the worship halls of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3 (44). – P. 161–168.
27. Eremkin, A.I. Theoretical foundations and recommendations for the creation of local exhaust ventilation of candle combustion products in the worship hall / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, V.A. Leontiev, K.A. Petrova, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1 (46). – P. 195–202.

УДК 628.83:79

DOI 10.54734/20722958_2022_2_117

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

Ерёмкин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: eremkin@pguas.ru

Фильчакина Ирина Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: filchakina80@mail.ru

Орлова Наталья Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»
E-mail: tgv@pguas.ru

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

Filchakina Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences,
Associate Professor of the department «Heat,
Gas Supply and Ventilation»
E-mail: filchakina80@mail.ru

Orlova Natalya Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Heat, Gas Supply and
ventilation»
E-mail: tgv@pguas.ru

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

ПЛАСТИНЧАТЫЙ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬ СИСТЕМЫ ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЙ КУЛЬТУРНО-ЗРЕЛИЩНЫХ ЗАЛОВ

А.И. Еремкин, И.Н. Фильчакина, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова

Предложена новая конструкция пластинчатого воздухораспределителя системы вытесняющей вентиляции для подачи приточного воздуха с малыми скоростями непосредственно в рабочую зону помещений культурно-зрелищных залов, а также изложен план мероприятий по исследованию данной конструкции пластинчатого воздухораспределителя в лабораторных и натурных условиях.

Ключевые слова: соударение встречных плоских струй, пластинчатый воздухораспределитель, вытесняющая вентиляция, зрительный зал, кинотеатр, воздухообмен, приток

LAMELLAR AIR DISTRIBUTOR OF DISPLACEMENT VENTILATION SYSTEMS FOR PLACES CULTURAL ENTERTAINMENT COMPLEXES

A.I. Eremkin, I.N. Filchakina, N.A. Orlova, I.K. Ponomareva

A new design of the lamellar air distributor system of exhaust ventilation for the supply of forced air with small speeds directly into the working zone of cultural and spectacular halls is proposed. A plan of activities is presented for the study of the design of the plate air distributor in laboratory and natural conditions.

Keywords: occurrence of encountering flat jets, lamellar air distributor, exhaust ventilation; auditorium, cinema, air exchange, flow

В практике проектирования систем вентиляции помещений с тепло- и влагоизбытками (зрительные и киноконцертные залы с большим количеством людей, залы театров и опер, дворцов спорта и т.д.) для создания комфортных условий применяются системы общеобменной и вытесняющей вентиляции. Для подобных помещений характерны высокие требования к комфорту зрителей.

Рассмотрим традиционную схему организации воздухообмена перемешивающего типа с подачей воздуха сверху вниз. Приточный воздух поступает из верхней зоны помещения с большой скоростью (до 4 м/с), активно смешивается с загрязненным воздухом, поднимающимся с конвективными потоками от людей, в результате образуется смесь приточного и загрязненного воздуха, которая поступает в рабочую зону зрительного зала. В результате в зоне дыхания людей оказывается уже не чистый и свежий приточный воздух, а загрязненная смесь в виде теплоты, углекислого газа и влаги. При организации данного способа воздухообмена наблюдается повышенная концентрация углекислого газа и водяных паров в рабочей зоне зрелищных помещений.

Для сравнения рассмотрим схему воздухообмена «снизу вверх», которая носит название вытесняющей вентиляции и является наиболее эффективной для концертных залов, кинотеатров, оперных театров и других подобных помещений, о чем свидетельствует ряд зарубежных публикаций [1, 2] и др. Например, в аудиториях Университета Амстердама воздух поступает через напольные воздухораспределители с закручиванием приточной струи. В зрительном зале комплекса Лоури в Англии подача воздуха осуществляется на низкой скорости из подкресельных воздухопроводов, а удаление воздуха предусматривается в верхней части зала. Такая система поддерживает объем удаляемого воздуха в соответствии с объемами приточного воздуха, подаваемого в зал. Компания «Ove Arup» на основе опыта, приобретенного в ходе реконструкции Глиндбурнского оперного театра, вновь решила применить распределительную систему с подачей воздуха снизу вверх посредством подкресельных диффузоров. Аналогичный способ организации воздухообмена реализуется в Королевской Опере в Лондоне и в Большом театре в Барселоне [2].

На рис. 1 приведены примеры установки приточных воздухораспределительных напольных решеток (рис. 1, а, б) и устройств (рис. 1, в) в помещении зрительного зала. Такое расположение воздухораспределительных устройств (ВРУ) позволяет освободить пол от громоздких и неэстетичных подкресельных конструкций (воздуховодов) [2], что дает возможность улучшить эстетику культурно-зрелищного зала, а также обеспечить простоту и удобство уборки помещения.

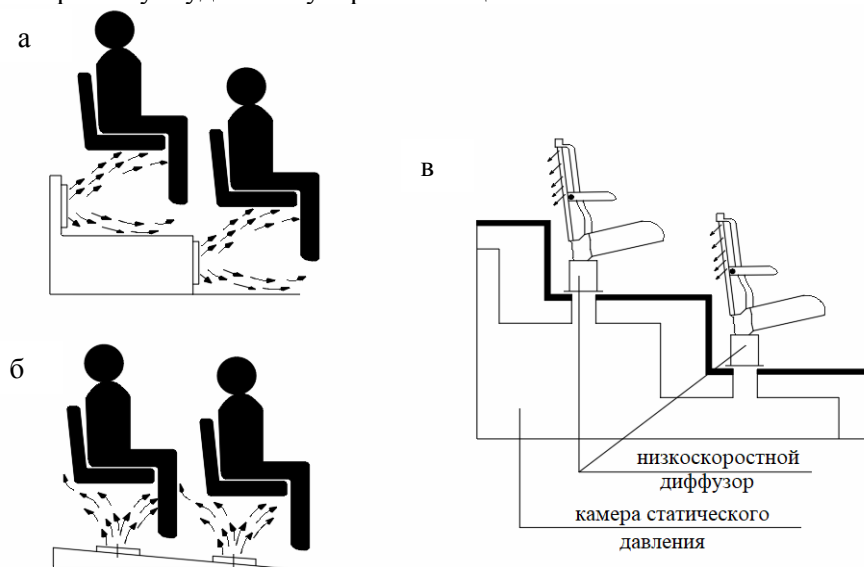


Рис. 1. Примеры установки воздухораспределительных устройств в культурно-зрелищных залах:

а – в вертикальной части ступеньки; б – в полу (под креслом);
в – кресло с диффузором для подачи воздуха снизу вверх

Системы вытесняющей вентиляции с воздухораспределителями напольного типа заслуживают особого внимания (см. рис. 1, а, б). В культурно-зрелищных залах воздух зачастую подается из-под кресел. Такое решение хорошо себя зарекомендовало, однако на практике оно требует особого внимания в части предотвращения холодных потоков на уровне нижней части ног, с чем и приходится сталкиваться в реальных условиях.

Основываясь на зарубежном (А. Фиелд, Г. Макдонелл, Р.А. Бассо, Роберт Ховард и др.) и отечественном (А.В. Ливчак, Е.О. Шилькрофт, А.М. Живов и др.) опыте, авторы данной публикации предложили организовать воздухообмен по принципу вытесняющей вентиляции по схеме «снизу вверх» в зрительном зале ККЗ «ПЕНЗА» в г. Пензе, Пензенской области.

Ниже представлены основные мероприятия, которые необходимо организовать для того, чтобы система воздухообмена зрительного зала отвечала всем принципам вытесняющей вентиляции и эффективно функционировала, а именно:

- для борьбы с повышенной подвижностью воздуха приток в помещение зала осуществляется рассредоточенно по всему периметру через множество ВРУ, находящихся в полу под креслами;
- пространство под полом зала используется в качестве огромной статической камеры, откуда приточный воздух через ВРУ равномерно поступает в рабочую зону зрительного зала;
- расход воздуха, проходящего через ВРУ, должен быть не более 70-90 м³/ч;
- система обслуживает ограниченную по высоте рабочую зону – до двух метров от пола (т.е. зону, где находятся зрители) [3];
- качественному и равномерному воздухораспределению способствуют конвективные потоки от зрителей;
- скорость подачи воздуха в обслуживаемой зоне рекомендуется в пределах 0,2-0,5 м/с;
- температура приточного воздуха должна быть на 2-3 °С ниже внутренней температуры в помещении зала для предотвращения появления сквозняка у пола;
- при расчете воздухообменов учитываются вредности, которые поступают только в рабочую зону помещения (до 2-х метров от пола), и не учитываются выше этого уровня, что способствует сокращению объема приточного и удаляемого воздуха.

Приточный воздух, поступающий в зрительный зал через ВРУ под креслом в полу, под действием конвективных потоков нагретого людьми воздуха направляется вверх. При этом приточный воздух проходит непосредственно сквозь рабочую зону обслуживаемого помещения. Таким образом, медленные потоки приточного воздуха «затапливают» весь объем зрительного зала, не создавая при этом ощутимой для людей турбулентности и большой подвижности.

В настоящее время здание ККЗ «ПЕНЗА» функционирует, но система воздухообмена в зрительном зале не решена, а именно она не отвечает полностью принципам вытесняющей вентиляции. Самое важное, по мнению авторов данной публикации, это создание комфортных условий для зрителей, находящихся в зале во время представления. Необходимо подготовить и подать в рабочую зону приточный воздух, отвечающий требованиям к параметрам температуры и скорости приточной струи. В настоящее время воздух из статической камеры поступает в помещение зрительного зала через прямоугольные отверстия в полу, расположенные под креслами и прикрытые декоративными решетками, что не обеспечивает раздачу воздуха с допустимой скоростью (0,2-0,5 м/с) (рис. 2).

Большинство проблем, связанных с высокими значениями подвижности воздуха в обслуживаемой зоне, возникает из-за некорректного выбора ВРУ, что неизбежно влечет за собой проблемы холодных потоков, создающих дискомфорт для людей. Неэффективно спроектированный воздухораспределитель может создать зону с недопустимо высокой подвижностью воздуха (более 0,5 м/с).

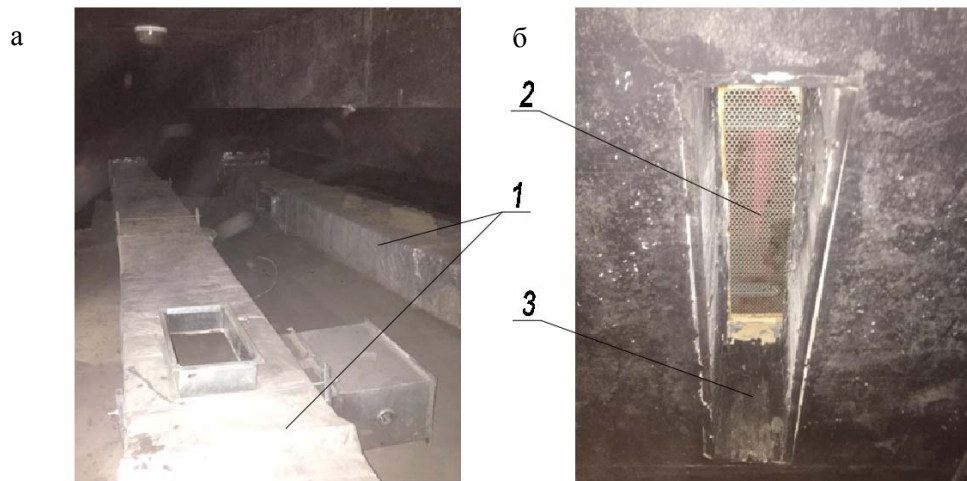


Рис. 2. Схема существующей системы вытесняющей вентиляции в зрительном зале ККЗ «ПЕНЗА»:

- а – приточный воздуховод 1 в статической камере (под полом зрительного зала);
 б – воздухораспределительная решетка 2 под креслом (вид из статической камеры);
 3 – отверстие в полу под воздухораспределитель

В связи с указанными недостатками авторы данной публикации предлагают решить вопрос организации воздухообмена за счет внедрения в существующую систему вентиляции помещения зрительного зала ККЗ «ПЕНЗА» нового воздухораспределительного устройства [4], которое сможет обеспечить равномерную подачу приточного воздуха с допустимой по нормативам скоростью (0,2–0,5 м/с) в рабочую зону (рис. 3).

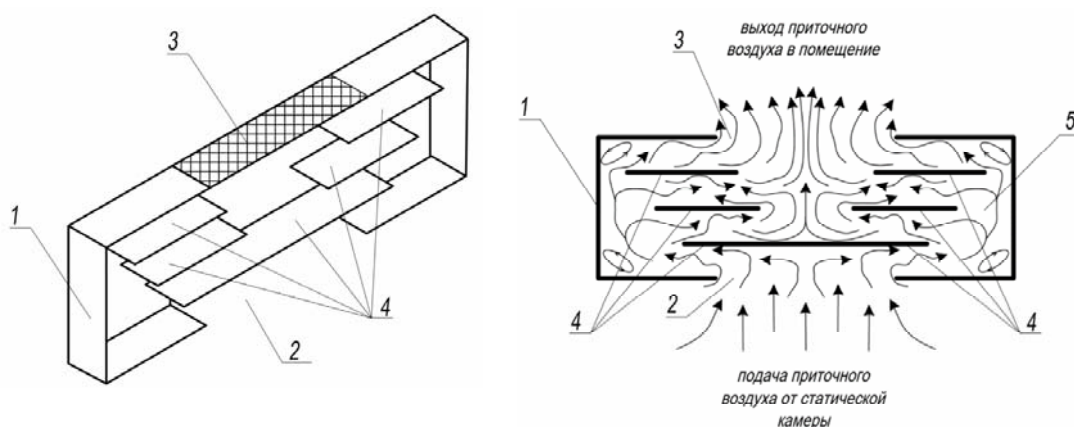


Рис. 3. Пластинчатый воздухораспределитель:

- 1 – корпус воздухораспределителя; 2 – входное отверстие воздухораспределителя;
 3 – выходное отверстие воздухораспределителя с защитной сеткой;
 4 – направляющие пластины; 5 – зазор

Поскольку в системе вытесняющей вентиляции приточный воздух подается непосредственно в обслуживаемую зону, необходимо использовать ВРУ, которые обеспечивали бы снижение скорости приточной струи воздуха за счет соударения воздушных потоков внутри воздухораспределителя. Это позволит создать необходимое перемешивание приточного воздуха, поступающего с малыми скоростями, с воздухом помещения.

Для подачи больших объемов приточного воздуха с малыми скоростями непосредственно в обслуживаемую зону помещения в последние годы при разработке ВРУ внедряют эффект соударения встречных струй. На основании проведенного анализа следует отметить, что в результате соударения приточных струй, истекающих

из оппозитных отверстий, каналов, насадков, щелей, наблюдается значительное гашение скорости и энергии суммарного результирующего потока воздуха [5].

Физические свойства соударяющихся струй вполне приемлемы при разработке новой конструкции пластинчатого воздухораспределителя (см. рис. 3) для подачи приточного воздуха с малыми скоростями непосредственно в рабочую зону зрительного зала при организации воздухообмена по схеме «снизу вверх» [4].

Существенными критериями оценки эффективности данного воздухораспределителя являются фактическое состояние и равномерность параметров искусственного микроклимата в рабочей зоне помещения и их соответствие требованиям комфорта.

Предлагаемая авторами новая конструкция пластинчатого воздухораспределителя (см. рис. 3) состоит из прямоугольного корпуса 1 с отверстиями для входа 2 и выхода воздуха 3, расположенными в нижней и верхней части корпуса соответственно. Воздухораспределитель содержит три ряда прямоугольных направляющих пластин 4, расположенных параллельно горизонтальной плоскости и смещенных друг относительно друга по высоте, причем нижний ряд представлен сплошной пластиной симметрично-вертикальной центральной оси корпуса, верхний и средний ряды состоят из двух пластин, отнесенных от вертикальной оси корпуса в противоположные стороны. Все три ряда пластин имеют зазор 5 с боковыми стенками корпуса воздухораспределителя [4].

К достоинствам предлагаемого воздухораспределителя [4] следует отнести:

- простоту конструкции и удобство монтажа;
- низкую стоимость капитальных и приведенных затрат на изготовление и монтаж воздухораспределителя;
- универсальность применения для культурно-зрелищных объектов;
- хорошие акустические показатели;
- экономию энергоресурсов за счет эффективного распределения воздуха системами вытесняющей вентиляции.

Разработанную авторами конструкцию пластинчатого воздухораспределителя предлагается установить в имеющееся отверстие прямоугольной формы 3 в полу помещения зрительного зала ККЗ «Пенза» (см. рис. 2, б), что позволит организовать подачу приточного воздуха с начальными параметрами струи из статической камеры в обслуживаемое помещение с требуемыми параметрами.

Организованное таким образом размещение внутри воздухораспределителя пластин способствует образованию внутри корпуса воздушных каналов, при движении по которым происходит разделение воздушного потока на несколько струй. Полученные воздушные струи направляются навстречу друг другу, вследствие чего происходит их соосное соударение, приводящее к эффективному снижению энергии струи, а следовательно, и ее скорости.

Конструкцию воздухораспределителя предполагается исследовать в лабораторных и натурных условиях.

Целью исследований в лабораторных условиях являлось изучение аэродинамических характеристик результирующей струи на выходе из пластинчатого воздухораспределителя. Особый интерес представляет изучение скорости гашения приточной струи на выходе из воздухораспределителя за счет соударения встречных плоских струй в изотермических условиях. Для этих целей был изготовлен экспериментальный пластинчатый воздухораспределитель-конструктор (рис. 4), устройство которого позволяет изменять положение пластин в рядах и их размер при условии, что корпус устройства и размеры входного и выходного отверстий не меняются.

Алгоритм и последовательность проведения исследований предлагаемого воздухораспределителя-конструктора в лабораторных условиях планируется проводить согласно методике, изложенной в [5]. Суть эксперимента заключается в исследовании пяти вариантов конструкций воздухораспределителя с целью определения оптимальной длины пластин в каждом ряду, а также их взаимного расположения по вертикали и горизонтали относительно друг друга. Целью эксперимента является принятие той

конструкции пластинчатого воздухораспределителя, которая сможет отвечать всем заявленным требованиям для воздухораспределителя вытесняющей вентиляции при скорости подачи воздуха в обслуживаемую зону в пределах 0,2-0,5 м/с.

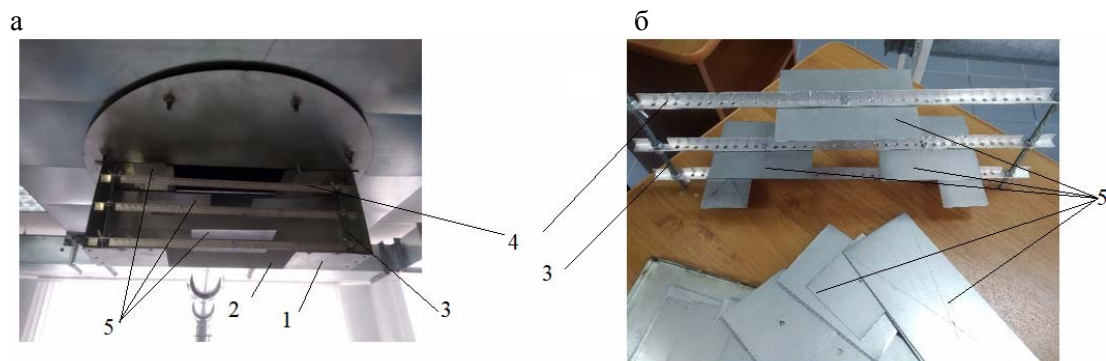


Рис. 4. Экспериментальный пластинчатый воздухораспределитель-конструктор:
1 – корпус; 2 – выходное приточное отверстие с постоянной площадью сечения;
3 – регулятор фиксации направляющих пластин по вертикали и горизонтали воздухораспределителя; 4 – планка для фиксации направляющих пластин;
5 – направляющие пластины

Схема экспериментальной установки для исследования результирующей струи приточного воздуха представлена на рис. 5.

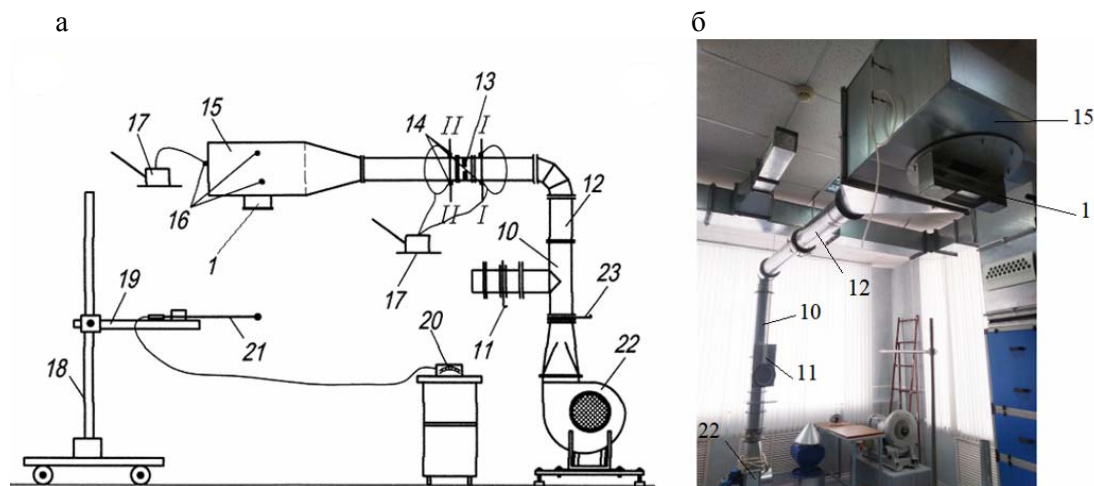


Рис. 5. Экспериментальная установка для исследования аэродинамических характеристик результирующей струи приточного воздуха:

- а – схема лабораторного стенда; б – общий вид лабораторного стенда;
1 – воздухораспределитель; 10 – тройник; 11, 23 – шиберная заслонка; 12 – воздуховод;
13 – стандартная диафрагма; 14 – штуцеры для измерения перепада давления; 15 – камера статического давления; 16 – штуцер для измерения статического давления в камере;
17 – микроанометр ММ-250; 18 – координатник; 19 – держатель координатника;
20 – термоанометр ТА-ЛИОТ; 21 – датчик термоанометра; 22 – вентилятор;
I-I, II-II – сечения соответственно до и после диафрагмы

По результатам планируемого исследования результирующей приточной струи в лабораторных условиях будут построены эпюры поля скоростей, которые позволят выявить наиболее выгодное геометрическое расположение пластин относительно друг друга внутри корпуса воздухораспределителя. Наиболее целесообразной конструкцией предлагаемого воздухораспределителя будет та, при которой угол бокового расширения струи составит $\alpha = 10-15^\circ$, а скорость воздуха на выходе в рабочую зону

обслуживаемого помещения не превысит 0,5 м/с на расстоянии 0,1...0,4 м, что является нормой санитарно-гигиенических условий.

После того как конструкция воздухораспределителя будет принята окончательно на основании полученных результатов исследований в лабораторных условиях, ее планируется внедрить в систему вытесняющей вентиляции реального объекта ККЗ «ПЕНЗА» и провести ряд натурных исследований параметров микроклимата в рабочей зоне зрительного зала.

Список литературы

1. Еремкин, А.И. Анализ схем климатизации зрительных залов культурно-просветительских центров / А.И. Еремкин, К. Петрова // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах / XXII Международная науч.-практ. конф. – Пенза: ПДЗ, 2021. – С. 118–123.
2. Field, A. Проектирование систем ОВК крупных зрелищных объектов: комплекс Лоури (Англия) / А. Field; пер. с ит. С.Н. Булековой // АВОК. – 2003. – № 2. – С. 28–29.
3. Фильчакина, И.Н. Исследование технологического кондиционирования воздуха локальным способом на модели с использованием нового воздухораспределителя / И.Н. Фильчакина, С.П. Трунков // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия / X Международная науч.-практ. конф. Ч. 4. Технические науки. – Новосибирск, 2015. – №3 (10). – С. 35–38.
4. Патент RU № 161125 U1. Пластинчатый воздухораспределитель / А.И. Еремкин, С.П. Трунков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУАС. – №2015146526/12; заявл. от 28.10.2015; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.
5. Фильчакина, И.Н. Технологическое кондиционирование воздуха локальным способом по типу вытесняющей вентиляции текстильных предприятий / И.Н. Фильчакина, А.И. Еремкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 203 с.

References

1. Eremkin, A.I. Analysis of climatization schemes for auditoriums of cultural and educational centers / A.I. Eremkin, K. Petrova // Problems of energy saving in the industrial and housing and communal sectors: XXII International scientific and practical. Conf. – Penza: PDZ, 2021. – P. 118–123.
2. Field, A. Design of HVAC systems for large entertainment facilities: Lowry complex (England) / A. Field; translation. S.N. Bulekova // ABOK. – 2003. – No. 2. – P. 28–29.
3. Filchakina. I.N. Investigation of technological air conditioning by a local method on a model using a new air distributor / I.N. Filchakina, S.P. Trunkov // Scientific prospects of the XXI century. Achievements and prospects of the new century: X International scientific and practical. conf. Part 4. Engineering sciences. – Novosibirsk, 2015. – No. 3 (10). – P. 35–38.
4. Patent RU No. 161125 U1. Lamellar air distributor / A.I. Eremkin, S.P. Trunkov; applicant and patent holder FGBOU VPO PGUAS. – dec. 2015146526/12 dated 10/28/2015; Published 04/10/2016. Bull. No. 10.
5. Filchakina, I.N. Technological air conditioning by a local method according to the type of displacement ventilation of textile enterprises / I.N. Filchakina, A.I. Eremkin. – Penza: PGUAS, 2012. – 203 p.

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

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

Мазурин Николай Николаевич,
аспирант кафедры «Физика и химия»
E-mail: kol29111992@yandex.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,
тел.: (8412) 36-82-09

Мишина Светлана Ивановна,
кандидат химических наук,
доцент кафедры «Химия и теория
и методика обучения химии»
E-mail: elancv@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

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

Mazurin Nikolai Nikolaevich,
Postgraduate of the Department «Physics and
Chemistry»
E-mail: kol29111992@yandex.ru

Penza State university

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,
tel.: (8412) 36-82-09

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

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ПЕН

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, Н.Н.Мазурин

В последнее время было получено значительное количество информации по синтезу и использованию дисперсных систем (пен и эмульсий), содержащих в своем составе твердые частицы. Проведен анализ современных направлений в повышении стабилизирующего действия твердых частиц: получение нано- и микрочастиц модификацией их поверхности методом химических реакций с органическими веществами; использование белков и полимеров для разработки технологий повышения устойчивости дисперсных систем, содержащих твердую фазу; разработка оптимального режима гидрофобизации твердой поверхности (направленный синтез), а также их диспергирование в водной фазе при изменении pH среды, концентрации электролита или ультразвуковом воздействии на исходную суспензию. Повышенная устойчивость пен, содержащих твердую фазу, делает перспективным их применение не только для повышения эффективности технологических процессов, но и для получения новых материалов с улучшенными свойствами (полимеры, пористые металлические материалы, адсорбенты).

Ключевые слова: твердые частицы, модификация поверхности, краевой угол, пена, пенные пленки, устойчивость

MODIFICATION OF THE SURFACE OF SOLID PARTICLES FOR OBTAINING STABLE FOAM

N.G. Vilkova, S.I. Mishina, N.N. Mazurin

Recently, a significant amount of information has been obtained on the synthesis and use of disperse systems (foams and emulsions) containing solid particles in their composition. In this paper, an analysis of modern trends in increasing the stabilizing effect of solid particles is carried out: obtaining nano- and microparticles by modifying their surface by the method of chemical reactions with organic substances; the use of proteins and polymers to develop technologies for increasing the stability of disperse systems containing a solid phase; development of an optimal mode of hydrophobization of a solid surface (targeted synthesis), as well as their dispersion in the aqueous phase when the pH of the medium changes, the electrolyte concentration changes, or ultrasonic

treatment of the initial suspension. The increased stability of foams containing a solid phase makes them promising not only for increasing the efficiency of technological processes, but also for obtaining new materials with improved properties (polymers, porous metallic materials, adsorbents).

Keywords: solid particles, surface modification, contact angle, foam, foam films, stability

В последнее время было получено значительное количество информации по синтезу и использованию дисперсных систем (пен и эмульсий), содержащих в своем составе твердые частицы. В качестве наиболее распространенных твердых веществ-стабилизаторов используются: глина, уголь, кремнезем, стекло, оксиды и гидроксиды многих металлов. Известно, что устойчивость трехфазных пен обусловлена адсорбцией частиц-стабилизаторов и образованием межфазных слоев на поверхности пенных пузырьков; капиллярным давлением в пенной пленке, содержащей твердую фазу; стерическим или электростатическим взаимодействием в адсорбционных слоях; механической прочностью и упругостью структур, которые формируются в дисперсионной среде в результате взаимодействия твердых частиц, поверхностно-активных веществ и воды [1–10]. Образование плотного слоя твердой фазы на границе раздела вода – воздух определяется энергией адсорбции отдельной частицы на межфазной поверхности и рассмотрено в [1, 10]:

$$\Delta G = \pi R^2 \sigma (1 \pm \cos \theta)^2, \quad (1)$$

где R – радиус частиц; σ – поверхностное натяжение жидкость/газ; θ – краевой угол, который образуется при расположении твердой частицы на границе раздела жидкость – газ.

Одной из причин устойчивости дисперсных систем, содержащих твердую фазу, является снижение межфазной (жидкость – газ) поверхностной энергии в результате выхода гидрофобизованных частиц на границу раздела [3–5, 10]. При этом энергия адгезии наночастиц на границе раздела воздух – жидкость в несколько сотен или тысяч раз больше, чем у типичной молекулы поверхностно-активного вещества. Как только наночастицы прикрепляются к границе раздела воздух – жидкость, такое прикрепление обычно необратимо. Расположение твердой частицы на границе раздела жидкость – газ зависит от степени заполнения её поверхности гидрофобизаторами и определяется межфазными поверхностными натяжениями: между жидкостью и газом; твердой частицей и жидкостью; твердой частицей и газом. В зависимости от степени ее гидрофобности возможны различные варианты расположения частицы на межфазной поверхности жидкость – газ, что определяет в дальнейшем устойчивость образующейся пены. Однако оптимальные условия для стабилизации частиц все еще не ясны.

Каптэй [11] теоретически показал, что угол контакта (θ) поверхности наночастиц для стабилизации пленки пены может быть между 20° и 90° , однако Хантер и др. [12] предположили, что оптимальный угол контакта может составлять от 70° до 80° . Принято считать, что очень хорошие пены возможны, когда угол контакта достигает 80° и более. Изменение степени гидрофобизации пенных пузырьков и значения краевых углов из суспензий свежесажженного ($\text{pH}=4,5-5$) гидроксида алюминия при увеличении концентрации масляной кислоты ранее были изучены [13]. Установлено, что повышение концентрации масляной кислоты от 0,6 до 3,5 % при постоянной концентрации сульфата алюминия, равной 3 %, приводит к увеличению краевых углов в исходных суспензиях до определенных максимальных значений ($58,6$ градуса). Подобную зависимость наблюдали и в суспензиях Аэросила-380 [14] при фиксированном содержании твердой фазы, соответствующем 1 %, 2 %, 4 % аэросила в исходной суспензии, и изменении концентрации гексиламина от 37,5 до 60 мМ и в суспензиях Ludox-HS с исходным нанометрическим размером частиц твердой фазы.

Изменение краевых углов в суспензиях, полученных из золя Ludox-HS, модифицированного гексиламином при изменении его концентрации представлено на рис. 1. Используемая концентрация кремнезёма в исходной суспензии в пересчете на SiO_2 изменялась от 0,5 до 2 %.

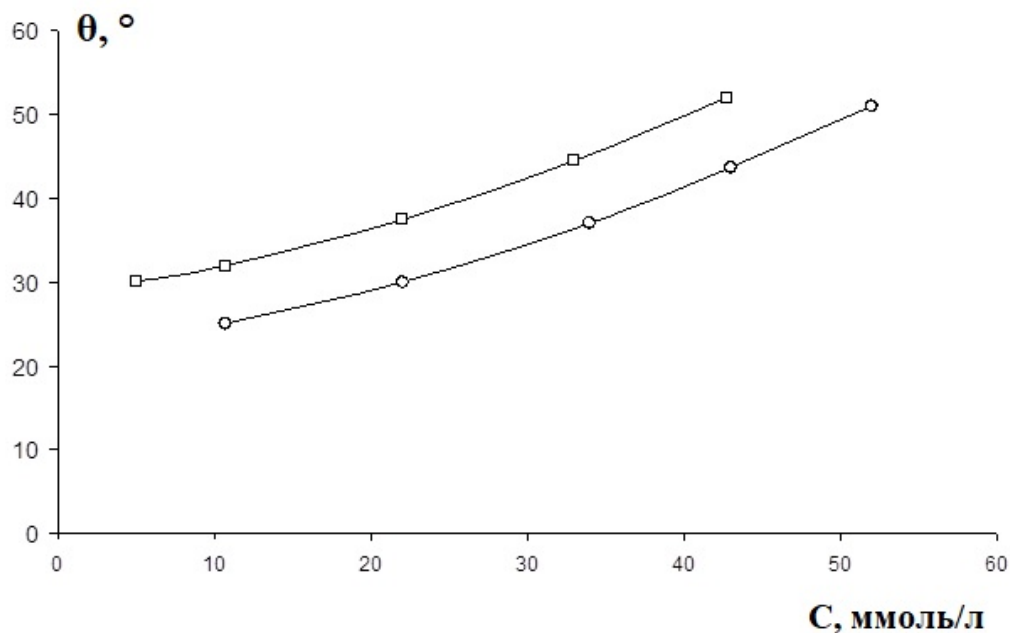


Рис. 1. Зависимость краевых углов от концентрации гексилamina в суспензиях кремнезёма с содержанием твердой фазы:
 $\square$ – 0,5 % Ludox; $\circ$ – 2 % Ludox

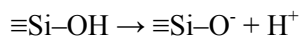
Повышение концентрации гексилamina приводит к росту краевого угла в изученных суспензиях кремнезёма до $50 - 54^\circ$. Дальнейшее увеличение концентрации гидрофобизатора (выше значений, отмеченных на рисунке) приводило к коагуляции твердых частиц вследствие резкого роста радиусов агрегатов (до $50-100$ мкм) и их коагуляции [4, 6, 14, 15]. Таким образом, существуют критическая концентрация гидрофобизатора и критическая относительная степень гидрофобизации поверхности $n_{гк}$, равная отношению концентраций ПАВ (моль/л) к концентрации твердой фазы (г/л). Критическая концентрация гексилamina, вызывающая коагуляцию частиц в суспензии, полученной из Ludox-40, равна $42,7$ и 53 ммоль/л, что соответствует краевым углам в исходных суспензиях $\theta = 51$ и 52° соответственно. Исследованные пены отличались большой устойчивостью при достижении указанных значений краевых углов в исходных суспензиях. Установлено [16], что дальнейшее повышение краевого угла смачивания твердых частиц возможно при ультразвуковом воздействии на исходную суспензию. Отметим, что краевой угол после предварительной обработки суспензии кремнезёма в течение 5 минут и дальнейшего добавления гидрофобизатора – гексилamina – увеличивался и достигал 80 градусов. Комбинация частиц с низким зарядом и относительно высокой ($\theta \geq 50^\circ$) гидрофобностью, по-видимому, является существенным требованием для энергетически выгодного расположения их на поверхности воздух – вода по сравнению с объемом. Было изучено влияние гидрофобизатора на устойчивость дисперсной системы при увеличении его концентрации и $n_g \geq n_{гк}$ [14]. Показано, что при увеличении концентрации гексилamina более 60 мМ время жизни пен снижается до 2 суток, а при дальнейшем росте концентрации ПАВ более 95 мМ пены разрушаются мгновенно. Для пен, полученных из более концентрированных суспензий ($4\% \text{ SiO}_2$), при увеличении концентрации гексилamina более 65 мМ наблюдается не уменьшение времени жизни системы, а переход пены в гель, который в гравитационном поле живет сколь угодно долго. Но при дальнейшем увеличении количества гидрофобизатора вязкость системы начинает снижаться, и в результате образуется подвижная суспензия, при встряхивании которой получается объемная, но быстроразрушающаяся пена. При изменении концентрации гексилamina установлено, что для всех суспензий кремнезёма ($0,6-6\%$) имеется область с максимальным значением напряжения сдвига τ_c , что хорошо согласуется с данными об изменении устойчивости в гравитационном поле и в условиях пониженного давления.

В настоящее время основными направлениями в повышении стабилизирующего действия твердых частиц являются:

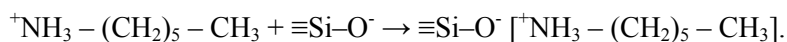
- получение нано- и микрочастиц модификацией их поверхности методом химических реакций с органическими веществами [3, 6, 7, 14, 19, 22, 24], методом соосаждения [17] и золь-гель-технологий;
- использование белков и полимеров для разработки технологий повышения устойчивости дисперсных систем, содержащих твердую фазу [25, 26];
- разработка оптимального режима гидрофобизации твердой поверхности частиц при химическом взаимодействии с гидрофобизатором (направленный синтез), а также их диспергирование в водной фазе при изменении pH среды, концентрации электролита или ультразвуковом воздействии на исходную суспензию [14, 18, 19].

Исследованные нами гетерогенные процессы взаимодействия ПАВ и твердых частиц различной природы могут быть описаны определенными химическими реакциями. Взаимодействие поверхности частицы кремнезема и ПАВ с короткой длиной углеводородной цепи, например гексиламина, идет до тех пор, пока на поверхности кремнезема не образуется монослой ПАВ, и соответствует двум стадиям:

- образование отрицательно заряженной поверхности кремнезема в щелочной среде:



- взаимодействие гексиламина с твердой поверхностью и образование модифицированного кремнезема



Для рассмотренных в работах [3–6, 14] форм оксида кремния изоэлектрическая точка и точка нулевого заряда соответствуют значению водородного показателя $\text{pH}=1,8-2,2$. Показано [19], что взаимодействие гидрофобизатора – гексиламина – происходит с отрицательно заряженной поверхностью кремнезема и значениях pH более 7. В указанной области водородного показателя повышение относительной степени гидрофобизации твердой поверхности сопровождалось ростом краевого угла смачивания оксида кремния, увеличением среднего радиуса частиц-стабилизаторов и повышением устойчивости образующейся пены в определенных пределах.

Установлено, что значение дзета-потенциала наночастиц чистого SiO_2 невелико и электростатическое отталкивание слабое. После модификации поверхностный электрический потенциал $\text{SiO}_2\text{-A-R}$ увеличивается, растет сила электростатического отталкивания, что приводит к повышению устойчивости исходной дисперсии.

Пены, стабилизированные частицами оксида алюминия, гидрофобизованными масляной и валериановой кислотами ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$, $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$), представлены в работах [7–9].

Важное влияние на процесс коагуляции и свойства образующейся пены оказывал водородный показатель. Точка нулевого заряда частиц $\text{Al}(\text{OH})_3$ соответствует $\text{pH}=6,7$ [18]. При взаимодействии частиц такого золя с раствором масляной кислоты при $\text{pH}=4,8-5$ на поверхности раздела частица/вода молекулы кислоты химически адсорбируются на поверхности $\text{Al}(\text{OH})_3$, образуя соли алюминия $((\text{C}_3\text{H}_7\text{COO})_3\text{Al})$, способные стабилизировать пену. Заметное влияние водородного показателя отмечено при стабилизации пен гидрофобизованным оксидом титана [19]. Наиболее устойчивые системы образовывались только при значениях водородного показателя $\text{pH}=5$, который соответствует ИЭТ точки оксида [20]. Особый интерес для гидрофобизации твердых частиц представляют химические реакции на их поверхности. В работе [22] рассмотрен синтез амфифильного химически модифицированного нанокремнезема в результате реакции 3-аминопропилтриэтоксисилана (АПТС) и парофазного гидрофильного нанокремнезема по реакции замещения (рис. 2).

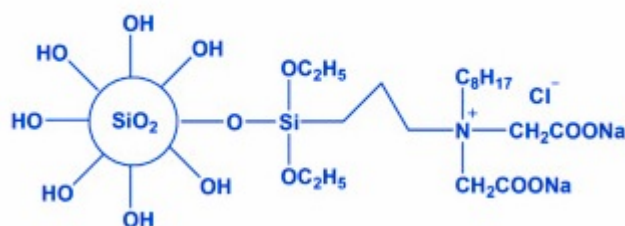


Рис. 2. Гидрофобизация нанокремнезема [22]

Замена гидроксильных групп указанным органическим соединением (АПТС) повышала степень гидрофобности поверхности. Испытание на статический контактный угол использовали в данной работе для анализа эффекта модификации. Было замечено, что капли воды на поверхности немодифицированного образца немедленно растекались, а контактный угол был в основном равен 0, что указывает на то, что чистый SiO_2 обладает высокой гидрофильностью. На поверхности модифицированного образца краевой угол составлял $70,3^\circ$.

Результаты экспериментальной работы [24] показывают, что добавление наночастиц к растворам альфа-олефинсульфоната (AOS) и гуаровой камеди может значительно повысить стабильность пены. То есть пенопласты на основе полимера и поверхностно-активного вещества менее стабильны по сравнению с пенопластами на основе поверхностно-активного вещества и наночастиц.

В исследовании [24] краевые углы были измерены методом сидячей капли для растворов AOS и раствора AOS-гуара в присутствии SiO_2 и Fe_2O_3 . Показано, что пена не образуется при θ между 0 и 30° . Стабильная пена была получена при θ между 50 и 85° , а также при θ более 85° . Однако в последнем случае дисперсная система наиболее устойчива. В работах [3–8, 13–15] использовали измерение краевого угла смачивания твердой поверхности методом прижатого пузырька газа (рис. 4).

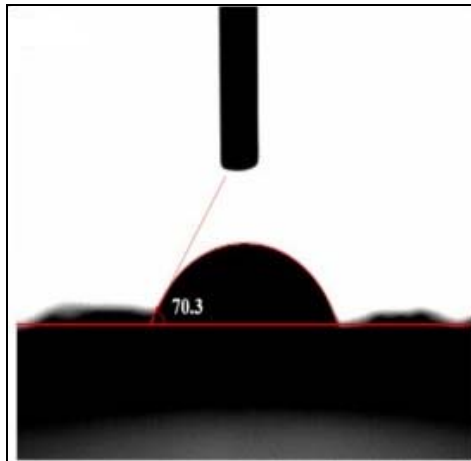
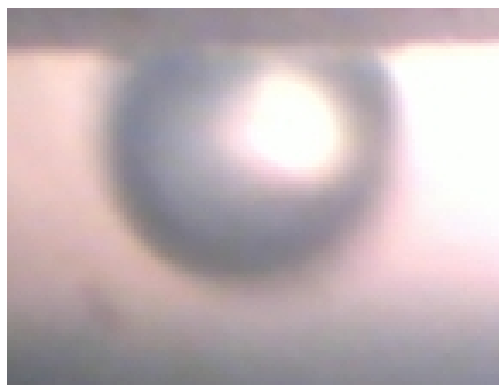


Рис. 3. Состояние капли воды на поверхности твердого модифицированного кремнезема [22]

Рис. 4. Фотография пенного пузырька из суспензий свежесозданного ($\text{pH}=4,8-5$) гидроксида алюминия и масляной кислоты

В таблице представлены результаты определения краевых углов, которые образуются между пенным пузырьком, стабилизированным твердыми частицами, и стеклянной пластинкой.

Краевые углы между пенным пузырьком, сформированным в суспензиях свежесозданного гидроксида алюминия и масляной кислоты, и стеклянной пластинкой

0,6 % МК + 3 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	1,2 % МК + 3 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	1,86 % МК + 3 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	2,5 % МК + 3 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	3,5 % МК + 3 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
$\theta = 45,5^\circ \pm 2^\circ$	$\theta = 46,3^\circ \pm 2^\circ$	$\theta = 53,7^\circ \pm 2^\circ$	$\theta = 57,2^\circ \pm 2^\circ$	$\theta = 58,6^\circ \pm 2^\circ$

Как отмечалось [16], одним из методов повышения краевого угла смачивания твердых частиц является ультразвуковое воздействие на исходную суспензию.

Основным механизмом повышения устойчивости пены наночастицами является их адсорбция и агрегация в пленке и объемной фазе пены [5, 6, 14, 22, 25]. Расположение твердых наночастиц в пенной пленке выглядит следующим образом: однослойные частицы с мостиками (рис. 5,а), двухслойные плотно расположенные частицы или агрегаты сетчатых частиц (рис. 5,б). Среди них агрегация считается эффективным механизмом стабилизации пены [14, 25]. Присутствие наночастиц (на границе раздела газ – жидкость) замедляет гравитационный синерезис и диффузионный перенос газа в пене.

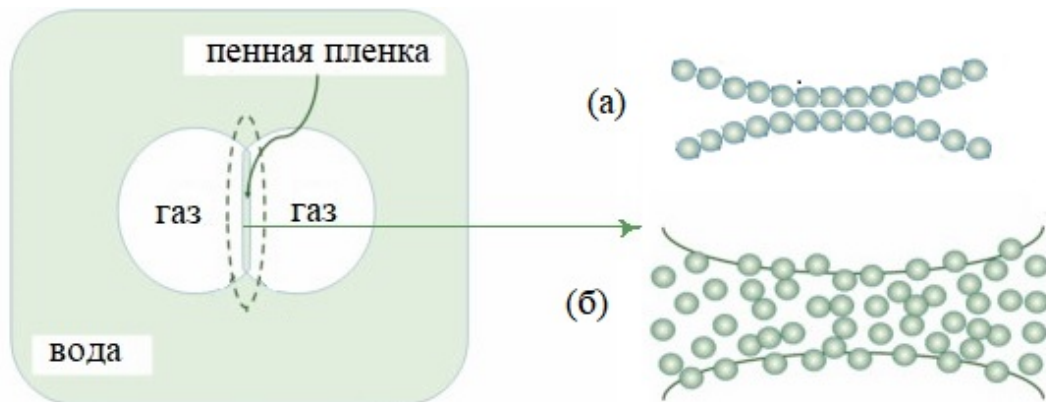


Рис. 5. Структура пенных пленок

Изменение толщины пенных пленок при изменении краевого угла смачивания частиц рассмотрено в работах [3–6, 15]. В частности, при $\theta \approx 30^\circ$ из 2 % и 20 % золя LudoxHS-40 с гексиламином образуются предположительно бислойные пенные пленки. В этом случае объемные пены (высотой 1-2 см) неустойчивы, быстро разрушаются при действии приложенного перепада давления $\Delta P = 5$ кПа и характеризуются объемной долей жидкости в пене от 0,01 до 0,005. Структура такой «ячеистой» пены представлена на рис. 6.



Рис. 6. Формы ячеек в пенах, стабилизированных гидрофобизованным людоксом (1 % людокс + 11 ммоль/л гексиламин, $n_g = 1.1$ ммоль/г)

Толщина свободных пенных пленок была 8-10 мкм. При $\theta \approx 46^\circ$ толщина свободных пенных пленок, полученных из золя LudoxHS-40 с гексиламином, достигает 55-100 мкм. Полученные из указанной суспензии пены характеризуются увеличением объемной доли жидкости до 0.05-0.016, образованием геля в дисперсионной среде и большей устойчивостью (время жизни под действием приложенного перепада давления $\Delta P = 1$ кПа составляет 35 минут). Такие же закономерности наблюдали при

использовании Аэросила-380. Отметим, что краевым углам 45^0 - 50^0 соответствовали устойчивые пенные пленки и пены.

Как отмечалось, научные исследования таких дисперсных систем в настоящее время обусловлены новыми возможностями их применения как для повышения эффективности технологических процессов (флотация, выделение нефти), так и для получения материалов с новыми свойствами.

В работах [23,24] рассмотрено использование наночастиц (НЧ) для повышения нефтеотдачи. Использование НЧ может значительно улучшить процесс, изменяя смачиваемость породы, улучшая подвижность нефтяной фракции и уменьшая межфазное натяжение на границе раздела нефть / вода. В работе [23] представлена трехмерная численная модель кремнеземной наножидкости, предложенная для увеличения нефтеотдачи пласта. Разработанная модель хорошо подтверждена экспериментальными данными, в которых использовали диоксид кремния (SiO_2) и додецилсульфат натрия (SDS) с различными концентрациями. Определена оптимальная концентрация дисперсной системы SiO_2 – SDS для обеспечения максимального коэффициента извлечения (71,86 %). Процесс повышения нефтеотдачи пеной, модифицированной твердыми частицами, рассмотрен также в [24]. Для этих целей был синтезирован амфифильный химически модифицированный нанокремнезем в результате реакции 3-аминопропилтриэтоксисилана (АПТС) и парофазного гидрофильного нанокремнезема по реакции замещения.

В работе [24] показано, что пены, стабилизированные наночастицами, представляют собой перспективные заменители полимеров. Экспериментальные результаты этой работы подтвердили, что добавление наночастиц (оксидов кремния и железа) к растворам альфа-олефинсульфоната (AOS) и гуаровой камеди может значительно повысить стабильность пены. Установлено, что дисперсия наночастиц в растворе может образовывать пену с более однородной структурой по сравнению с раствором AOS. Наночастицы могут образовывать вязкоупругий слой вокруг поверхности пузырька, что может сделать пленку более толстой и защитить пузырьки от усадки. Поверхностно-активные вещества могут разлагаться при высоких температурах и/или в средах с высокой соленостью, что ограничивает их применение для стабилизации пены на практике. Улучшение стабильности пены и защита поверхностно-активных веществ от разрушения имеют большое значение и могут быть достигнуты путем добавления наночастиц или полимеров в раствор.

В работе [26] представлен новый класс стабильных пен Пикеринга, которые могут сохранять устойчивость в течение нескольких недель при комнатной температуре, но при необходимости могут быстро разрушаться с помощью магнитного поля. Такие реагирующие пенные системы могут найти применение в различных промышленных и экологических процессах, требующих контролируемого пеногашения. Эти пены стабилизированы частицами фталата гипромеллозы (HP-55) и содержат частицы карбонильного железа, покрытые олеиновой кислотой, встроенные в матрицу HP-55. Предложены различные механизмы, которые контролируют разрушение пены под влиянием магнитного поля. В работе [27] рассмотрен метод получения пен взбиванием суспензии металлического порошка в присутствии ПАВ. При определенной аэрации пену можно заливать в различные формы для получения высокопористого материала.

Заключение

В работе представлен анализ современных методов модификации поверхности твердых частиц для получения устойчивых пен. Установлено влияние краевого угла смачивания частиц на устойчивость образующихся дисперсных систем. Применение ультразвуковой обработки суспензий может приводить к повышению краевого угла смачивания частиц. Показано, что коагуляция частиц в исходных суспензиях может служить препятствием к получению устойчивых пен. Повышенная устойчивость пен, содержащих твердую фазу, делает перспективным их применение не только для повышения эффективности технологических процессов, но и для получения новых материалов с улучшенными свойствами (полимеры, пористые металлические материалы, адсорбенты).

1. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B. P. Binks, J. Clint // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
2. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B. P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
3. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P. M. Kruglyakov, S. I. Elaneva, N. G. Vilkova, S. I. Karakashev // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol. 165, N. 2. – P. 108–116.
4. Vilkova, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendelev Communication*. – 2011. – Vol. 21, N 6. – P. 344–345.
5. Vilkova, N.G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox/ N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendelev Communication*. – 2012. – Vol. 22, N 4. – P. 227–228.
6. Вилкова, Н.Г. Влияние гидрофобности частиц кремнезема на устойчивость пен и пенных пленок / Н.Г. Вилкова, С.И. Еланева // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 62–66.
7. Нуштаева, А.В. Стабилизация пен и эмульсий нерастворимыми порошками / А.В.Нуштаева, Н.Г.Вилкова, С.И. Еланёва. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 132 с.
8. Нуштаева, А.В. Гидрофобизация частиц кремнезема различными катионными поверхностно-активными веществами / А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2021. – Т.63, № 3. – С. 22–29.
9. Kaptey, G. On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2006. – Vol. 282–283. – P. 387–401.
10. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 391 p.
11. Kaptey, G. Interfacial criteria for stabilization of liquid foams by solid particles / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2003. – Vol. 230, N 1–3. – P. 67–80.
12. Hunter, T.N. The role of particle in stabilising foams and emulsions / T.N. Hunter, R.J. Pugh, G.V. Franks, G.J. Jameson // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2008. – N 137. – P. 57–81.
13. Вилкова, Н.Г. Пены и эмульсии, стабилизированные различными коллоидными частицами / Н.Г.Вилкова, А.В.Нуштаева // *Вестник Башкирского государственного университета*. – 2017. – №3. – С. 701–706
14. Mishina, S.I. Study of stability and syneresis of foams stabilized by particles of colloidal silica and aluminum hydroxide: Diss. ... Cand. chem. sciences. Moscow State University of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov. – M., 2013. – 176 p.
15. Nushtaeva, A.V. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of the interfacial tension or surface tension / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova, // *Mendelev commun*. – 2013. – Vol. 23, N3. – P.155–156.
16. Вилкова, Н.Г. Ультразвуковая обработка суспензий для получения устойчивых трехфазных пен и материалов с улучшенными свойствами / Н.Г. Вилкова, Г.А. Фокин, С.И. Мишина, Н.Н. Мазурин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2020. – №1(42). – С. 37–45.
17. Zhou, J. Fast demulsification of oil-water emulsions at room temperature by functionalized magnetic nanoparticles / J. Zhou, H. Sui, J. Ma, X. Li, N. H.A. Al-Shiaani, L. He // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Vol. 274. – P. 118967.
18. Kosmulski, M. The pH dependent surface charging and points of zero charge / M. Kosmulski // *Adv. Colloid Interface Sci*. – 2018. – Vol. 251. – P. 115–138.

19. Вилкова, Н.Г. Свойства пен, содержащих гидрофобизованный оксид титана// Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, Е.А. Депутатов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 22–29.
20. Бессуднова, Е.В. Синтез и исследование наноразмерных частиц диоксида титана для применения в катализе и нанобиотехнологиях: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04 / Институт катализа им. Г. К. Борескова. – Новосибирск, 2014. – 145 с.
21. Вилкова, Н.Г. Влияние водородного показателя на устойчивость трехфазных пен / Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, Шумкина А.А. // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4 (49). – С. 140–150.
22. Zhao, T. The construction of amphiphilic chemical modified nano silicon dioxide reinforced foam system / T.Zhao, S. Li, J.Chen, J.Peng, W.Sun, Q.Guo // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 205. – P.108917.
23. Mahmud, H.K.B. Numerical analysis of SiO₂-SDS surfactant effect on oil recovery in sandstone reservoirs / H.K.B. Mahmud, B.C. Tan, A. Giwelli // Energy Geoscience. – 2021. – N2(3). – P. 1–7.
24. Emrani, A.S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO₂ foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din// Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2017. – Vol. 524. – P. 17–27.
25. Erasov, V.S. Stability and rheology of foams containing microbial polysaccharide and particles of silica and bentonite clay. / V.S. Erasov, M.Y. Pletnev, B.V. Pokidko // Colloid Journal. – 2015. – Vol. 77, No. 5. – P. 614–621
26. Blanco, E. Stability and Viscoelasticity of Magneto-Pickering Foams / E. Blanco, S. Lam, S.K. Smoukov, K.P. Velikov, S.A. Khan, O.D. Velez // Langmuir. – 2013. – N 29. – P.10019–10027.
27. Kennedy, A.R. Preparation and characterisation of metal powder slurries for use as precursors for metal foams made by gel casting / A.R. Kennedy, X. Lin // Powder Metallurgy. – 2011. – N 54(3). – P. 376–381.

References

1. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B. P. Binks, J. Clint // Advances in Colloid and Interface Science. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
2. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B. P. Binks, R. Murakami // Nature Materials. – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
3. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilkova, S.I. Karakashev // Advances in Colloid and Interface Science. – 2011. – Vol. 165, N. 2. –P. 108–116.
4. Vilkova, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // Mendeleev Communication. – 2011. – Vol. 21, N 6. – P. 344–345.
5. Vilkova, N.G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox/ N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // Mendeleev Communication. – 2012. – Vol. 22, N 4. – P. 227–228.
6. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobicity of silica particles on the stability of foams and foam films / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva // Izvestia of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology. – 2013. – Vol. 56, N 9. – P. 62–66.
7. Nushtaeva, A.V. Stabilization of foams and emulsions with insoluble powders / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova, S.I. Elaneva. – Penza: PGUAS, 2011. – 132 p.
8. Nushtaeva, A.V. Hydrophobization of silica particles with various cationic surfactants / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova // News of universities. Chemistry and chemical technology. – 2021. – Vol.63, N 3. – P. 22–29.
9. Kaptey, G. On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptey //

Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2006. – Vol. 282. – 283. – P. 387–401.

10. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 391 p.

11. Kaptey, G. Interfacial criteria for stabilization of liquid foams by solid particles / G. Kaptey // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2003. – Vol. 230, N 1–3. – P. 67–80.

12. Hunter, T.N. The role of particle in stabilising foams and emulsions / T.N. Hunter, R.J. Pugh, G.V. Franks, G.J. Jameson // Advances in Colloid and Interface Science. – 2008. – N 137. – P. 57–81.

13. Vilkova, N.G. Foams and emulsions stabilized by various colloidal particles / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva // Bulletin of the Bashkir State University. – 2017. – N 3. – P. 701–706.

14. Mishina, S.I. Study of stability and syneresis of foams stabilized by particles of colloidal silica and aluminum hydroxide: Diss. ... Cand. chem. sciences. Moscow State University of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov. – M., 2013. – 176 p.

15. Nushtaeva, A.V. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of the interfacial tension or surface tension / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova, // Mendelev commun. – 2013. – Vol. 23, N3. – P.155–156.

16. Vilkova, N.G. Ultrasonic processing of suspensions to obtain stable three-phase foams and materials with improved properties / N.G. Vilkova, G.A. Fokin, S.I. Mishina, N.N. Mazurin // Regional architecture and construction. – 2020. – N 1(42). – P. 37–45.

17. Zhou, J. Fast demulsification of oil-water emulsions at room temperature by functionalized magnetic nanoparticles / J. Zhou, H. Sui, J. Ma, X. Li, N. H.A. Al-Shiaani, L. He // Separation and Purification Technology. – 2021. – Vol. 274. – P. 118967.

18. Kosmulski, M. The pH dependent surface charging and points of zero charge / M. Kosmulski // Adv. Colloid Interface Sci. – 2018. – Vol. 251. – P. 115–138.

19. Vilkova, N.G. Properties of foams containing hydrophobized titanium oxide / N.G. Vilkova, S.I. Mishina, E.A. Deputatov // News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology. – 2020. – Vol. 63, N 3. – P. 22–29.

20. Bessudnova, E.V. Synthesis and study of nanosized particles of titanium dioxide for application in catalysis and nanobiotechnologies: dis. ... cand. chem. Sciences: 02.00.04/ Institute of Catalysis. G. K. Boreskova. – Novosibirsk, 2014. – 145 p.

21. Vilkova, N.G. Influence of the hydrogen index on the stability of three-phase foams / N.G. Vilkova, S.I. Mishina, Shumkina A.A. // Regional architecture and construction. – 2021. – N 4 (49). – P. 140–150.

22. Zhao, T. The construction of amphiphilic chemical modified nano silicon dioxide reinforced foam system / T. Zhao, S. Li, J. Chen, J. Peng, W. Sun, Q. Guo // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 205. – P. 108917.

23. Mahmud, H.K.B. Numerical analysis of SiO₂-SDS surfactant effect on oil recovery in sandstone reservoirs / H.K.B. Mahmud, B.C. Tan, A. Giwelli // Energy Geoscience. – 2021. – N2(3). – P. 1–7.

24. Emrani, A.S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO₂ foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2017. – Vol. 524. – P. 17–27.

25. Erasov, V.S. Stability and rheology of foams containing microbial polysaccharide and particles of silica and bentonite clay. / V.S. Erasov, M.Y. Pletnev, B.V. Pokidko // Colloid Journal. – 2015. – Vol. 77, No. 5. – P. 614–621.

26. Blanco, E. Stability and Viscoelasticity of Magneto-Pickering Foams / E. Blanco, S. Lam, S.K. Smoukov, K.P. Velikov, S.A. Khan, O.D. Velev // Langmuir. – 2013. – N 29. – P. 10019–10027.

27. Kennedy, A.R. Preparation and characterisation of metal powder slurries for use as precursors for metal foams made by gel casting / A.R. Kennedy, X. Lin // Powder Metallurgy. – 2011. – N 54(3). – P. 376–381.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2022_2_134

*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*Акционерное общество «Научно-
производственное предприятие "Рубин"»*Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,
тел.: +7-8412-20-48-08**Князев Владимир Александрович,**
кандидат технических наук,
инженер 1-й категории*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*Joint Stock Company «Research And
Production Enterprise Rubin»*Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,
tel: + 7-8412-20-48-08**Knyazev Vladimir Aleksandrovich,**
Candidate of Sciences,
1st Category Engineer

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПУЗЫРЬКИ, ВСПЛЫВАЮЩИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ И РЕЖИМЕ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ ЗАКОНА СОПРОТИВЛЕНИЯ

С.Ю. Андреев, В.А. Князев

Приведены результаты теоретических исследований свойств водовоздушной смеси, содержащей пузырьки воздуха, всплывающие в переходном турбулентном режиме и в области автомодельности закона сопротивления. Показано, что при увеличении среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси от $d_{\Pi} = 0,00144$ м до $d_{\Pi} = 0,005$ м происходит сжатие их поверхности, сопровождающееся повышением величины коэффициента гидравлического сопротивления ζ и уменьшением средней скорости всплывания v_{Π} , м/с. При среднем диаметре пузырьков воздуха в водовоздушной смеси более $d_{\Pi} = 0,005$ м они всплывают в области квадратичного закона сопротивления, при котором величина коэффициента гидравлического сопротивления ζ имеет постоянное значение. Получены математические зависимости, описывающие свойства водовоздушных смесей, содержащих пузырьки воздуха, всплывающие в переходном турбулентном режиме и режиме квадратичного закона сопротивления. Использование полученных зависимостей позволит оптимизировать процесс очистки сточных вод.

Ключевые слова: пузырек воздуха, гидравлическая крупность, поверхностное натяжение, коэффициент гидравлического сопротивления, режим всплывания, коэффициент газонаполнения

THEORETICAL ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF A WATER-AIR MIXTURE CONTAINING BUBBLES FLOATING IN THE TRANSIENT TURBULENT MODE AND SELF-SIMILARITY MODE

S.Yu. Andreev, V.A. Knyazev

The results of theoretical studies of the properties of a water-air mixture containing air bubbles floating in the transient turbulent regime of self-similarity of the law of resistance are presented. It is shown that with an increase in the average diameter of air bubbles in the water-air mixture to, their

surface is compressed, accompanied by an increase in the value of the hydraulic resistance coefficient and a decrease in the average rate of surfacing. With an average diameter of air bubbles in a water-air mixture, they float in the area of the quadratic law of resistance, at which the value of the coefficient of hydraulic resistance has a constant value. Mathematical dependences describing the properties of water-air mixtures containing air bubbles floating in the transient turbulent regime and the regime of the quadratic law of resistance are obtained. The use of the obtained dependencies will optimize the wastewater treatment processes.

Keywords: air bubble, hydraulic fineness, surface tension, coefficient of hydraulic resistance, floating mode, gas filling coefficient

В технологическом процессе очистки сточных вод широкое распространение получили методы, предполагающие использование динамических двухфазных смесей «вода – воздух».

Динамическая двухфазная смесь «вода – воздух» может быть получена двумя способами [1, 2]. Первый способ предусматривает продувку сжатого воздуха через слой очищаемых сточных вод (барботирование). Вторым способом предполагается выделение мелкодисперсных пузырьков из перенасыщенного раствора воздуха в воде, получаемого при сбросе избыточного давления в обрабатываемых сточных водах (компрессионный метод флотации).

Метод компрессионной флотации широко используется в технологических процессах очистки сточных вод от гидрофобных загрязнений (жиры, масла, нефтепродукты). Барботирование сжатого воздуха через слой очищаемых сточных вод реализуется в процессе работы пневматических систем аэрации и в системах пневматического перемешивания объема усреднителей концентрации загрязнений сточных вод.

Эффективность использования динамических двухфазных смесей «вода – воздух» в процессе очистки сточных вод не может быть обеспечена без объективной оценки их свойств.

Одним из основных технологических показателей, характеризующих свойства двухфазовой смеси «вода – воздух», является величина гидравлической крупности пузырьков воздуха U_{Π} , мм/с.

На рис.1 представлен график зависимости величины гидравлической крупности свободно всплывающего пузырька воздуха U_{Π} , мм/с $\cdot 10^3$, от его диаметра d_{Π} , мм, приведенный в работе Кутателадзе С.С. и Стариковича М.А. «Гидродинамика газожидкостных систем».

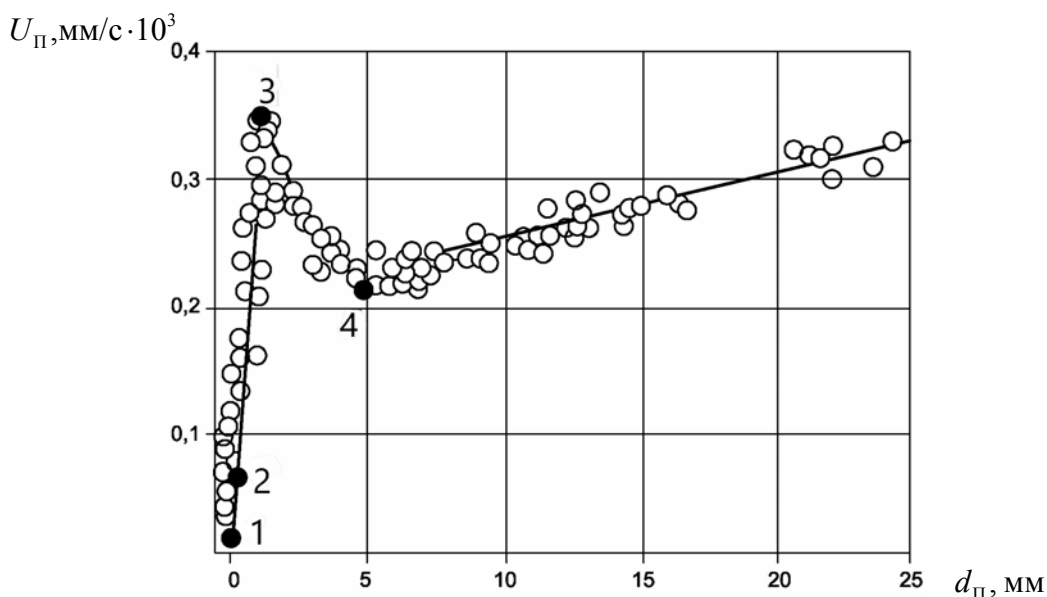


Рис. 1. Зависимость величины гидравлической крупности U_{Π} , мм/с $\cdot 10^3$, свободно всплывающего пузырька воздуха в воде от его диаметра d_{Π} , мм

Точка 3 на графике, представленном на рис. 1, соответствует переходу пузырька воздуха, сохраняющего строго сферическую форму, в турбулентный режим всплывания. В точке наблюдается равенство действующих на него сил: $F_{\text{Ар}}$ – силы Архимеда, Н; $F_{\text{Гд}}$ – силы гидродинамического сопротивления движения пузырька воздуха, Н и $F_{\text{Пн}}$ – силы поверхностного натяжения (силы Лапласа), Н.

$$F_{\text{Ар}} = F_{\text{Гд}} = F_{\text{Пн}}, \text{ Н}; \quad (1)$$

$$F_{\text{Ар}} = \frac{\pi d_{\text{П}}^3}{6} g (\rho - \rho_{\text{в}}), \text{ Н}; \quad (2)$$

$$F_{\text{Гд}} = \frac{\pi d_{\text{П}}^2}{4} \zeta \rho \frac{v_{\text{П}}^2}{2}, \text{ Н}; \quad (3)$$

$$F_{\text{Пн}} = \pi d_{\text{П}} \sigma_{\text{П}}, \text{ Н}, \quad (4)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – соответственно плотность воды и воздуха); ζ – коэффициент гидравлического сопротивления пузырька воздуха; $v_{\text{П}}$ – скорость движения пузырька воздуха относительно воды, м/с; $\sigma_{\text{П}}$ – коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха в воде, Н/м.

В точке 3 в соответствии с данными, представленными на рис. 1, скорость всплывания пузырька воздуха в воде будет иметь значение $v_{\text{П}} = 0,35 \text{ м/с}$ (величина гидравлической крупности пузырька воздуха $U_{\text{П}} = 350 \text{ мм/с}$).

В соответствии с данными, приведенными в [3], при переходе в турбулентный режим всплывания величина критерия Рейнольдса, определяемого по формуле (5), как для твердого шара, так и для пузырька воздуха, будет иметь значение $Re=500$.

$$Re = \frac{v_{\text{П}} d_{\text{П}}}{\nu}, \quad (5)$$

где $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематический коэффициент вязкости воды.

Диаметр пузырька воздуха в точке 3 может быть определен из формулы (5):

$$d_{\text{П}} = \frac{Re \nu}{v_{\text{П}}} = \frac{500 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}}{0,35} = 0,00144 \text{ м}. \quad (6)$$

Из условия равенства силы Архимеда $F_{\text{Ар}}$ и силы Лапласа $F_{\text{Пн}}$ для пузырька сферической формы может быть определена величина коэффициента поверхностного натяжения в точке 3:

$$\sigma_{\text{П}} = \frac{\pi d_{\text{П}}^3}{6} g (\rho - \rho_{\text{в}}) \frac{1}{\pi d_{\text{П}}} = \frac{d_{\text{П}}^2}{6} g (\rho - \rho_{\text{в}}) = \frac{0,00144^2}{6} 9,8 (998,2 - 1,2) = 0,034 \text{ м}. \quad (7)$$

Из условия равенства силы Архимеда $F_{\text{Ар}}$ и силы гидродинамического сопротивления движению пузырька воздуха может быть найдена величина коэффициента гидравлического сопротивления пузырька воздуха ζ :

$$\zeta = \frac{2}{3} \frac{2 g d_{\text{П}}}{v_{\text{П}}^2} \frac{\rho - \rho_{\text{в}}}{\rho} = \frac{2}{3} \frac{2 \cdot 9,8 \cdot 0,00144}{0,35^2} \frac{998,2 - 1,2}{998,2} = 0,15. \quad (8)$$

Величина увеличения давления воздуха внутри пузырька, происходящего под действием силы поверхностного натяжения, может быть определена по формуле Лапласа:

$$\Delta P_{\text{пн}} = \frac{4\sigma_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} = \frac{4 \cdot 0,0034}{0,00144} = 9 \text{ Па} . \quad (9)$$

Величина увеличения давления воздуха внутри пузырька, происходящего под действием силы гидродинамического сопротивления движению пузырька воздуха, может быть вычислена по формуле

$$\Delta P_{\text{гд}} = \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^2}{2} = 0,15 \cdot 998,2 \frac{0,35^2}{2} = 9 \text{ Па} . \quad (10)$$

В турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха, наблюдаемом правее точки 3 (см. рис. 1), выполняется условие динамического равенства действующих на пузырек сил и равенство давлений $\Delta P_{\text{пн}}$ и $\Delta P_{\text{гд}}$:

$$\Delta F_{\text{пн}} = F_{\text{ар}} = F_{\text{гс}}, \text{ Н}; \quad (11)$$

$$\Delta P_{\text{пн}} = \Delta P_{\text{гд}}, \text{ Па} . \quad (12)$$

В этом режиме при увеличении диаметра пузырька воздуха более $d_{\text{п}} = 0,00144\text{м}$ увеличение силы Архимеда $F_{\text{ар}}$ приводит к деформации поверхности пузырька, в результате чего он изменяет свою форму и приобретает вид сплюсненного сфероида с большей осью, нормальной к направлению движения пузырька. Изменение формы пузырька воздуха приводит к повышению величины коэффициента гидравлического сопротивления ζ , что обуславливает переход от вязкого сопротивления к сопротивлению изменившейся формы пузырька, в результате чего скорость его всплывания уменьшается (отрезок 3-4 на рис. 1).

Левее точки 3 (см. рис. 1) режимы всплывания пузырька характеризуются стационарностью условий действия силы поверхностного натяжения:

$$\Delta F_{\text{пн}} > F_{\text{ар}} = F_{\text{гд}}, \text{ Н}, \quad (13)$$

в результате чего обеспечивается постоянная величина увеличения давления воздуха внутри пузырька, происходящего под действием силы поверхностного натяжения $F_{\text{пн}}$:

$$\Delta P_{\text{гд}} < F_{\text{пн}} = \text{const}, \text{ Па} . \quad (14)$$

Снижение скорости всплывания пузырька воздуха при увеличении его диаметра $d_{\text{п}}$ вследствие сжатия поверхности пузырька воздуха, сопровождающегося увеличением значения коэффициента гидравлического сопротивления ζ , прекращается в точке 4 (см. рис. 1), в которой происходит переход турбулентного режима всплывания в область квадратичного закона сопротивления (в область автомодельности режима всплывания).

В работе [3] приводятся данные, свидетельствующие о том, что в точке перехода в область квадратичного закона сопротивления величина коэффициента гидравлического сопротивления и критерия Рейнольдса имеют значения $\zeta = 0,4$; $\text{Re} = 1040$.

В соответствии с графиком, представленным на рис. 1, пузырек воздуха в точке 4 имеет величину скорости всплывания $v_{\text{п}} = 0,21 \text{ м/с}$.

Величина диаметра пузырька воздуха $d_{\text{п}}$ может быть определена по формуле

$$d_{\text{п}} = \frac{\text{Re} \cdot v}{v_{\text{п}}} = \frac{1040 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}}{0,21} = 0,005 \text{ м} . \quad (15)$$

Из условия равенства силы Архимеда, величина которой может быть определена по формуле

$$F_{AP} = W_{\Pi} g (\rho - \rho_v), \text{ Н}, \quad (16)$$

и силы гидродинамического сопротивления $F_{ГД}$, величина которой может быть определена по формуле (3), можно вычислить величину объема пузырька воздуха в точке 4:

$$W_{\Pi} = \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} \zeta \frac{v_{\Pi}^2}{2g} \frac{\rho}{\rho - \rho_v} = \frac{3,14 \cdot 0,005^2}{4} \cdot 0,4 \frac{0,22^2}{2 \cdot 9,8} \cdot \frac{998,2}{998,2 \cdot 1,2} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \quad (17)$$

Пузырек воздуха в точке 4 является сплюснутым сфероидом, который можно представить в виде двух сегментов шара радиусом R , имеющих высоту h и площадь основания $\omega_{\Pi} = \pi r_{\Pi}^2$, где $r_{\Pi} = \frac{d_{\Pi}}{2}$ (рис. 2).

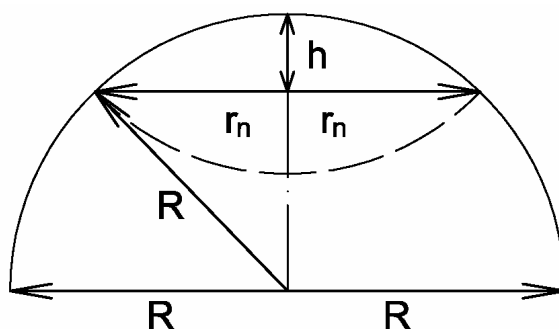


Рис. 2. Схема к определению геометрических характеристик пузырька воздуха в точке 4

Размер высоты сегмента сфероида h может быть найден из равенства, полученного из уравнения Пифагора

$$R - h = \sqrt{R^2 - r_{\Pi}^2}, \text{ м} \quad (18)$$

откуда

$$h = R - \sqrt{R^2 - r_{\Pi}^2}, \text{ м}. \quad (19)$$

Объем двух половинок сфероида W_{Π} можно определить из уравнения

$$W_{\Pi} = 2\pi h^2 \left(R - \frac{1}{3}h \right), \text{ м}^3. \quad (20)$$

При величине радиуса кривизны поверхности сфероида $R = 0,0038 \text{ м}$ и $2r = 0,0025 \text{ м}$ ($d_{\Pi} = 0,005 \text{ м}$) высота его половинки будет иметь значение

$$h = R - \sqrt{R^2 - r_{\Pi}^2} = 0,0038 - \sqrt{0,0038^2 - \left(\frac{0,005}{2} \right)^2} = 0,000938 \text{ м}. \quad (21)$$

Объем сфероида W_{Π} составит

$$W_{\Pi} = 2\pi h^2 \left(R - \frac{1}{3}h \right) = 2 \cdot 3,14 \cdot (0,000938)^2 \left(0,0038 - \frac{1}{3}0,000938 \right) = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \quad (22)$$

Величина коэффициента поверхностного натяжения пузырька воздуха в точке 4 может быть определена из условия равенства силы Лапласа $F_{\text{пн}}$, величина которой вычисляется по формуле

$$F_{\text{пн}} = \pi d_{\text{п}} \sigma_{\text{п}} \frac{d_{\text{п}}}{2R}, \text{ Н}, \quad (23)$$

и силы Архимеда $F_{\text{ар}}$, значение которой может быть определено по формуле (17):

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{W_{\text{п}} g (\rho - \rho_{\text{в}}) 2R}{\pi d_{\text{п}}^2} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot 9,8 (998,2 - 1,2) 2 \cdot 0,0038}{3,14 \cdot 0,005^2} = 0,018 \text{ Н/м}. \quad (24)$$

Величина увеличения давления внутри пузырька, происходящего под действием силы поверхностного натяжения в точке 4, может быть определена по формуле

$$\Delta P_{\text{пн}} = \pi d_{\text{п}} \sigma_{\text{п}} \frac{d_{\text{п}}}{2R} \frac{4}{\pi d_{\text{п}}^2} = \frac{2\sigma}{R} = \frac{2 \cdot 0,018}{0,038} = 9 \text{ Па}. \quad (25)$$

Величина увеличения давления внутри пузырька, происходящего под действием силы гидродинамического сопротивления движению пузырька в точке 4, может быть определена по формуле

$$\Delta P_{\text{гд}} = \zeta \rho \frac{v_{\text{п}}^2}{2} = 0,4 \cdot 998,2 \cdot \frac{0,21^2}{2} = 9 \text{ Па}. \quad (26)$$

Как в начальной точке (точка 3) турбулентного режима всплывания пузырька воздуха, имеющего форму сфероида, так и в конечной точке (точка 4) выполняется условие

$$\Delta P_{\text{пн}} = \Delta P_{\text{гд}} = 9 \text{ Па} = \text{const}. \quad (27)$$

В турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха в области квадратичного закона сопротивления при величине коэффициента гидравлического сопротивления $\zeta = 0,4 = \text{const}$ увеличение действующей на пузырек силы Архимеда приводит к повышению величин давления $\Delta P_{\text{пн}}$ и $\Delta P_{\text{гд}}$:

$$\Delta P_{\text{пн}} = \Delta P_{\text{гд}} > 9 \text{ Па}. \quad (28)$$

Средняя величина гидравлической крупности пузырьков воздуха в водовоздушной смеси U , мм/с, наряду со значением приведенной скорости подачи газа I , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, определяет величину важной характеристики водовоздушной смеси – коэффициента газонаполнения.

Коэффициент газонаполнения ϕ выражается в объемных долях.

$$\phi = \frac{W_{\text{п}}}{W_{\text{см}}} = \frac{W_{\text{п}}}{W_{\text{г}} + W_{\text{ж}}}, \quad (29)$$

где $W_{\text{см}}$ – объем водовоздушной смеси, м^3 ; $W_{\text{г}}$ – объем смеси, занимаемый газом, м^3 ; $W_{\text{ж}}$ – объем смеси, занимаемый жидкостью, м^3 .

Величина приведенной скорости подачи газа в водовоздушную смесь (интенсивность барботирования) определяется как отношение объемного расхода подаваемого газа $Q_{\text{г}}$ к площади поперечного сечения объема водовоздушной смеси $\omega_{\text{см}}$, м^2 :

$$I = \frac{Q_{\text{г}}}{\omega_{\text{см}}}, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}; \text{ м/с}. \quad (30)$$

Продолжительность пребывания пузырьков воздуха (газовой фазы) в объеме водовоздушной смеси может быть определена по формуле

$$\Delta T_{\Gamma} = \frac{1000 H_{\text{см}}}{U_{\text{см}}}, \text{ с}, \quad (31)$$

где $H_{\text{см}}$ – высота объема водовоздушной смеси; $U_{\text{см}}$ – средняя гидравлическая крупность пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, мм/с.

Объем смеси, занимаемый газом в водовоздушной смеси, может быть определен по формулам (32) и (33):

$$W_{\Gamma} = \Delta T_{\Gamma} Q_{\Gamma} = \Delta T_{\Gamma} I \omega_{\text{см}} \frac{1000 H_{\text{см}}}{U_{\Pi}} I \omega_{\text{см}}, \text{ м}^3; \quad (32)$$

$$W_{\Gamma} = \varphi W_{\text{см}} = \varphi H_{\text{см}} \omega_{\text{см}}, \text{ м}^3, \quad (33)$$

откуда

$$\varphi = \frac{1000 H_{\text{см}}}{U_{\text{см}}} I \omega_{\text{см}} \frac{1}{H_{\text{см}} \omega_{\text{см}}} = \frac{1000 I}{U_{\text{см}}}; \quad (34)$$

$$U_{\text{см}} = 1000 \frac{I}{\varphi}, \text{ мм/с}. \quad (35)$$

Величина φ может быть определена по формуле (36) с учетом экспериментально полученных значений $W_{\text{см}}$ и $W_{\text{ж}}$, м^3 :

$$\varphi = \frac{W_{\text{см}} - W_{\text{ж}}}{W_{\text{см}}}. \quad (36)$$

Величина гидравлической крупности свободно всплывающего в воде пузырька воздуха может быть найдена по формуле В.В. Кафарова:

$$U_{\Pi} = U_{\text{см}} (1 + 1,3 \varphi^{1/3}), \text{ мм/с}. \quad (37)$$

Величина среднего диаметра пузырьков воздуха, всплывающих в водовоздушной смеси в турбулентном режиме при $d_{\Pi} = 0,00144 - 0,005 \text{ м}$, может быть определена по формуле

$$d_{\Pi} = \left(\frac{23,9}{U_{\Pi}} \right)^{2,44}, \text{ м}. \quad (38)$$

Величина среднего диаметра пузырьков воздуха, всплывающих в водовоздушной смеси в области развитой турбулентности в режиме автомодельности при $d_{\Pi} > 0,005 \text{ м}$, может быть определена по формуле

$$d_{\Pi} = \left(\frac{U_{\Pi}}{800} \right)^4, \text{ м}. \quad (39)$$

Полученные в результате проведенного теоретического анализа процесса всплывания пузырьков воздуха в переходном турбулентном режиме и в области автомодельности закона сопротивления закономерности позволят адекватно оценивать свойства водовоздушных смесей и более эффективно использовать их в технологиях очистки сточных вод.

Список литературы

1. Алексеев Е.В. Основы технологии очистки сточных вод флотацией / Е.В. Алексеев. – М.: АСВ, 2009. – 136 с.
2. Андреев, С.Ю. Теоретический анализ свойств динамической двухфазной дисперсионной смеси «вода – воздух» / С.Ю. Андреев, М.И. Яхкинд, Н.Н. Ласьков, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №4. – С. 128–136.
3. Симаков, Н.Н. Расчет обтекания и сопротивления шара в ламинарном сильно турбулентном потоках / Н.Н. Симаков // Журнал технической физики. – 2013. – Т.83, №4. – С. 16–20.

References

1. Alekseev, E.V. Fundamentals of wastewater treatment technology by flotation / E.V. Alekseev. – M.: DIA, 2009 – 136 p.
2. Andreev, S.Yu. Theoretical analysis of the properties of a dynamic two-phase dispersion mixture «water – air» / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, N.N. Laskov, V.A. Knyazev // Regional architecture and construction. – 2021. – No. 4. – P. 128–136.
3. Simakov, N.N. Calculation of the flow and resistance of the ball in laminar highly turbulent flows / N.N. Simakov // Journal of Technological Physics. – 2013. – Vol.83, No. 4 – P. 16–20.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2022_2_142

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

Шейн Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Механика»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40,
тел.: (8412) 66-64-19

Курносков Николай Ефимович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: kurnosov-ne@mail.ru

Алексеев Дмитрий Петрович,
ведущий инженер кафедры «Транспортные
машины»
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

Penza State University of Architecture
and Construction

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

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Shein Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Mechanics»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 66-64-19

Kurnosov Nikolay Efimovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Transport Vehicles»
E-mail: kurnosov-ne@mail.ru

Alekseev Dmitriy Petrovich,
Lead engineer of the department «Transport
Vehicles»
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ ВИХРЕВОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АЭРАТОРА

С.Ю. Андреев, А.И. Шейн, Н.Е. Курносков, Д.П. Алексеев

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса работы вихревого гидравлического аэратора. Показано, что наибольшая энергетическая эффективность аэратора $E_a = 1,51 \text{ kgO}_2/\text{kWh}$ достигается при величине давления на входе в аэратор $P_a = 0,2 \text{ МПа}$, величины коэффициента эжекции воздуха и коэффициента использования кислорода воздуха при этом имеют значения $K_E = 0,77$, $K_u = 0,10$. Установлено, что вихревой гидравлический аэратор является эффективным устройством, позволяющим получать мелкодисперсную водовоздушную смесь, содержащую пузырьки воздуха диаметром $d_{\text{п}} = 0,057 - 0,123 \text{ мм}$ и имеющую величину коэффициента газонасыщения $\phi = 0,011 - 0,068$. Новая конструкция вихревого гидравлического аэратора может быть использована в технологических процессах биологической и флотационной очистки сточных вод.

Ключевые слова: вихревой аэратор; эжекция воздуха; окислительная способность; коэффициент массопередачи; энергетическая эффективность; коэффициент газонаполнения

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESS OF OPERATION OF A HYDRAULIC AERATOR VORTEX

S.Yu. Andreev, A.I. Shein, N.E. Kurnosov, D.P. Alekseev

The results of experimental studies of the operation of a vortex hydraulic aerator are presented. It is shown that the highest energy efficiency of the aerator $E_a = 1.51 \text{ kgO}_2 / \text{kWh}$ is achieved when the pressure at the entrance to the aerator $P_a = 0.2 \text{ MPa}$, the values of the air ejection coefficient and the air oxygen utilization coefficient have the values of $K_E = 0.77$, $K_u = 0.10$. It is established that the vortex hydraulic aerator is an effective device that allows to obtain a finely dispersed water-air

mixture containing air bubbles with a diameter $d_p = 0.057 - 0.123$ mm and having a gas saturation coefficient value $\varphi = 0.011 - 0.068$. The new design of the vortex hydraulic aerator can be used in technological processes of biological and flotation wastewater treatment.

Keywords: vortex aerator; air ejection; oxidizing ability; mass transfer coefficient; energy efficiency; gas filling coefficient

В настоящее время в практике очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод широкое распространение получила технология аэробного биохимического окисления содержащихся в них органических загрязнений микроорганизмами активного ила аэротенков. Аэротенки представляют собой емкостные сооружения, оборудованные системой аэрации, предназначенной для обеспечения микроорганизмов активным кислородом воздуха и перемешивания обрабатываемых сточных вод с активным илом [1, 2].

В технологических процессах биохимической очистки небольших расходов сточных вод хорошо себя зарекомендовали гидравлические аэрационные системы [3].

Принцип действия гидравлического аэратора основан на вовлечении в аэрационный объем атмосферного воздуха рециркуляционным потоком очищаемых сточных вод, перекачиваемых насосом.

Сотрудниками Пензенского государственного университета была разработана новая конструкция вихревого гидродинамического аэратора [4], схема которого представлена на рис. 1.

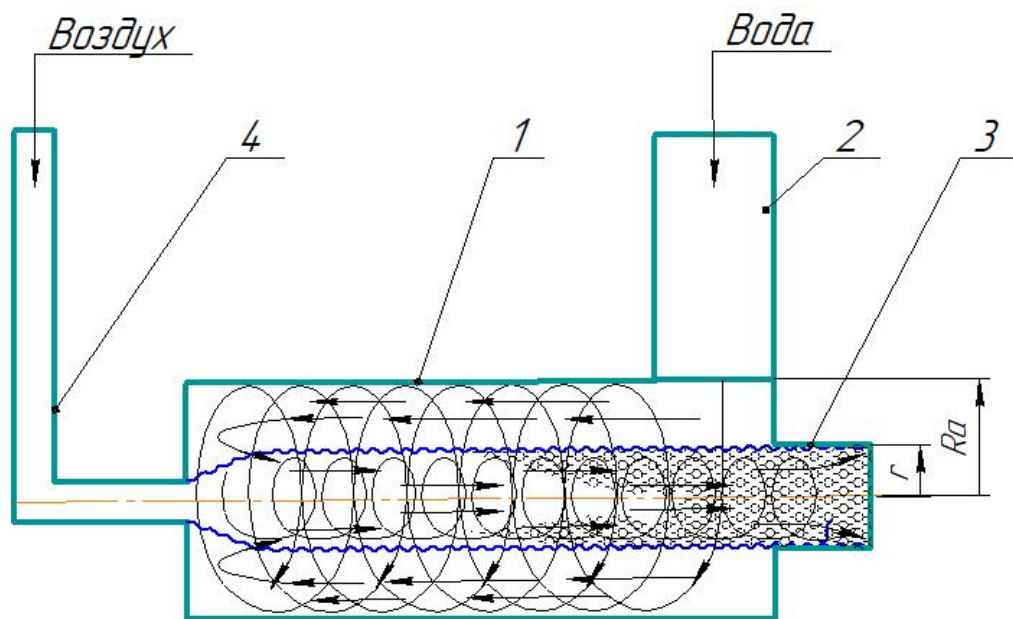


Рис. 1. Схема вихревого гидравлического аэратора:

1 – корпус аэратора; 2 – тангенциальный патрубок для подачи воды;

3 – патрубок для вывода водовоздушной смеси; 4 – патрубок для эжектирования воздуха

К цилиндрической камере корпуса вихревого аэратора 1 тангенциально присоединен патрубок 2 для подачи воды. При поступлении в корпус аэратора 1 по тангенциально присоединённому к нему патрубку 2 элементарного объема жидкости $\Delta W_{\text{ж}}$, м^3 , массой $\Delta m_{\text{ж}} = \Delta W_{\text{ж}} \cdot \rho$, кг (где ρ – плотность жидкости, кг/м^3), поток жидкости приобретает вращательно-поступательное движение и перемещается в пристеночной области от одного торца к другому торцу корпуса аэратора, где он меняет направление своего движения и двигается в приосевой области по направлению к патрубку 3. Поскольку величины моментов количества движения элементарного объема жидкости в пристеночной области M_C и вихревой области M_0 равны друг другу, то можно записать:

$$M_C = M_0, \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}; \quad (1)$$

$$\Delta W_{\text{ж}} \cdot \rho \cdot \vartheta_{\text{жR}} \cdot R_a = \Delta W_{\text{ж}} \cdot \rho \cdot \vartheta_{\text{жr}} \cdot r_0, \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}; \quad (2)$$

$$\vartheta_{\text{жR}} \cdot R_a = \vartheta_{\text{жr}} \cdot r_0 = \frac{I}{2\pi} = \text{const}, \text{ м}^2/\text{с}; \quad (3)$$

$$\vartheta_{\text{жr}} = \vartheta_{\text{жR}} \frac{R_a}{r_0}, \text{ м/с}, \quad (4)$$

где $\vartheta_{\text{жR}}$ – величина окружной (тангенциальной) скорости потока жидкости на входе в корпус аэратора, м/с; $\vartheta_{\text{жr}}$ – величина окружной (тангенциальной) скорости потока жидкости на расстоянии r_0 от оси симметрии корпуса аэратора, м/с; I – циркуляция скорости вихревой трубки, $\text{м}^2/\text{с}$.

Таким образом, тангенциальный ввод жидкости в корпус аэратора позволяет получить «тангенциальную» закрутку потока в приосевой области аэратора с постоянной величиной циркуляции скорости I , что обеспечивает создание разрежения и эжектирования воздуха из атмосферы по патрубку 3. Экспериментальные исследования вихревого гидравлического аэратора проводились на лабораторном испытательном стенде, схема которого представлена на рис. 2. Общий вид работающего вихревого гидравлического аэратора представлен на рис. 3.

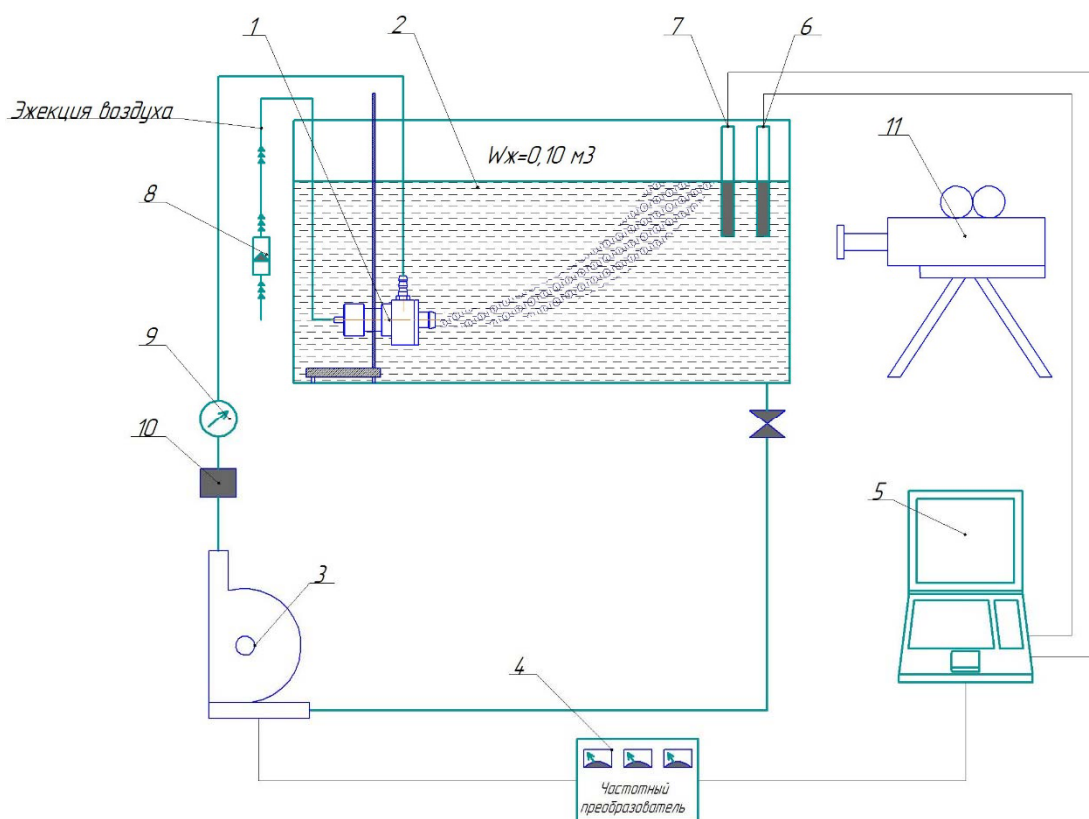


Рис. 2. Схема лабораторного испытательного стенда:

- 1 – вихревой гидравлический аэратор; 2 – аэрационный бассейн; 3 – центробежный насос;
4 – частотный преобразователь; 5 – ЭВМ; 6 – датчик температуры; 7 – датчик растворенного
кислорода; 8 – ротаметр; 9 – манометр; 10 – расходомер жидкости

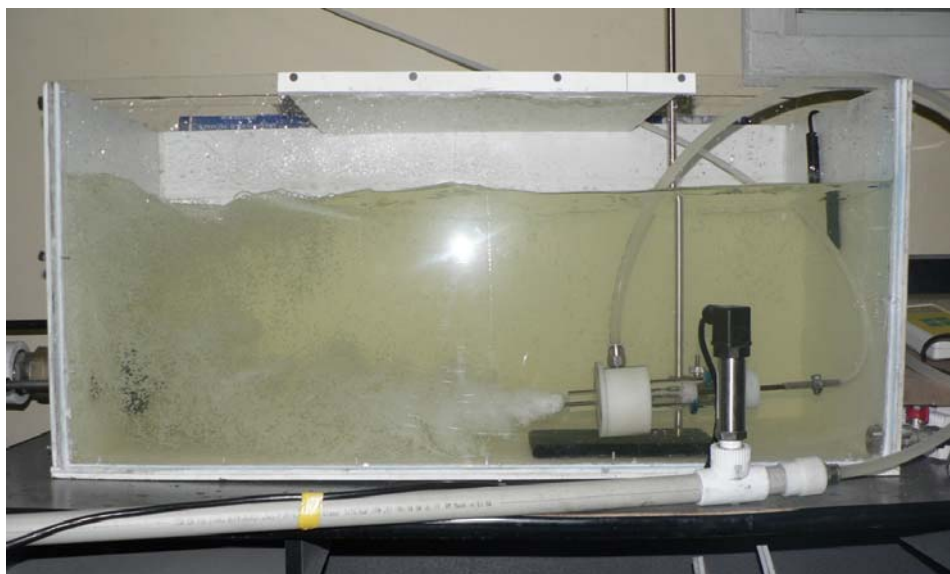


Рис. 3. Общий вид работающего вихревого гидравлического аэратора

Лабораторный стенд включает в себя следующее оборудование: емкость с прозрачными стенками объемом $V=0,1 \text{ м}^3$ (аэрационный бассейн) 1, на дне которой закреплен вихревой гидравлический аэратор 2, центробежный насос 3, перекачивающий рециркуляционный поток аэрируемой воды из аэрационного бассейна во входной патрубок аэратора, датчик температуры 6 (ДТС035-50МВ3.80) и датчик концентрации кислорода 7 (OxyScan Light), показания с которых отображались на дисплее и сохранялись в памяти ЭВМ 5. Рабочие характеристики центробежного насоса 3 (расход-напор) изменялись с помощью частотного преобразователя 4. Расход воздуха, эжектируемого вихревым гидравлическим аэратором, контролировался ротаметром 8 (Bronkhorst EL-FLOW Select M423-19-00V). Уровень давления и расход рециркуляционного потока, подаваемого центробежным насосом в вихревой гидравлический аэратор, контролировался датчиком давления 9 (ПД100-ДИ10-10.И.110) и расходомером жидкости 10 (СГВ 15). Режим работы вихревого гидравлического аэратора фиксировали видеокамерой 11.

В первой серии экспериментов проводились исследования зависимости концентрации кислорода в аэрационном бассейне от продолжительности процесса аэрации T при расходе перекачиваемой воды $Q_{\text{ж}}=0,00054 \text{ м}^3/\text{с}$ и давлении на входе в аэратор $P_{\text{а}}=0,8 \text{ МПа}$. Полученные результаты представлены в виде графика, изображенного на рис. 4.

Величина объемного коэффициента массопередачи вихревого гидравлического аэратора $K_{\text{в}}, \text{ с}^{-1}$, определялась по методике переменного дефицита кислорода по уравнению

$$K_{\text{в}} = \frac{1}{T} \ln \frac{C_{\text{н}} - C_0}{C_{\text{н}} - C_T}, \text{ с}^{-1}, \quad (5)$$

где T – продолжение процесса аэрации, с; $C_{\text{н}}, C_0$ и C_T – соответственно: концентрация насыщения воды кислородом воздуха, концентрация кислорода в аэрационном бассейне в начальный момент аэрации и через T секунд процесса аэрации, мг/л. При температуре воды $t = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ величина концентрации насыщения имеет значение $C_{\text{н}}=9,21 \text{ мг/л (г/м}^3\text{)}$.

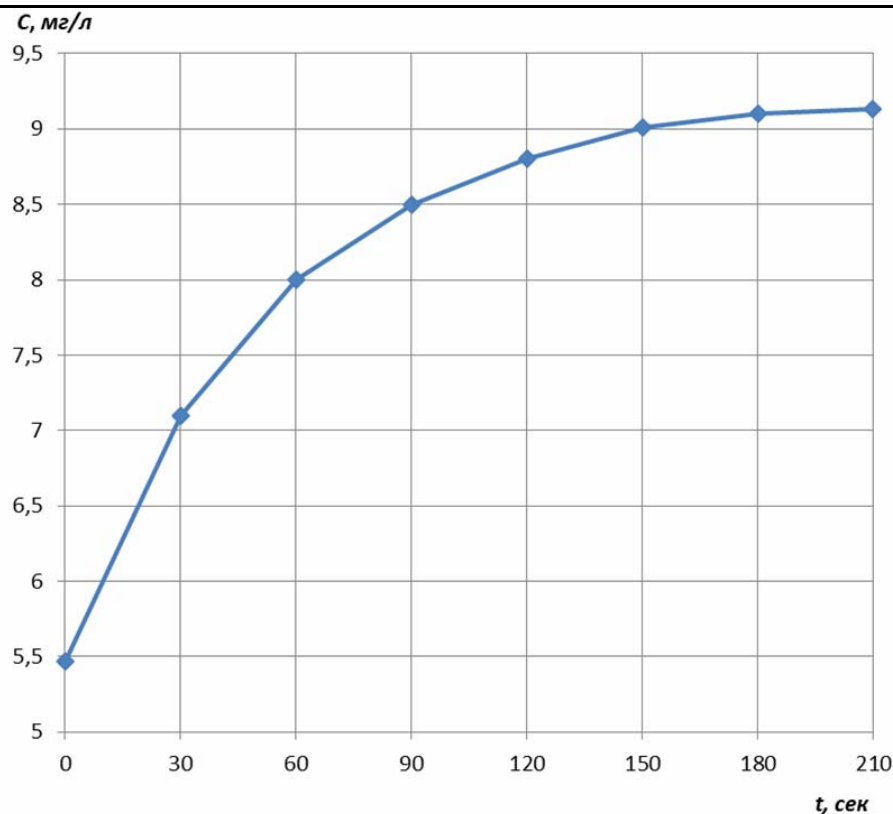


Рис. 4. Зависимость величины концентрации растворенного в воде аэрационного бассейна кислорода C_t , мг/л, от продолжительности процесса аэрации T , сек

Проведенные экспериментальные исследования показали, что величина объемного коэффициента вихревого гидравлического аэратора имеет значение $K_W=0,018 \text{ с}^{-1}=65 \text{ ч}^{-1}$.

Основными технологическими характеристиками вихревого гидравлического аэратора наряду с объемным коэффициентом массопередачи K_W , с^{-1} , являются: окислительная способность устройства ОС, кг/ч (кг/ч); коэффициент эжекции $K_Э$; коэффициент использования кислорода воздуха K_U ; энергоэффективность устройства $\mathcal{E}_a$, $\text{кгO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}$.

Окислительную способность аэратора принято определять на водопроводной обескислороженной воде, используя формулу

$$\text{ОС} = K_W \cdot C_H \cdot W_a = 0,018 \cdot 9,21 \cdot 0,1 = 0,06 \text{ кг/ч.} \quad (6)$$

Величина коэффициента эжекции гидравлических аэраторов определяется как отношение объемного расхода подсосываемого (эжектируемого) воздуха Q_B , $\text{м}^3/\text{ч}$, к объемному расходу перекачиваемой насосом жидкости $Q_{\text{ж}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$:

$$K_Э = \frac{Q_B}{Q_{\text{ж}}} = \frac{0,00055}{0,00054} = 1,02. \quad (7)$$

Величина использования кислорода воздуха определяется как отношение окислительной способности аэратора ОС, кг/ч, к массе кислорода, содержащегося в прошедшем через аэратор атмосферном воздухе $Q_{\text{ТВ}}$, кг/ч.

$$K_U = \frac{\text{ОС}}{Q_{\text{ТВ}}} = \frac{\text{ОС}}{3600 \cdot Q_B \cdot C_{\text{KB}}} = \frac{0,06}{3600 \cdot 0,00055 \cdot 0,3} = 0,10, \quad (8)$$

где $C_{\text{KB}}=0,3 \text{ кг/м}^3$ – концентрация кислорода в атмосферном воздухе.

Окислительная способность вихревого гидравлического аэратора может быть также определена по формуле

$$\text{ОС} = 3600 \cdot K_W \cdot C_{\text{KB}} \cdot Q_B = 3600 \cdot 0,018 \cdot 0,3 \cdot 0,00055 = 0,06 \text{ кг/ч.} \quad (9)$$

Величина энергетической эффективности вихревого гидравлического аэратора рассчитывается как отношение окислительной способности устройства ОС к потребляемой аэратором мощности N :

$$\Xi_a = \frac{\text{ОС}}{N} = 3600 \cdot \frac{\text{ОС}}{Q_{\text{ж}} \cdot P_a} = 3600 \cdot \frac{0,59}{0,00054 \cdot 0,8 \cdot 10^6} = 0,49 \text{ кгО}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}. \quad (10)$$

В табл. 1 приведены значения расходов рециркуляционных потоков воды, перекачиваемой центробежным насосом $Q_{\text{ж}}$, м³/с, и воздуха, подсасываемого вихревым гидродинамическим аэратором $Q_{\text{в}}$, м³/с, при давлении P_a , МПа, а также величин коэффициентов эжекции вихревого гидравлического аэратора $K_{\text{э}}$, рассчитанных по формуле (7), величин окислительной способности вихревого гидравлического аэратора ОС, кг/ч, рассчитанных по формуле (9), и величин энергетической эффективности вихревого гидравлического аэратора Ξ_a , кгО₂/кВт·ч, рассчитанных по формуле (10).

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики вихревого гидродинамического аэратора

Барометрическое давление на входе в аэратор P_a , МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Расход воды, перекачиваемой через аэратор $Q_{\text{ж}}$, м ³ /с	0,00031	0,00035	0,0004	0,00044	0,00048	0,00052	0,00054
Расход воздуха, эжектируемого аэратором $Q_{\text{в}}$, м ³ /с	0,00024	0,00029	0,00035	0,00041	0,00046	0,0005	0,00055
Коэффициент эжекции, $K_{\text{э}}$	0,77	0,83	0,88	0,93	0,96	0,996	1,02
Окислительная способность аэратора ОС, кг/ч	0,026	0,031	0,038	0,044	0,050	0,054	0,060
Энергетическая эффективность аэратора Ξ_a , кгО ₂ /кВт·ч	1,51	1,06	0,86	0,72	0,63	0,53	0,49

Во второй серии экспериментов проводились исследования зависимостей изменения характеристик водовоздушной смеси, образующейся в вихревом гидравлическом аэраторе при величине коэффициента эжекции $K_{\text{э}}=0,05$, от величины давления на входе в аэратор P_a .

Общий вид водовоздушной смеси, образованной в вихревом гидродинамическом аэраторе при величине давления на входе $P_a=0,8$ МПа, представлен на рис. 5.

Водовоздушная смесь с выхода вихревого гидродинамического аэратора отбиралась в лабораторный мерный цилиндр, и проводилось определение величины коэффициента газонаполнения φ по формуле

$$\varphi = \frac{W_{\text{см}} - W_{\text{ж}}}{W_{\text{см}}}, \quad (11)$$

где $W_{\text{см}}$ – объем водовоздушной смеси, м³; $W_{\text{ж}}$ – объем занимаемой жидкостью после выделения из нее пузырьков воздуха, м³.

Значение величины коэффициента кинетической вязкости водовоздушной смеси вычисляется по формуле

$$\gamma_{\text{см}} = \gamma_{\text{ж}} \frac{1 + \frac{9}{2}\varphi}{1 - \varphi}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (12)$$

где $\gamma_{\text{ж}}$ – величина коэффициента кинематической вязкости воды, $\gamma_{\text{ж}}=1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с.



Рис. 5. Общий вид водовоздушной смеси, образованной в вихревом гидродинамическом аэраторе при величине давления на входе $P_a=0,8$ МПа

Измерялась скорость движения раздела фаз «водовоздушная смесь – жидкость» в мерном цилиндре v_{Π} , м/с, и по формуле Стокса вычислялась величина эквивалентного диаметра пузырька воздуха в водовоздушной смеси:

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta_{\Pi} \cdot \gamma_{CM}}{g} \cdot \frac{\rho}{\rho - \rho_b}}, \quad (13)$$

где $\rho=998,2$ кг/м³ и $\rho_b=1,2$ кг/м³ – соответственно плотность воды и плотность воздуха.

В табл. 2 приведены технологические характеристики водовоздушной смеси, образующейся на выходе из вихревого аэратора.

Т а б л и ц а 2

Технологические характеристики водовоздушной смеси, образующейся на выходе из вихревого гидродинамического аэратора

Барометрическое давление на входе в аэратор P_a , МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	2	3	4	5	6	7	8
Расход воды, перекачиваемой через аэратор $Q_{\text{ж}}$, м ³ /с	0,00031	0,00035	0,0004	0,00044	0,00048	0,00052	0,00054
Коэффициент газонаполнения водовоздушной смеси, ф	0,011	0,017	0,024	0,032	0,041	0,052	0,068
Коэффициент кинематической вязкости водовоздушной смеси $\gamma_{CM} \cdot 10^{-6}$, м ² /с	1,07	1,11	1,14	1,19	1,24	1,30	1,40
Скорость движения фаз «водовоздушная смесь – жидкость» v_{Γ} , м/с	0,008	0,005	0,004	0,003	0,002	0,0018	0,0016

1	2	3	4	5	6	7	8
Эмпирическое значение эквивалентного диаметра пузырька воздуха $d_{\Pi} \cdot 10^{-6}$, м	0,126	0,101	0092	0,083	0,058	0,065	0,064
Удельная диссипация энергии в азраторе, ϵ , м ² /с ³	10018	16965	25853	35548	45566	58816	69803
Теоретическое значение эквивалентного диаметра пузырька воздуха $d_{\Pi} \cdot 10^{-3}$, м	0,123	0,100	0,084	0,074	0,067	0,061	0,057
Относительная погрешность вычисления величин диаметров пузырьков воздуха Δd	2,4	1,0	8,7	16,8	1,5	6,2	10,9

Диспергирование пузырьков воздуха водовоздушной смеси в вихревом гидродинамическом азраторе происходит под воздействием турбулентных пульсаций скорости потока, масштаб которой λ сопоставим с размерами пузырьков d_{Π} . Турбулентные пульсации скорости водовоздушного потока, имеющие масштаб λ , м, перемещают пузырек воздуха в жидкой фазе со скоростью v_{Π} , м/с, и он испытывает действие силы гидродинамического давления $F_{ГД}$.

$$F_{ГД} = \frac{\pi \cdot d_{\Pi}^2}{4} \cdot \zeta \cdot \frac{\vartheta_{\Gamma}^2}{2}, \text{ Н}, \quad (14)$$

где ζ – коэффициент гидродинамического сопротивления.

Действие силы гидродинамического давления компенсируется действием силы поверхностного натяжения.

$$F_{\Pi\text{Н}} = \pi \cdot d_{\Pi} \cdot \sigma_{\Pi}, \text{ Н}, \quad (15)$$

где $\sigma_{\Pi}=0,072$ Н/м – коэффициент поверхностного натяжения границы раздела фаз «вода – воздух».

При некотором критическом значении скорости v_{Π} действие силы гидродинамического давления $F_{ГД}$ не может быть скомпенсировано силой поверхностного натяжения $F_{\Pi\text{Н}}$, в результате чего происходит его дробление.

Величина элементарной работы, совершаемой против действия силы поверхностного натяжения, может быть определена как

$$\Delta A_{\Pi\text{Н}} = F_{\Pi\text{Н}} \cdot \Delta l, \text{ Дж}, \quad (16)$$

где Δl – элементарное перемещение пузырька воздуха относительно жидкости, м.

При продолжительности перемещения пузырька воздуха Δt , с, со скоростью v_{Π} , м/с, величина Δl может быть определена как

$$\Delta l = v_{\Pi} \cdot \Delta t, \text{ м}, \quad (17)$$

тогда

$$\Delta A_{\Pi\text{Н}} = F_{\Pi\text{Н}} \cdot v_{\Pi} \cdot \Delta t, \text{ Дж}. \quad (18)$$

Элементарная мощность при перемещении пузырька воздуха на расстояние Δl может быть определена как

$$\Delta N_{\Pi\text{Н}} = \frac{\Delta A_{\Pi\text{Н}}}{\Delta t} = \frac{F_{\Pi\text{Н}} \cdot v_{\Pi} \cdot \Delta t}{\Delta t} = \frac{\pi d_{\Pi} \sigma_{\Pi} v_{\Pi} \Delta t}{\Delta t} = \pi d_{\Pi} \sigma_{\Pi} v_{\Pi}, \text{ Вт; Дж/с}. \quad (19)$$

Величина удельной секундной диссипации энергии при этом составит

$$\epsilon_{\Gamma} = \frac{\Delta N_{\Pi\text{Н}}}{\Delta m}, \text{ Вт/кг}. \quad (20)$$

Масса элементарного объема жидкости, перемешиваемой пузырьком воздуха диаметром d_{Π} , при этом будет иметь величину

$$\Delta m = \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} \Delta \rho = \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} \vartheta_{\Pi} \Delta t_p, \text{ кг}, \quad (21)$$

тогда

$$\varepsilon_T = \pi d_{\Pi}^2 \sigma_{\Pi} \vartheta_{\Pi} \cdot \frac{4}{\pi d_{\Pi}^2 \rho \vartheta_{\Pi} \Delta t} = \frac{4 \sigma_{\Pi}}{d_{\Pi} \rho \Delta t}, \text{ Вт/кг}. \quad (22)$$

Величина энергии силы поверхностного натяжения пузырька воздуха может быть определена как

$$\Delta E_{\Pi\Pi} = \pi d_{\Pi}^2 \sigma_{\Pi}, \text{ Дж}, \quad (23)$$

тогда

$$\Delta t = \frac{E_{\Pi}}{\Delta N_{\Pi\Pi}} = \pi d_{\Pi}^2 \sigma_{\Pi} \frac{1}{\pi d_{\Pi} \sigma_{\Pi} \vartheta_{\Pi}} = \frac{d_{\Pi}}{\vartheta_{\Pi}}, \text{ с}. \quad (24)$$

Подставляя формулу (24) в формулу (22), получим:

$$\varepsilon_T = 4 \frac{\sigma_{\Pi}}{d_{\Pi} \rho} \cdot \frac{\vartheta_{\Pi}}{d_{\Pi}} = 4 \frac{\sigma_{\Pi}}{d_{\Pi}^2 \rho} \cdot \vartheta_{\Pi} \text{ Вт/кг}, \quad (25)$$

откуда

$$\varepsilon_T^2 = 16 \frac{\sigma_{\Pi}^2}{d_{\Pi}^4 \rho^2} \cdot \vartheta_{\Pi}^2, \text{ Вт}^2/\text{кг}^2. \quad (26)$$

Из условия $F_{ГД} = F_{\Pi\Pi}$

$$\frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} \rho \xi \frac{\vartheta_{\Pi}^2}{2} = \pi d_{\Pi} \sigma_{\Pi}, \quad (27)$$

откуда

$$\vartheta_{\Pi}^2 = \frac{8}{d_{\Pi}} \frac{\sigma_{\Pi}}{\rho \xi}, \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (28)$$

Подставляя формулу (28) в формулу (26), имеем:

$$\varepsilon_T^2 = \frac{128}{\xi} \cdot \frac{\sigma_{\Pi}^3}{d_{\Pi}^5 \rho^3}, \text{ Вт}^2/\text{кг}^2, \quad (29)$$

откуда

$$d_{\Pi} = K_{ГД} \left(\frac{\sigma_{\Pi}^3}{\varepsilon_T^2 \rho^3} \right)^{1/5}, \text{ м}, \quad (30)$$

где $K_{ГД} = \left(\frac{128}{\xi} \right)^{1/5}$ – коэффициент, зависящий от гидродинамических условий, при которых осуществляется процесс диспергирования водовоздушной смеси.

В соответствии с рекомендациями [5] $K_{ГД} = 3/2$.

Таким образом, теоретическое значение эквивалентного пузырька воздуха может быть определено по формуле

$$d_{\Pi} = 1,5 \left(\frac{\sigma_{\Pi}^3}{\varepsilon^2 \rho^3} \right)^{1/5} = 1,5 \left(\frac{\sigma_{\Pi}}{\rho} \right)^{0,6} \frac{1}{\varepsilon^{0,4}}, \text{ м.} \quad (31)$$

Величина удельной диссипации энергии в вихревом гидродинамическом аэраторе рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{N_a}{M_{\text{ж}}} = \frac{Q_{\text{ж}} P_a}{W_{\text{ар}} \rho_{\text{ж}}}, \text{ Дж/кг}\cdot\text{с; м}^2/\text{с}^3, \quad (32)$$

где N_a – гидродинамическая мощность потока жидкости, проходящего через аэратор, Вт; P_a – давление на входе в аэратор, Па; $M_{\text{ж}}$ – масса жидкости в объеме аэратора, кг; $W_{\text{ар}} = 0,0000062 \text{ м}^3$ – объем аэратора.

Величины удельной диссипации энергии ε , $\text{м}^2/\text{с}^3$, и теоретических значений диаметров пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, образующихся на выходе из вихревого гидродинамического аэратора, приведены в табл. 2.

Полученные в ходе проведения экспериментальных исследований вихревого гидравлического аэратора данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольшая энергетическая эффективность гидравлического аэратора $\varepsilon_k = 1,51 \text{ кгО}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ достигается при величине давления на входе в аэратор $P_a = 0,2 \text{ МПа}$.

2. При величине давления потока жидкости на входе в вихревой гидравлический аэратор $P_a = 0,2 \text{ МПа}$ величины коэффициента эжекции воздуха и коэффициента использования кислорода воздуха имеют значения $K_3 = 0,77$ и $K_u = 0,10$.

3. Вихревой гидравлический аэратор является эффективным устройством, позволяющим получить мелкодисперсную водовоздушную смесь.

4. При повышении давления на входе в вихревой гидравлический аэратор с $P_a = 0,2 \text{ МПа}$ до $P_a = 0,8 \text{ МПа}$ величина эквивалентного диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, образующихся на выходе с аэратора, уменьшается с $d_{\Pi} = 0,123 \text{ мм}$ до $d_{\Pi} = 0,057 \text{ мм}$.

5. Величина коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси, образующейся на выходе с вихревого гидродинамического аэратора, при повышении давления подаваемого потока жидкости с $P_a = 0,2 \text{ МПа}$ до $P_a = 0,8 \text{ МПа}$ увеличивается с $\varphi = 0,011$ до $\varphi = 0,068$.

Список литературы

1. Степанов, С.В. Биологическая очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов / С.В. Степанов, А.К. Стрелков, В.Н. Швецов. – М.: АСВ, 2017. – 204 с.
2. Хенцв, М. Очистка сточных вод: пер. с англ. / М. Хенцв, П. Армоэс. – М.: Мир, 2009. – 452 с.
3. Стенаков, С.В. Технологический расчет аэротенков и мембранных биореакторов / С.В. Стенаков. – М.: АСВ, 2020. – 224 с.
4. Пат. № 2576056. Рос. Федерация, МПК В01F 3/04 Массообменный аппарат / Курносое Н.Е., Лебединский К.В., Николотов А.А., Алексеев Д.П., Иноземцев Д.С., Агафонов С.С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ВКМ Пенза». № 2014122392/05, заяв. 02.06.2014; опубли. 27.02.2016, Бюл. № 6. – 6 с.
5. Смирнов, А.М. Локальная очистка сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий методом напорной флотации: дис. ... канд. тех. наук: 05.21.03 / А.М. Смирнов. – СПб, 2004. – 154 с.

1. Stepanov, S.V. Biological wastewater treatment of oil refineries. / S.V. Stepanov, A.K. Strelkov, V.N. Shvetsov. – M.:ACB, 2017. – 204 p.
2. Khentsv, M. Wastewater treatment: Translated from English. / M. Khentsv, P. Armoes. – M.: Mir, 2009 – 452 p.
3. Stenakov, S.V. Technological calculation of aerotanks and membrane bioreactors / S.V. Stenakov. – M.: ACB, 2020. – 224 p.
4. Pat. No. 2576056. Ros. Federation, IPC B01F 3/04 Mass transfer apparatus / Kurnosov N.E., Lebedinsky K.V., Nikolotov A.A., Alekseev D.P., Inozemtsev D.S., Agafonov S.S.; applicant and patent holder Limited Liability Company «VKM Penza». No. 2014122392/05, application. 02.06.2014; Publ. 27.02.2016, Bul. No. 6. – 6 p.
5. Smirnov, A.M. Local wastewater treatment of pulp and paper enterprises by pressure flotation: Dis. ... Candidate of Sciences: 05.21.03 / A.M. Smirnov. – St. Petersburg, 2004. – 154 p.

УДК 621.67:628.25

DOI 10.54734/20722958_2022_2_153

Калининградский государственный
технический университет

Россия, 236022, г. Калининград,
Советский пр., 1

Наумов Владимир Аркадьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Техносферная безопасность
и природообустройство»
E-mail: vladimir.naumov@klgtu.ru

Kaliningrad State Technical University

Russia, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy Ave, 1

Naumov Vladimir Arkad'evich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Technosphere Safety and
Environmental Engineering»
E-mail: vladimir.naumov@klgtu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ТРУБОПРОВОДА ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЗАТРАТ НА ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС

В.А. Наумов

Разработан метод определения оптимального диаметра трубопровода при проектировании локальной системы водоснабжения. Учтено изменение капитальных затрат на центробежный насос при варьировании диаметра. В качестве примера выполнен расчет по данным прайс-листов начала 2022 года. Показано, что с повышением тарифов на электроэнергию значение оптимального диаметра будет возрастать. При снижении периода окупаемости оптимальный диаметр уменьшается.

Ключевые слова: локальная система водоснабжения, оптимальный диаметр трубопровода, центробежный секционный насос

DETERMINATION OF PIPELINE OPTIMAL DIAMETER OF LOCAL WATER SUPPLY SYSTEM, TAKING INTO ACCOUNT LOAD CHARACTERISTICS AND COSTS OF A CENTRIFUGAL PUMP

V.A. Naumov

The method for determining the optimal diameter of the pipeline when designing a local water supply system has been developed. The change in the capital costs of the centrifugal pump when varying the diameter was taken into account. The example of the calculation according to the price lists of the beginning of 2022 was performed. The value of the optimal diameter will increase with an increase in electricity tariffs. The optimal diameter decreases as the payback period decreases

Keywords: local water supply system, optimal pipeline diameter, centrifugal sectional pump

Введение. Проблемы повышения качества и эффективности систем водоснабжения не теряют своей актуальности для регионов России (см., например, [1, 2] и библиогр. в них). Одной из таких проблем является определение оптимальных параметров при проектировании систем водоснабжения. Расчет наиболее экономичного внутреннего диаметра трубопровода d – довольно известная задача, ее решение можно встретить во многих учебниках и учебных пособиях (см., например, [3, 4]). Тем не менее решение проблем оптимизации систем водоснабжения продолжается.

Интенсивно развивается направление исследований, связанных с поиском не только оптимального диаметра трубопровода, но структуры системы водоснабжения, скоростей (потоков) воды и других параметров, которые обеспечивают минимальную общую дисконтированную стоимость в ожидаемый срок эксплуатации. Так, в [5] учтен целый ряд параметров трубопровода, влияющих на выбор оптимального процесса. Инвестиции в насосную станцию были выражены как функция гидравли-

ческого сопротивления. В связи с этим получилась довольно сложная модель. Для решения поставленной задачи автору пришлось использовать динамическое программирование, которое позволило получить несколько квазиоптимальных сценариев.

В последние десятилетия за счет проводимой в стране энергосберегающей политики в городах и населенных пунктах, на промышленных предприятиях отмечается заметное снижение удельного водопотребления. Однако при этом из-за уменьшения скорости движения воды ухудшаются ее качественные показатели, появляются застойные зоны. За счет уменьшения расходов воды часть насосных станций стала работать с низким КПД. В [6] представлена разработанная методика оптимизации эксплуатационных затрат по системам водоснабжения в условиях уменьшения водопотребления. Эта методика позволяет выявить неэффективные участки сети и вывести их из эксплуатации, улучшить скоростной режим функционирования других участков сети, перевести работу насосных станций в режим с наибольшим КПД.

Другое направление исследований можно назвать классическим, оно развивается на основе известного решения Дженеро [7] для простого трубопровода (без ветвления). Увеличение внутреннего диаметра трубопровода d , с одной стороны, приводит к росту затрат на его создание из-за повышения материалоемкости. С другой стороны, чем больше значение d , тем меньше гидравлические потери давления в трубопроводе, значит, ниже затраты на работу электродвигателя насоса. В современных исследованиях рассматриваются частные случаи либо принимаются во внимание ранее не учитываемые факторы. Так, в статье [8] рассмотрена модель экономической оптимизации диаметра трубы при развитом турбулентном течении. Расчет гидравлических потерь только в квадратичной области сопротивления позволил упростить уравнение Дженеро.

Исследование [9] посвящено сравнению результатов расчетов при различной вязкости: 14,25 сСт, 66,67 сСт и 277,8 сСт. Объемный расход Q , соответственно, 1,667; 0,167; 0,111 м³/с. В первом и во втором случаях реализуется турбулентный режим течения, область сопротивления, соответственно, квадратичная и переходная. В третьем случае – ламинарный режим течения. Используются такие стоимостные характеристики: амортизационные отчисления за 1 м длины трубопровода и 1 м диаметра в год приняты в размере 18 руб., тариф на электроэнергию – 3 руб. за кВт·ч. Утверждается, что необходимая мощность насоса зависит обратно пропорционально от диаметра трубопровода: d^4 – для ламинарного режима, $d^{4,75}$ – для переходного, d^5 – для турбулентного течения. Заметим, что ни в [9], ни во всех перечисленных исследованиях не учитывается необходимость замены насоса при вариации диаметра трубопровода и изменении требуемой мощности.

Цель исследования – разработать метод определения оптимального диаметра трубопровода локальной системы водоснабжения с учетом нагрузочных характеристик и затрат на центробежный насос.

Материалы и методы. Затраты на изготовление и эксплуатацию технологического трубопровода можно представить следующим образом [5–9]:

$$C = C_K + C_E = (C_{B0} + \psi(d)) + (C_{E0} + \varphi(d)), \quad (1)$$

где C_K – капитальные затраты, отнесенные к одному году (тыс. руб.); C_{K0} – часть капитальных затрат, не зависящая от диаметра трубопровода; C_E – годовые эксплуатационные затраты (тыс. руб.); C_{E0} – часть эксплуатационных затрат, не зависящая от диаметра трубопровода.

Чтобы найти оптимальный диаметр трубопровода, производную (1) приравнивают к нулю:

$$\psi'(d) + \varphi'(d) = 0. \quad (2)$$

Эксплуатационные затраты, зависящие от диаметра трубопровода, во всех ранее указанных публикациях рассчитываются по формуле Дженеро:

$$\varphi(d) = z \cdot A_E = z \cdot N_E \cdot T = z \cdot N_U \cdot T / (\eta_E \cdot \eta_P), \quad (3)$$

где z – стоимость электроэнергии (тыс. руб./кВт·ч); A_E – работа (кВт·ч), затраченная электродвигателем насоса за время T (ч); N_E – затраченная мощность электродвигателя (кВт); N_U – полезная (гидравлическая) мощность насоса (кВт); η_E , η_P – КПД электродвигателя и насоса, соответственно.

Гидравлическая мощность насоса рассчитывается по известной формуле:

$$N_U = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_P \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где ρ – плотность воды (кг/м³); g – ускорение свободного падения (м/с²); Q – подача насоса (м³/с); H_P – напор насоса (м).

Вместо напора насоса в формуле (4) используют характеристику трубопровода в рабочей точке установки ($H_T = H_P$):

$$H_T = H_C + (\lambda \cdot L/d + \zeta) \cdot V^2/(2g) = H_C + (\lambda \cdot L/d + \zeta) \cdot 8Q^2/(\pi^2 d^5 g), \quad (5)$$

где H_C – статический напор (м); L – длина трубопровода (м); λ – коэффициент гидравлических потерь на трение по длине трубопровода; ζ – суммарный коэффициент потерь напора в местных сопротивлениях; V – скорость воды в трубопроводе (м/с).

Коэффициент гидравлических потерь на трение будем рассчитывать по известной формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot (\Delta/d + 68/Re)^{0,25} = 0,11 \cdot (\Delta/d + 17\pi \cdot v \cdot d/Q)^{0,25}, \quad (6)$$

где $Re = Vd/v$ – число Рейнольдса; v – коэффициент кинематической вязкости воды (м²/с).

В протяженном трубопроводе точный расчет ζ невозможен; поэтому в проектных расчетах вместо него увеличивают λ на 10 %. Тогда, подставив (6) в (5), получим функцию диаметра:

$$H_T \equiv f(d, Q) = H_C + 0,968 \cdot [\Delta/d^{21} + 17\pi \cdot v/(d^{19} Q)]^{0,25} \cdot L \cdot Q^2/(\pi^2 g). \quad (7)$$

Частные случаи формулы (7): для гидравлически гладких труб будет отсутствовать первое слагаемое в квадратных скобках, а в квадратичной области сопротивления – второе слагаемое, как в [8].

Найдем производную (7) по диаметру:

$$f'(d) = 0,242 \cdot [\Delta/d^{21} + 17\pi \cdot v/(d^{19} Q)]^{-0,75} \cdot [-21\Delta/d^{22} - 323\pi \cdot v/(d^{20} Q)] \cdot L \cdot Q^2/(\pi^2 g). \quad (8)$$

С учетом (3) и (4) получим:

$$\varphi'(d) = f'(d) \cdot z \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot 10^{-3} \cdot T/(\eta_E \cdot \eta_P). \quad (9)$$

Полагаем, что для локальной сети холодного водоснабжения в проекте предусмотрено использование стальных труб (неоцинкованных). Трубы водогазопроводные (ВГП) легкие, рассчитанные на напор до 250 метров водяного столба. Для таких труб, как правило, принимают линейную зависимость капитальных затрат на единицу длины от их диаметра. Производная от такой функции – константа. Производственные и торговые компании размещают прайс-листы на указанную продукцию в открытом доступе в сети Интернет. В качестве примера были использованы данные из прайс-листа (на 15.02.2022), предоставленного компанией [10]. Они показаны точками на рис. 1. Данные других компаний могут отличаться, но тенденция сохраняется.

Для определенности воспользуемся далее характеристиками широко распространенных секционных центробежных насосов ЦНС. Их выпускают несколько российских компаний. На рис. 2 точками показаны экспериментальные данные [11] некоторых насосов ЦНС-38 (номинальная подача 38 м³/ч, второе число – номинальный напор H_N).

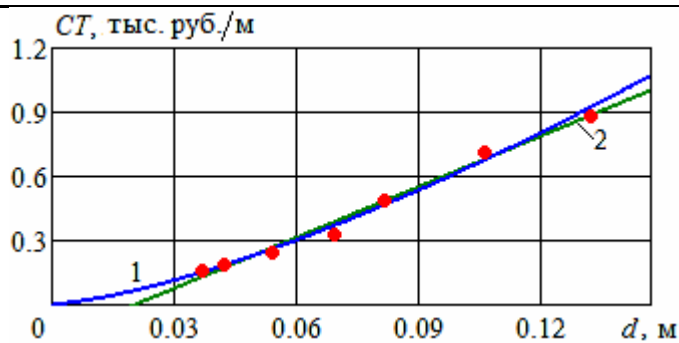


Рис. 1. Стоимость стальных труб ВГП в зависимости от внутреннего диаметра.

Точки – данные [10]; линии – результаты расчета:

1 – степенная модель, 2 – линейная модель

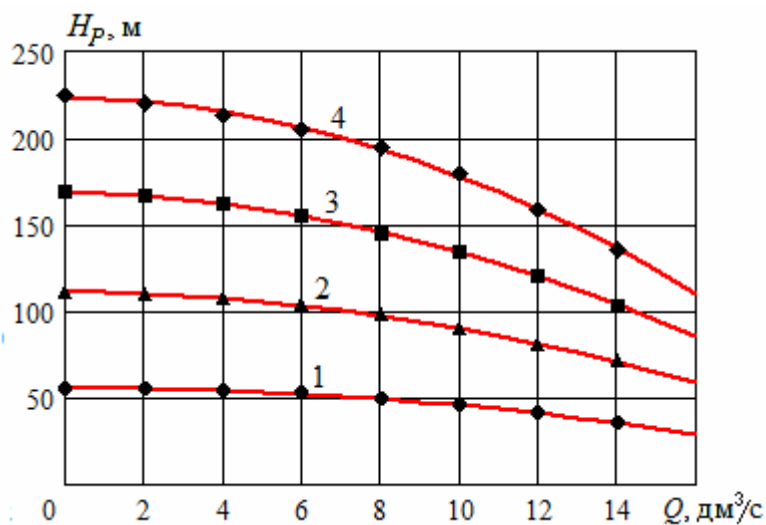


Рис. 2. Нагрузочные характеристики центробежных секционных насосов:

1 – ЦНС-38-44; 2 – ЦНС-38-88; 3 – ЦНС-38-132; 4 – ЦНС-38-176.

Точки – экспериментальные данные [11], линии – результаты расчета по формуле (10)

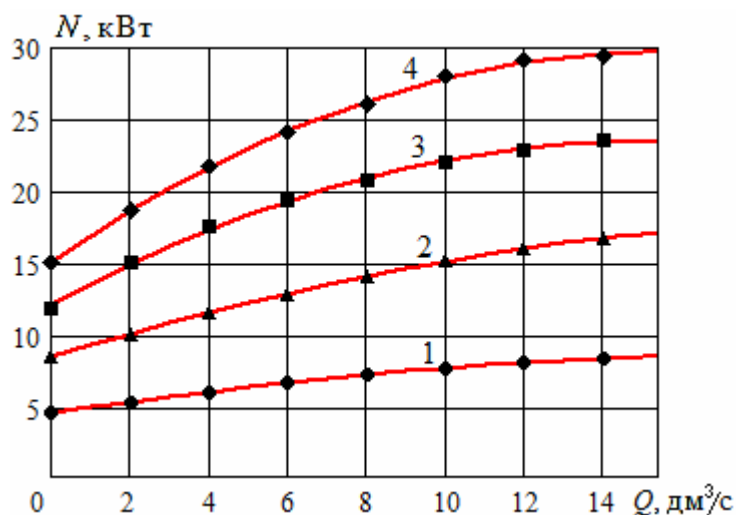


Рис. 3. Зависимость затраченной мощности секционных насосов ЦНС-38 от подачи (Обозначения, как на рис. 2)

В отличие от [12], у ЦНС и напор H_p , и затраченную мощность N от подачи Q можно аппроксимировать многочленом второго порядка:

$$H_p = H_0 + a_1 Q + a_2 Q^2, N = N_0 + b_1 Q + b_2 Q^2, \quad (10)$$

где H_0 , a_1 , a_2 ; N_0 , b_1 , b_2 – эмпирические коэффициенты, которые определяются методом наименьших квадратов по экспериментальным данным.

Насосы ЦНС-38 с разным количеством секций при максимальном КПД имеют одну и ту же номинальную производительность ($38 \text{ м}^3/\text{ч}$), но разный номинальный напор H_N . При уменьшении диаметра трубопровода необходимо установить насос с большим значением H_N . Но это приведет к увеличению капитальных затрат, что не учитывалось в предыдущих исследованиях.

В качестве примера используем прайс-лист насосов ЦНС-38 [11] на конец января 2022 года, приведенный в таблице.

Прайс-лист насосов ЦНС-38 [11] с рассчитанными диаметрами трубопровода локальной системы водоснабжения

№	H_N , м	CP , тыс. руб.	d , м
1	44	109,124	0,195
2	66	132,249	0,127
3	88	148,725	0,111
4	110	172,800	0,103
5	132	194,801	0,097
6	176	217,684	0,090
7	220	269,140	0,085

Результаты и обсуждение. Будем искать оптимальный диаметр системы локального водоснабжения с параметрами $Q_P = 10 \text{ м}^3/\text{с}$, $H_C = 43 \text{ м}$, $L = 500 \text{ м}$. Причем H_C включает необходимый свободный напор у потребителя. Абсолютную эквивалентную шероховатость стальных труб принимаем $\Delta = 0,08 \text{ мм}$.

Решим сначала вспомогательную задачу: найдем внутренние диаметры трубопровода, при которых в рабочей точке подача ЦНС-38 будет $Q_P = 10 \text{ м}^3/\text{с}$. Для чего рассчитаем d из уравнения $H_C(Q_P) = H_T(Q_P, d)$. Найденные значения диаметра внесены в последнюю колонку таблицы.

На рис. 4 показана графическая интерпретация такого решения для двух крайних случаев. Случаю a соответствует диаметр $d_a = 0,085 \text{ м}$; $b - d_b = 0,195$. Другими словами, чтобы обеспечить расход Q_P при $d = d_a$, необходимо установить насос ЦНС-38-220, при $d = d_b$ – ЦНС-38-44. Но стоимость насосов CP будет заметно различаться, что не учитывалось в ранее проведенных исследованиях, результаты которых опубликованы.

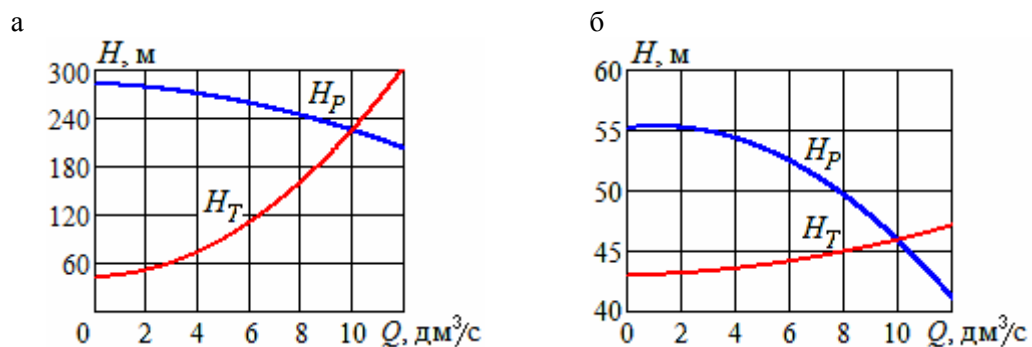


Рис. 4. Рабочая точка насосной установки:
а – ЦНС-38-220; б – ЦНС-38-44

В рассматриваемых условиях зависимость стоимости насоса от внутреннего диаметра трубопровода, для которого он предназначен, может быть аппроксимирована формулой $CP(d) = 19,07/d$ (индекс детерминации $R^2 = 0,873$), тогда производная

$$CP'(d) = -19,07/d^2. \quad (11)$$

Для точек на рис. 1 методом наименьших квадратов была подобрана линейная регрессионная зависимость:

$$CT(d) = C_0 d - 0,162; C_0 = 0,7936, \quad (12)$$

где CT – стоимость единицы длины стальных труб (тыс. руб./м).

Индекс детерминации (12) немногим меньше единицы. Второе отрицательное слагаемое не должно смущать читателя. Просто затраты, не зависящие от диаметра C_K , учитываются в формуле (1) отдельно.

В уравнении (2) требуется производная (12) по d :

$$CT'(d) = 7,936 \text{ тыс. руб./м}^2 = C_0 = \text{const}. \quad (13)$$

Подставляя полученные выражения производных (9), (11), (13) в (2), запишем уравнение для определения оптимального диаметра:

$$K_1 C_0 L + K_2 \cdot CP'(d_x) + f'(d_x) z \rho g Q_P \cdot 10^{-3} T / (\eta_E \cdot \eta_P) = 0, \quad (14)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты приведения капитальных затрат к одному году.

Величины K_1, K_2 играют важную роль при расчете оптимального диаметра. В [6] были приняты нормативные значения для централизованного водопровода: $K_1 = 0,05$; $K_2 = 0,09$. Частный инвестор может определить их исходя из срока окупаемости локальной системы водоснабжения, например $K_1 = K_2 = 0,2$. Тогда получим $K_1 C_0 = 1587 \text{ руб./м}^2$. В [9] этот параметр также был принят постоянным, но его величина (18 руб./м^2) вызывает по меньшей мере недоумение. Капитальные затраты были занижены, в результате был получен завышенный диаметр трубопровода.

Номинальные (наибольшие) КПД насоса и электродвигателя зависят от их марки. Так, у ЦНС-38-44 – $\eta_E = 0,885$; $\eta_P = 0,58$; у ЦНС-38-220 – $\eta_E = 0,936$; $\eta_P = 0,64$ [13]. Это также не учитывалось в предыдущих исследованиях. При первоначальном расчете будем использовать средние для серии значения, а затем уточним при пересчете.

В уравнении (14) необходимо задать величину z . Тарифы на электроэнергию заметно меняются по регионам. В качестве примера воспользуемся тарифами компании [13] для малых предприятий. Вначале возьмем наименьшее значение на январь 2022 года (Иркутскэнерго) $z = 3,6067 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}$.

На первом этапе решение уравнения (14) численным методом дает значение: $d_x = 0,128 \text{ м}$. В таблице ближайшее значение внутреннего диаметра при установке насоса ЦНС-38-66. Повторно решаем уравнение (14), в котором подставлен КПД, как у ЦНС-38-66. Получаем уточненное значение $d_y = 0,130 \text{ м}$. Из номенклатуры труб ВГП, выпускаемых российской промышленностью, такой внутренний диаметр имеют трубы с условным проходом ДУ 125. Именно их следует рекомендовать в рассмотренных условиях, как наиболее близкие к оптимальному диаметру.

Изменение исходных параметров может заметно повлиять на результат расчета. Так, при $K_1 = K_2 = 0,1$ получим $d_x = 0,143 \text{ м}$. С увеличением тарифов на электроэнергию будет возрастать и величина оптимального диаметра. Если взять наибольшее значение из упомянутого источника [13] (РКС-энерго, Ленинградская область) $z = 9,3654 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}$, то $d_x = 0,150 \text{ м}$. Может получиться, что значение d_x выходит за пределы определенных диаметров (см. таблицу). В таком случае следует подбирать другую серию насосов.

Заключение. Таким образом, разработанный метод определения оптимального диаметра трубопровода для локальной системы водоснабжения с учетом нагрузочных характеристик и затрат на центробежный насос состоит из следующих этапов:

1. Аппроксимация нагрузочных характеристик подходящей серии насосов (или нескольких серий) по формулам (10).
2. Формирование характеристики трубопровода как функции диаметра при заданном расходе, формула (7).
3. Определение значений внутреннего диаметра при заданном расходе в рабочей точке при установке каждого из насосов.
4. Нахождение стоимости насоса, который обеспечит необходимый напор при каждом из найденных диаметров, и производной $CP'(d)$.

5. Нахождение функции эксплуатационных затрат по формулам (3), (4) и производной $\varphi'(d)$.
 6. Определение зависимости стоимости единицы длины трубы от внутреннего диаметра и производной $CT'(d)$.
 7. Задание коэффициентов K_1 , K_2 и решение в первом приближении уравнения (14) численным методом d_x .
 8. Выбор насоса, обеспечивающего заданную подачу при диаметре трубопровода, ближайшем к d_x .
 9. Уточнение диаметра d_y путем решения уравнения (14) с характеристиками выбранного насоса.
 10. Выбор труб из номенклатуры выпускаемых российскими предприятиями с внутренним диаметром, ближайшим к d_y .
- Анализ показал, что с увеличением тарифов на электроэнергию будет возрастать и величина оптимального диаметра. При снижении периода окупаемости оптимальный диаметр уменьшается. Занижение в отдельных работах стоимости трубопровода приводит к заметному увеличению расчетного диаметра.

Список литературы

1. Проблемы водоснабжения населенных пунктов и предприятий пищевой промышленности Северо-Западного региона России / Е.Н. Кальсина, М.В. Бikuнова, С.М. Салмин, И.А. Хорева // Уральский научный вестник. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 38–40.
2. Великанов, Н.Л. Энергоэффективность систем водоснабжения крупных городов России / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, С.И. Корягин // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2019. – № 3 (49). – С. 28–32.
3. Калицун, В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация / В.И. Калицун, В.С. Кедров. – М.: Стройздат, 2002. – 394 с.
4. Гришин, Б.М. Гидравлика сетей и сооружений водоснабжения и водоотведения / Б.М. Гришин, М.В. Бikuнова, М.А. Сафронов. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2019. – 112 с.
5. Chu, F.-X. Optimal diameter selection of products pipeline based on dynamic programming / F.-X. Chu // Journal of China University of Petroleum. – 2006. – Vol. 30. – P. 90–96.
6. Чупин, В.Р. Оптимальная реконструкция сетей и сооружений систем водоснабжения в условиях сокращающегося водопотребления // В.Р. Чупин, И.В. Майзель // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – № 8(4). – С. 182–192.
7. Genereaux, R.P. Fluid-flow design methods / R.P. Genereaux // Industrial Engineering Chemistry. – 1937. – Vol. 29, No. 4. – P. 385–388.
8. Genic, S. Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence / S. Genic, B. Jacimovic, V. Geni // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 45. – P. 335–338.
9. Оптимизация технологических параметров и диаметра трубопровода с учетом энерго- и ресурсосбережения / А.Б. Голованчиков, Т.А. Дулькин, Н.А. Прохоренко, Н.А. Меренцов // Вестник ТГТУ. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 91–99.
10. Компания «Гермес Металлопрокат». Трубы стальные ВГП. – URL: <https://germesml.ru/catalog/truba-vgp/vgp.html> (дата обращения: 15.02.2022).
11. Китайский насосный завод. Насосы типа «ЦНС». – URL: https://knz.ru/wp-content/uploads/CNS_1.pdf (дата обращения: 30.01.2022).
12. Наумов, В.А. Влияние частоты вращения колеса канализационного погружного насоса на параметры рабочей точки / В.А. Наумов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2(47). – С. 125–132.
13. Тарифы на электроэнергию для малых предприятий. – URL: <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dla-malih-predpriyatiy-i-ip> (дата обращения: 10.02.2022).

1. The problem of water supply of settlements and enterprises of the food industry of the North-Western region of Russia / E.N. Kalsin, M.V. Bakunova, S.M. Salmin, I.A. Khoreva // *Ural scientific Bulletin*. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 38–40.
2. Velikanov, N.L. Energy efficiency of water supply systems in large cities of Russia / N.L. Velikanov, V.A. Naumov, S.I. Koryagin // *Technical and technological problems of service*. – 2019. – No. 3 (49). – P. 28–32.
3. Kalitsun, V.I. Hydraulics, water supply and sewerage / V.I. Kalitsun, V.S. Kedrov. – M.: Stroyzdat, 2002. – 394 p.
4. Grishin, B.M. Hydraulics of networks and structures of water supply and sanitation / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, M.A. Safronov. – Penza: PGUAS Publishing House, 2019. – 112 p.
5. Chu, F.-X. Optimal diameter selection of products pipeline based on dynamic programming / F.-X. Chu // *Journal of China University of Petroleum*. – 2006. – Vol. 30. – P. 90–96.
6. Chupin, V.R. Optimal reconstruction of networks and structures of water supply systems in conditions of declining water consumption // V.R. Chupin, I.V. Maisel // *Izvestiya vuzov. Investment. Construction. Realty*. – 2018. – No. 8(4). – P. 182–192.
7. Genereaux, R.P. Fluid-flow design methods / R.P. Genereaux // *Industrial Engineering Chemistry*. – 1937. – Vol. 29, No. 4. – P. 385–388.
8. Genic, S. Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence / S. Genic, B. Jacimovic, V. Genić // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 45. – P. 335–338.
9. Optimization of process parameters and the diameter of the pipeline taking into account energy and resource / A.B. Golovanchikov, T.A. Dulkan, N.A. Prokhorenko, N.A. Merentsov // *Vestnik TGTU*. – 2020. – Vol. 26, No. 1. – P. 91–99.
10. Hermes Metal Rolling Company. VGP steel pipes. – URL: <https://germesml.ru/catalog/truba-vgp/vgp.html> (accessed: 02/15/2022).
11. Katai Pumping Plant. Pumps of the «CNS» type. – URL: https://knz.ru/wp-content/uploads/CNS_1.pdf (date accessed: 30.01.2022).
12. Naumov, V.A. Influence of the wheel speed of the sewage submersible pump on the parameters of the operating point / V.A. Naumov // *Regional architecture and engineering*. – 2021. – No. 2(47). – P. 125–132.
13. Electricity rates for small enterprises. – URL: <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dla-malih-predpriyatiy-i-ip> (accessed: 10.02.2022).

УДК 628.16

DOI 10.54734/20722958_2022_2_161

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

Гришин Борис Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Бикунова Марина Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

Титов Евгений Александрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: titov-penza@mail.ru

Шеин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Механика»
E-mail: shein-ai@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

Grishin Boris Mikhailovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Water Supply,
Sewerage and Hydraulic Engineering»
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Bikunova Marina Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

Titov Evgeny Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Water Supply, Sewerage and
Hydraulic Engineering»
E-mail: titov-penza@mail.ru

Shein Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Mechanics»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

УДАЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ФОРМ ЖЕЛЕЗА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА

Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, Е.А. Титов, А.И. Шеин

Сделан теоретический анализ процесса каталитического распада молекул перекиси водорода H_2O_2 в присутствии ионов двухвалентного железа – процесса Фентона, осуществляемого для окисления органических примесей воды подземного источника. Приведены результаты лабораторных исследований по удалению органических форм железа из воды Кузнецкого месторождения с применением перекиси водорода и коагулянта – полиоксихлорида алюминия (ПОХА) – при различных режимах ввода окислителя. Экспериментально установлено, что при дробном введении в исходную воду H_2O_2 с дозами 20-25 мг/л и последующей обработке ПОХА с дозой 6 мг/л остаточные концентрации общего железа и перманганатной окисляемости в фильтрате соответствовали требованиям, предъявляемым к питьевой воде.

Ключевые слова: подземные воды, органические формы железа, перекись водорода, процесс Фентона, коагулянт, фильтрование

REMOVAL OF ORGANIC IRON FROM GROUNDWATER USING HYDROGEN PEROXIDE

B.M. Grishin, M.V. Bikunova, E.A. Titov, A.I. Shein

Theoretical analysis of catalytic decomposition for hydrogen peroxide H_2O_2 molecules in the presence of ferrous ions – Fenton's process, carried out for the oxidation of organic impurities from an underground water is made. The results of laboratory studies on the removal of iron organic forms from the water of the Kuznetsk deposit using hydrogen peroxide and a coagulant – aluminum polyoxochloride (PACl) under various modes of introducing an oxidizing agent are presented. It was experimentally established that with fractional introduction of H_2O_2 into the source water at doses of

20–25 mg/l and subsequent treatment with PACl at a dose of 6 mg/l, the residual concentrations of total iron and permanganate oxidizability in the filtrate met the requirements for drinking water.

Keywords: groundwater, organic forms of iron, hydrogen peroxide, Fenton process, coagulant, filtration

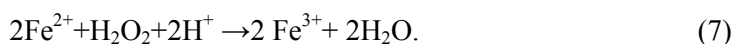
В настоящее время более 30 % водозабора для центральных систем водоснабжения осуществляется из подземных вод. Большинство подземных водоисточников характеризуется содержанием повышенных концентраций двухвалентного железа, которое обычно удаляется методами аэрации. Однако в последние годы заметно участились случаи загрязнения водоносных горизонтов бытовыми и производственными сточными водами, содержащими органические примеси, которые образуют с ионами железа трудноокисляемые комплексные соединения. В этих условиях традиционные методы аэрации подземной воды становятся неэффективными, и для обезжелезивания требуются технологии с совместным применением методов аэрации и коагулирования [1]. Анализ литературных источников показал, что при удалении трудноокисляемых органических примесей из воды перспективными являются методы очистки с применением сильных окислителей, в том числе перекиси водорода [2].

Перекись водорода имеет ряд технологических преимуществ, таких, как невысокая токсичность, химическая стабильность, высокая растворимость в воде, относительная простота аппаратного оформления для генерации раствора H_2O_2 . При удалении органических примесей из воды эффективность перекиси водорода не всегда бывает достаточно высокой, поэтому в настоящее время широко применяются окислительные методы, основанные на каталитическом распаде молекул H_2O_2 в присутствии ионов Fe^{2+} , который имеет название процесса Фентона [2, 3].

По результатам исследований, проведённых отечественными и зарубежными учёными (Сычев А.Я., Баксиндаль Д., Долгопоск Б.А., Скурлатов Ю.И. и др.), процесс Фентона может быть представлен совокупностью следующих стадий:



Указанные стадии реализуются в водной среде с $pH > 2$ при условии соотношения концентраций перекиси водорода и иона железа в реагенте Фентона $0,5 < [H_2O_2]/[Fe^{2+}] < 200$. При $[Fe^{2+}] > [H_2O_2]$ процесс Фентона включает в себя только стадии (1) и (2), т.е. происходит окисление закисного железа с разложением перекиси водорода без выделения кислорода. Суммарное уравнение реакции в этом случае имеет вид



Окисление органических примесей, присутствующих в воде, осуществляется по цепному механизму (Эмануэль Н.М., Денисов Е.Г., Майзус З.К.)



где RH – исходный органический субстрат; $R^\cdot$ – органический радикал.

Лимитирующей стадией данного цепного процесса является реакция (9) вследствие незначительных концентраций в подземной воде молекул кислорода. При $\text{pH} > 4$ за счёт осаждения гидроокиси $\text{Fe}(\text{OH})_3$ концентрация катализатора $[\text{Fe}^{2+}]$ снижается (Сычев А.Я., Де Лаат Дж.). По [4], при pH 3,5–7 образующиеся в системах $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{Fe}^{2+}$ гидроксиды трёхвалентного железа имеют тенденцию к полимеризации, т.е. начинают приобретать свойства коагулирующего агента. Исследования, проведённые Кенгом В.К., Соложенко Е.Г. и др., показали, что при pH воды, близкой к нейтральной, окисление органических примесей при осуществлении процесса Фентона может сопровождаться сорбцией исходного субстрата, а также промежуточных и конечных продуктов реакций (8) – (11) на полимерных гидроксокомплексах Fe^{3+} , что приводит к дополнительному снижению ХПК на 15–30 %. Очевидно, что обработка подземных вод небольшими дозами минеральных или органических коагулянтов после введения пероксида водорода будет способствовать ускорению образования полимерных гидроксокомплексов трёхвалентного железа и увеличению скорости адсорбции на них органических примесей.

Экспериментальные данные, полученные Соложенко Е.Г., Тилем А.Л., Кенгом В.К., Чамадро И., Уоллингом Ч., показали, что большинство водорастворимых органических примесей, присутствующих в подземных водах, хорошо окисляется при мольном стехиометрическом соотношении $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{RH}]$ в пределах от 2 до 10. В этом случае возрастает доля реакций (2) и (3), а также происходит рекомбинация гидроксильных радикалов



благодаря чему увеличивается скорость каталитического окисления H_2O_2 . Анализ результатов полупроизводственных экспериментов на пилотной установке для окислительной очистки сточных вод в присутствии реагента Фентона позволил сделать вывод о том, что дробная подача H_2O_2 повышает эффективность его окислительного действия и обеспечивает сокращение расхода катализатора [2]. Отмечается также, что если начальная скорость окисления органических соединений зависит от исходной концентрации ионов Fe^{2+} , то на общую скорость процесса и степень удаления ХПК влияет степень восстановления трёхвалентного железа в двухвалентную форму $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$.

Оптимальные мольные соотношения $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$, $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{3+}]$ и $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{RH}]$ зависят от природы и концентрации органического субстрата, температуры и коагуляционного эффекта. По данным Уилмса К.Г., оптимальные соотношения $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ для удаления легкоокисляемой органики находятся в пределах от 3:1 до 30:1 при температуре воды 25–35 $^{\circ}\text{C}$, что подтверждается результатами испытаний, представленными в [2].

Таким образом, обзор литературных источников показал, что эффективность процесса удаления органических форм железа из воды подземных источников с применением пероксида водорода существенно зависит от режима обработки воды окислителем, соотношения концентраций Fe^{2+} и ХПК, а также количества коагулирующих агентов для сорбции продуктов реакций.

Целью проведённых авторами лабораторных исследований являлось нахождение оптимальных доз и режимов ввода пероксида водорода для удаления органических форм железа из подземной воды Кузнецкого месторождения в Пензенской области с дополнительной её обработкой алюмосодержащим коагулянтом и последующим фильтрованием.

Состав исходной подземной воды характеризовался следующими показателями: температура 15 $^{\circ}\text{C}$, pH 6,9–7,1, цветность 18–21 град, мутность 2–3 мг/л, жесткость 1,2–1,35 ммоль/л, железо 4,9–5,2 мг/л, в том числе двухвалентное железо 3,8–4,2 мг/л, ХПК 14–16 мг/л, хлориды 2,5–3,1 мг/л, сульфаты 15–17 мг/л. Предварительные эксперименты показали, что применение традиционного метода аэрации и последующего фильтрования для такой воды не обеспечивает нормативного содержания железа в фильтрате ($\text{Fe} \leq 0,3$ мг/л).

Программа испытаний по определению эффективности действия раствора H_2O_2 при очистке подземной воды предусматривала проведение двух этапов лабораторных исследований.

На первом этапе исходная вода, помещённая в химический стакан ёмкостью 1 л, перемешивалась в течение 1 мин с помощью магнитной мешалки с 3 %-м раствором перекиси водорода, введённым однократно. Далее в воду, обработанную окислителем, с различными дозами добавлялся 10 %-й раствор коагулянта – полиоксихлорида алюминия (ПОХА) с массовой долей оксида алюминия в товарном продукте, равной 30 %. После этого осуществлялись вторичное перемешивание исходной воды с введёнными реагентами в течение 60 с и последующее её фильтрование через лабораторный фильтр высотой 0,7 м и диаметром 0,1 м, заполненный кварцевым песком с крупностью зёрен 0,8–1,2 мм.

На втором этапе экспериментов в исходную воду вводилось 50 % от расчётной дозы H_2O_2 и после 30-секундного перемешивания вводились остальные 50 % дозы окислителя с последующим перемешиванием также в течение 30 с. Далее в воду добавлялся с различными дозами 10 %-й раствор коагулянта ПОХА, и затем после перемешивания в течение 1 мин с реагентами (перекисью водорода и коагулянтом) исходная вода пропусклась через лабораторный фильтр с песчаной загрузкой.

Дозы H_2O_2 изменялись в пределах $D_{\text{п}}=5\text{--}25$ мг/л, а дозы ПОХА варьировались от $D_{\text{к}}=2$ мг/л до $D_{\text{к}}=6$ мг/л. Ряд экспериментов по обезжелезиванию воды с применением перекиси водорода осуществлялся без добавления коагулянта.

Отобранные пробы фильтрата анализировались на содержание общего железа и ХПК. В пробах с наименьшими значениями ХПК определялась также перманганатная окисляемость (ПО) воды.

Результаты лабораторных исследований по удалению органических форм железа из подземных вод Кузнецкого месторождения в Пензенской области показаны на рис. 1 и 2.

Анализ полученных результатов показал, что эффективность очистки подземной воды от железа и органических примесей зависит не только от доз реагентов ($D_{\text{п}}$ и $D_{\text{к}}$), но и от способа введения перекиси водорода в обрабатываемую воду. При однократном введении раствора H_2O_2 в исходную воду без использования коагулянта наименьшая остаточная концентрация общего железа в фильтрате составляла 0,57 мг/л при $D_{\text{п}}=25$ мг/л или соотношении $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]=6,2:1$ (см. рис. 1,а, график 1).

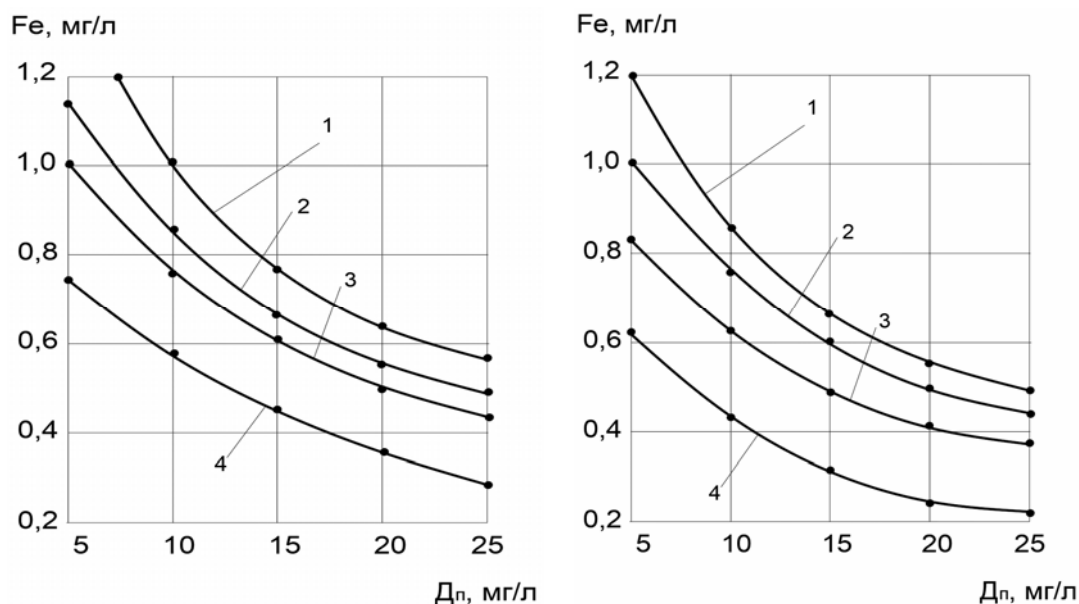


Рис. 1. Графики зависимостей остаточного содержания в воде общего железа от доз H_2O_2 ($D_{\text{п}}$) и коагулянта ($D_{\text{к}}$) при:

1 – $D_{\text{к}}=0$; 2 – $D_{\text{к}}=2$ мг/л; 3 – $D_{\text{к}}=4$ мг/л; 4 – $D_{\text{к}}=6$ мг/л

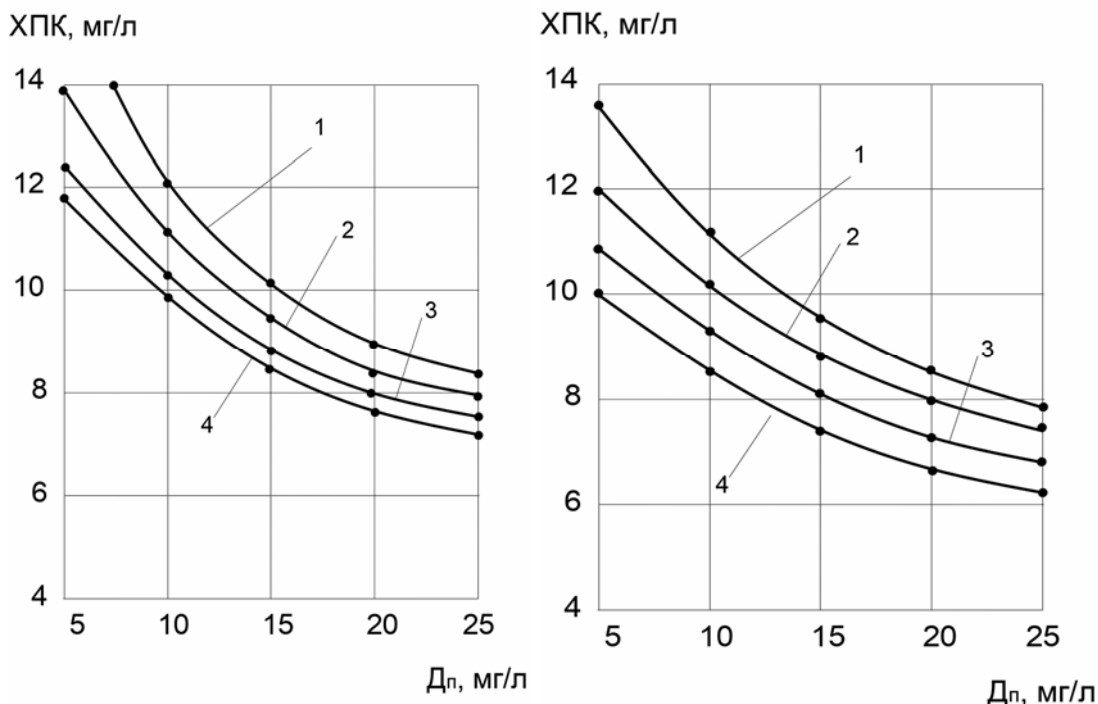


Рис. 2. Графики зависимости остаточного содержания в воде ХПК от доз H_2O_2 (D_p) и коагулянта (D_k) при:

1 – $D_k=0$; 2 – $D_k=1+1$ мг/л; 3 – $D_k=2+2$ мг/л; 4 – $D_k=3+3$ мг/л

Добавление коагулянта ПОХА улучшало качество фильтрата пропорционально дозе алюмосодержащего коагулянта, а при $D_k=6$ мг/л и $D_p=25$ мг/л содержание остаточного железа в очищенной воде ($Fe = 0,27$ мг/л) соответствовало нормативу для питьевой воды (см. рис. 1а, график 4).

При двукратном (дробном) введении 50 %-й дозы H_2O_2 эффект очистки повышался. Концентрация общего железа в фильтрате составляла 0,48 мг/л при $D_p=25$ мг/л без добавления коагулянта (см. рис. 1б, график 1) и 0,22 мг/л при добавлении ПОХА с дозой 6 мг/л (см. рис. 1б, график 4). Характер снижения ХПК фильтрата в зависимости от доз реагентов при обработке исходной воды перекисью водорода и ПОХА был аналогичен характеру снижения концентраций общего железа. При однократном введении перекиси водорода наименьшее значение ХПК в фильтрате (8,7 мг/л) наблюдалось при $D_p=25$ мг/л без добавления коагулянта (см. рис. 2а, график 1), а при введении коагулянта с $D_k=6$ мг/л остаточная концентрация ХПК составляла 7,2 мг/л (см. рис. 2а, график 4).

Дробное введение H_2O_2 в исходную воду повышало эффективность удаления органики. При $D_p=25$ мг/л и $D_k=0$ остаточная концентрация ХПК в фильтрате находилась на уровне 7,8 мг/л (см. рис. 2б, график 1), а при $D_p=25$ мг/л и $D_k=6$ мг/л содержание ХПК в очищенной воде было наименьшим и составляло 6,2 мг/л.

Во второй серии экспериментов при $D_p=20$ и 25 мг/л и $D_k=6$ мг/л перманганатная окисляемость (ПО) фильтрата не превышала 5 мг O_2 /л, что соответствовало нормативным требованиям для питьевой воды.

На основе проведенного анализа можно отметить, что исследованный способ очистки подземной воды, содержащей железоорганические комплексы, требует использования весьма высоких доз пероксида водорода (не менее 20 мг/л) и ПОХА (не менее 6 мг/л) для обеспечения нормативных показателей питьевой воды по железу и ПО. В связи с этим является актуальной задача снижения доз H_2O_2 и коагулянта с применением безреагентных методов интенсификации процессов удаления из воды железоорганических соединений.

ВЫВОДЫ

1. Определён характер влияния доз перекиси водорода и коагулянта ПОХА на процесс фильтрационной очистки подземной воды от органических форм железа.
2. Экспериментально установлено, что дробное введение раствора перекиси водорода улучшает эффект очистки воды фильтрованием по общему железу и ХПК по сравнению с однократным введением H_2O_2 с теми же дозами.
3. При двукратном введении в исходную воду растворов H_2O_2 с последующей обработкой коагулянтном ПОХА с дозами соответственно 20–25 мг/л и 6 мг/л остаточные концентрации железа и перманганатной окисляемости соответствовали нормативным требованиям, предъявляемым к воде питьевого качества.
4. В связи с высокими дозами пероксида водорода и ПОХА, необходимыми для глубокой очистки подземной воды от железоорганических комплексов, является актуальной задача разработки усовершенствованной технологии с совместным применением реагентных и безреагентных методов обработки исходной воды.

Список литературы

1. Гришин, Б.М. Реагентное обезжелезивание подземных вод с применением электрогидродинамического устройства / Б.М. Гришин, А.Н. Кошев, М.В. Бикунова, М.А. Сафронов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №2(27). – С. 118–123.
2. Zhang, M.H. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective / M.H. Zhang, H. Dong, L. Zhao, D.X. Wang, D. Meng // The Science of the total environment. – 2019. – №670. – P.110–121.
3. Желовицкая, А.В. Окисление органических соединений с помощью гидроксид-радикала, генерируемого в растворах химическими и электрохимическими методами / А.В. Желовицкая, Е.А. Ермолаева, А.Ф. Дресвянников // Вестник Казанского технологического университета. – 2008. – №6. – С. 211–229.
4. Соложенко, Е.Г. Применение каталитической системы $H_2O_2 - Fe^{2+} (Fe^{3+})$ при очистке воды от органических соединений / Е.Г. Соложенко, Н.М. Соболева, В.В. Гончарук // Химия и технология воды. – 2004. – Т.26, №3. – С. 219–41.

References

1. Grishin, B.M. Reagent deironing of underground waters using an electrohydrodynamic device / B.M. Grishin, A.N. Koshev, M.V. Bikunova, M.A. Safronov // Regional architecture and construction. – 2016. – No 2 (27). – P. 118–123.
2. Zhang, M.H. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective / M.H. Zhang, H. Dong, L. Zhao, D.X. Wang, D. Meng // The Science of the total environment. – 2019. – No 670. – P. 110–121.
3. Zhelovitskaya, A.V. Oxidation of organic compounds using hydroxide radical generated in solutions by chemical and electrochemical methods / A.V. Zhelovitskaya, E.A. Ermolaeva, A.F. Dresvyannikov // Bulletin of the Kazan Technological University. – 2008. – No 6. – P. 211–229.
4. Solozhenko, E.G. Application of catalytic system $H_2O_2 - Fe^{2+} (Fe^{3+})$ in water purification from organic compounds / E.G. Solozhenko, N.M. Sobleva, V.V. Goncharuk // Chemistry and technology of water. – 2004. – Vol.26, No 3. – P.219–241.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 711.4 (534.2)

DOI 10.54734/20722958_2022_2_167

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

Гречишкин Александр Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Городское строительство
и архитектура»

E-mail: gsia@pguas.ru

Тамбовский государственный технический университет

Россия, 392000, г. Тамбов,
ул. Советская, д. 106,
тел. (4752) 63-10-19; факс: (4752) 63-06-43

Антонов Александр Иванович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Архитектура
и градостроительство»
E-mail: aiant58@yandex.ru

Путинцева Анастасия Александровна,
доцент кафедры «Архитектура
и градостроительство»
E-mail: anastas_84@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

Grechishkin Aleksander Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Urban Development
and Architecture»

E-mail: gsia@pguas.ru

Tambov State Technical University

Russia, 392000, Tambov, 106, Sovetskaya St.,
tel.: (4752) 63-10-19; fax: (4752) 63-06-43

Antonov Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Architecture
and Urban Planning»
E-mail: aiant58@yandex.ru

Putintseva Anastasia Aleksandrovna,
Associate Professor of the department
«Architecture and Urban Planning»
E-mail: anastas_84@mail.ru

ПРЯМОЙ ЗВУК ОТ ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ НА ТЕРРИТОРИИ МАЛОЭТАЖНОЙ ЗАСТРОЙКИ

А.В. Гречишкин, А.И. Антонов, А.А. Путинцева

Приводятся результаты исследования особенности распространения прямого звука от транспортных магистралей как линейных источников шума на прилегающей территории. Предлагается инженерный статистический метод расчета прямого шума на примыкательной территории с малоэтажной застройкой. Метод позволит проектировщикам с минимальными затратами времени рассчитывать шумовые поля и проектировать средства защиты поселений от транспортного шума.

Ключевые слова: малоэтажная застройка, транспортный шум, линейный источник шума, прямой звук

DIRECT SOUND FROM TRANSPORT HIGHWAY ON THE TERRITORY OF LOW-RISE BUILDINGS

A.V. Grechishkin, A.I. Antonov, A.A. Putintseva

The results of the study of the propagation of direct sound from highways as linear sources of noise in the adjacent territory are presented. An engineering statistical method is proposed for

calculating direct noise in a highway area with low-rise buildings. The method allows designers to calculate noise fields and design means of protecting settlements from traffic noise with minimal time.

Keywords: low-rise buildings, traffic noise, linear noise source, direct sound

Введение. Одними из основных источников шумового загрязнения жилой застройки являются транспортные магистрали. Сверхнормативное зашумление примагистральной застройки – экологическая проблема современных поселений. Для расчёта прямого звука, распространяющегося в застройке, в настоящее время имеются методики, изложенные в нормативной и справочной литературе [1]. Однако эти методики сложно использовать при расчетах шума в застройке [2, 3]. Большое количество зданий и сооружений различных форм и размеров, располагающихся на пути звука, требует больших затрат времени на подготовку исходных данных и расчет прямого звука. При таких условиях формирования шумового режима застройки необходимы другие расчетные модели и методы их реализации в малоэтажной застройке. В статье предлагается такая расчетная модель.

Теоретический анализ. Уровни шума от дороги как линейного источника звука определяются по выражению

$$L_{св} = L_A + 10 \lg \left(\frac{R_0}{R} \right) + 10 \lg \left(\frac{\varphi}{\pi} \right), \quad (1)$$

где L_A – шумовая характеристика дороги, равная уровню шума в опорной точке; R – кратчайшее расстояние от расчетной точки до оси крайней полосы дороги, ближайшей к расчетной точке; R_0 – расстояние от опорной точки до дороги, для автомобильного потока $R_0 = 7.5$ м; φ – угол видимости участка дороги из расчетной точки. На территории застройки φ определяется углом видимости участка дороги через просвет между зданиями. В выражении (1) должно быть также учтено влияние подстилающего слоя и затухания звука в воздухе [4].

Малоэтажная застройка, располагаемая вдоль транспортных магистралей, имеет ряд особенностей: первый ряд зданий размещается параллельно дороге; приусадебные земельные участки примерно равны по площади, и расстояния между зданиями различаются незначительно; размеры зданий в плане и по высоте сопоставимы и несущественно различаются от средних величин. Шум на территорию застройки от дороги поступает через просветы между зданиями (рис. 1).

На рис. 2 приведена карта шума в застройке после прохождения звука через ее первый эшелон. Расчет выполнен для однорядной застройки из зданий размерами в плане 30×10 м. Разрывы между зданиями составляют $a = 30$ м. Расстояние от фасадов зданий до крайней полосы магистрали $d = 20$ м. Расчет выполнен по стандартной методике от каждого просвета между зданиями по выражению (1).

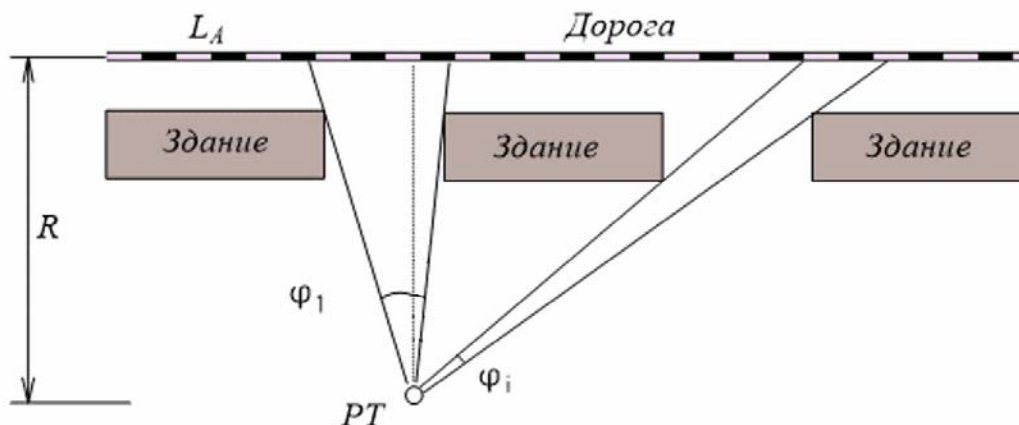


Рис. 1. Схема к расчету углов видимости участков дороги через просветы между зданиями $\varphi = \sum \varphi_i$

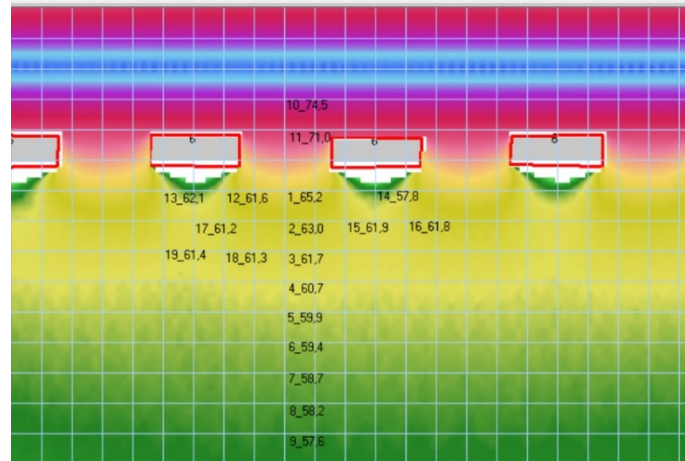


Рис. 2. Звуковое поле на примагистральной территории с однорядной застройкой с уровнями шума в характерных точках

Распределение окраски карты соответствует распределению уровней звукового давления. Из карты видно, что звуковое поле между дорогой и застройкой имеет цилиндрическую зависимость. Изолинии (линии одинакового цвета) располагаются параллельно дороге. Примерно по такой же зависимости изменяется энергия прямого звука за однорядной застройкой на расстоянии от дороги более 40 м. Эта особенность формирования звуковых полей за цепочкой зданий дает возможность использовать для их оценки упрощенное выражение в виде

$$L_{\text{св}} = L_A + 10 \lg \left(\frac{R_0}{R} \right) + 10 \lg (\beta), \quad (2)$$

где β – коэффициент, учитывающий влияние застройки на величину уровня шума от транспортной магистрали.

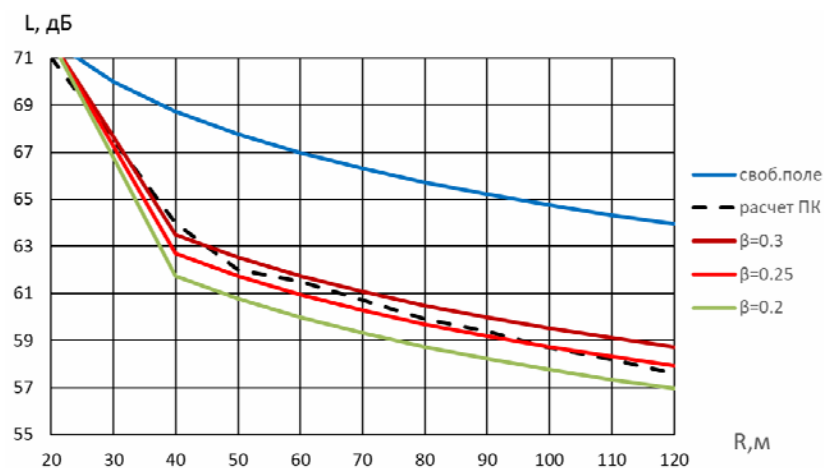


Рис. 3. Уровни прямого звука за однорядной застройкой, рассчитанные: в свободном поле; по нормативной методике; по уравнению (2) при различных коэффициентах β

На рис. 3 приведены графики уровней в характерном сечении примагистральной территории в свободном поле и за первым эшелоном застройки по результатам компьютерного расчета по выражению (1) и предлагаемой упрощенной методике при различных коэффициентах $\beta = 0.2, 0.25, 0.3$. Из рисунка видно, что при $R \geq 40$ м все графики почти параллельны, что подтверждает возможность использования приближенного учета влияния малоэтажной застройки на распространение прямого звука от автомобильной магистрали.

Методика расчета транспортного шума. Коэффициент прохождения звука β через эшелон застройки можно определить на основе компьютерного моделирования звукового поля в застройке и последующего его сравнения со звуковым полем в свободном пространстве. В этом случае коэффициент β может рассчитываться по формуле

$$\beta_p = 10^{-0.1(L_{\text{св}} - L_{\text{пк}})}, \quad (3)$$

где $(L_{\text{св}} - L_{\text{пк}})$ – уменьшение уровня шума за счет застройки; $L_{\text{св}}$ – уровни шума от автодороги в свободном пространстве (без зданий); $L_{\text{пк}}$ – уровни шума, рассчитанные на компьютере по нормативной методике с учетом застройки.

На основе статистической обработки расчетных данных и их анализа получено эмпирическое выражение для коэффициента β в виде

$$\beta = 0,612 \frac{a}{a+b} - 0,152 \frac{c}{a}, \quad (4)$$

где a – длина просвета между зданиями; b, c – средние значения длины и ширины зданий.

В табл. 1 приведены точные и приближенные расчеты уровней транспортного шума для двух вариантов застройки примагистральной территории. При расчетах использованы значения коэффициентов прохождения звука, рассчитанные по выражению (4).

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета коэффициента прохождения β и уровней шума по выражениям (1) и (2)

№	$R, \text{ м}$	$L_{\text{св}}, \text{ дБ}$	$a = 20 \text{ м}; b = 20 \text{ м}; c = 10 \text{ м}$				$a = 40 \text{ м}; b = 30 \text{ м}; c = 10 \text{ м}$			
			$L_{\text{пк}}, \text{ дБ}$	$\Delta L, \text{ дБ}$	β_p	$L_p \text{ при } \beta = 0,23$	$L_{\text{пк}}, \text{ дБ}$	$\Delta L, \text{ дБ}$	β_p	$L_p \text{ при } \beta = 0,31$
1	40	68,7	62,5	6,2	0,24	62,3	64,7	4,0	0,40	63,6
2	50	67,7	60,9	6,9	0,20	61,3	63,2	4,6	0,35	62,7
3	60	67,0	60,7	6,3	0,23	60,6	62,3	4,7	0,34	61,9
4	70	66,3	59,9	6,4	0,23	59,9	61,6	4,7	0,34	61,2
5	80	65,7	59,3	6,4	0,23	59,3	60,9	4,8	0,33	60,6
6	90	65,2	58,7	6,5	0,22	58,8	60,1	5,1	0,31	60,1
7	100	64,8	58,1	6,7	0,21	58,4	59,6	5,2	0,30	59,7
8	110	64,3	57,7	6,6	0,22	57,9	59,0	5,3	0,30	59,2
9	120	64,0	57,1	6,9	0,20	57,6	58,5	5,5	0,28	58,9

Обозначения в таблице: $\Delta L = L_{\text{св}} - L_{\text{пк}}$; β_p – см. пояснение к выражению (3); L_p – уровни шума, рассчитанные по выражению (2) с учетом определения коэффициента прохождения шума по выражению (4).

Изменение коэффициента β_p в диапазоне расстояний $R = 40 \div 120 \text{ м}$ в большинстве случаев не превышает 15 %, что соответствует изменению уровня до 0,6 дБ и погрешности $\pm 0,4 \text{ дБ}$. Данные табл. 1 указывают на удачно выбранное выражение (4).

В случае многорядной нерегулярной малоэтажной застройки распространение шума в застройке происходит по различным закономерностям. На первый ряд застройки приходят цилиндрические волны, и здания здесь оказывают наибольшее влияние на снижение шума. Степень этого влияния определяется величиной коэффициента β , определяемого по выражению (4). На каждый последующий ряд зданий будет поступать звуковая энергия через разрывы (просветы) между зданиями с измененной структурой.

Установлено, что эффективность снижения шума каждым последующим рядом зданий нерегулярной застройки уменьшается. На рис. 4 приведены шумовая карта и рассчитанные уровни шума в характерном сечении застройки, состоящей из нескольких рядов зданий размерами $20 \times 10 \times 6(h) \text{ м}$. Расстояния между зданиями 40 м, между рядами застройки – 40 м.

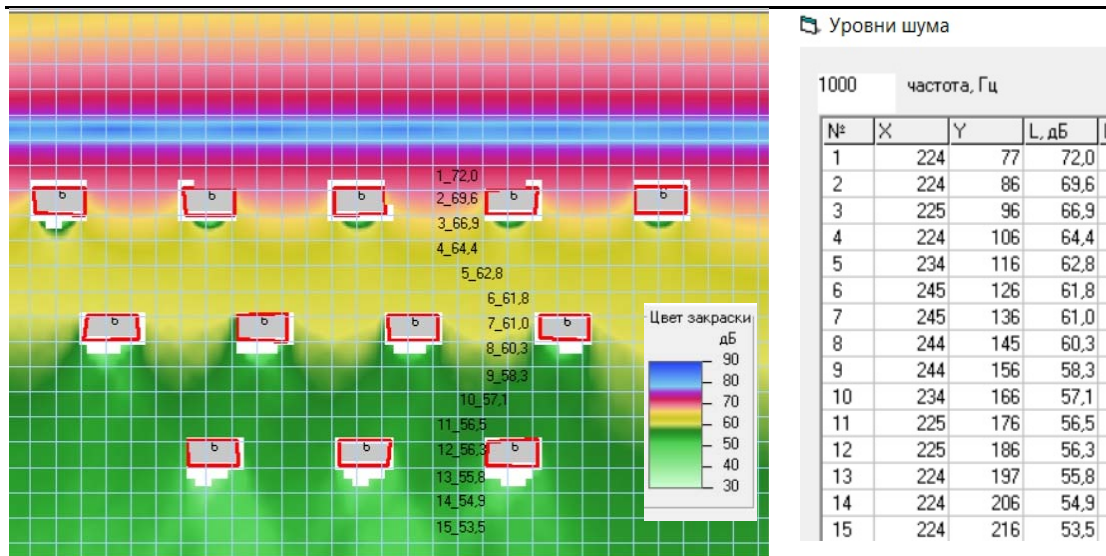


Рис. 4. Шумовая карта и значения уровней шума в характерном сечении

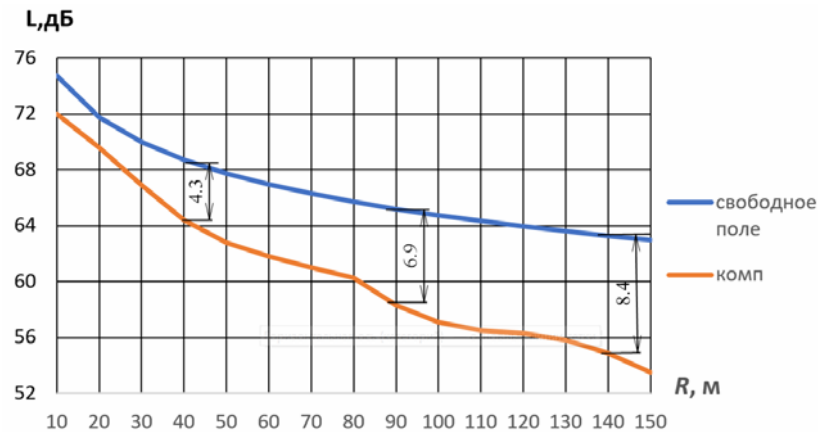


Рис. 5. Снижение шума дороги за счет многорядной застройки

На рис. 5 приведен график снижения шума дороги, рассчитанный по нормативной методике, за счет застройки, изображенной на рис. 4. Результаты компьютерного расчета уровней шума на территории с многорядной застройкой показали, что первый ряд застройки снижает уровень шума на $\Delta L_{зд1} = -4,3$ дБ, два ряда – на $\Delta L_{зд2} = -6,9$ дБ, три ряда зданий – на $\Delta L_{зд3} = -8,4$ дБ (см. рис. 5). Согласно формуле (4), первый эшелон застройки имеет коэффициент прохождения шума $\beta = 0,37$. В этом случае ряд зданий должен уменьшать уровень падающего звука на $\Delta L_{зд} = 10 \lg(0,37) = -4,3$ дБ.

Выполненная статистическая обработка результатов расчета распространения шума на примагистральной территории показала, что влияние многорядной нерегулярной малоэтажной застройки можно с достаточной точностью принять равной

$$\Delta L_{зд} = 10 \lg \left(\frac{\beta}{n} \right), \quad (5)$$

где n – количество рядов застройки между расчетной точкой и транспортной магистралью. На основе выражения (5) снижение шума рядами зданий составит: $\Delta L_{зд1} = -4,3$ дБ, $\Delta L_{зд2} = -7,3$ дБ, $\Delta L_{зд3} = -9,1$ дБ.

Таким образом, с помощью формулы (5) можно определить величину уровня энергии прямого звука на разреженной малоэтажной примагистральной территории по выражению

$$L_n = L_A + 10 \lg \left(\frac{R_0}{R} \right) + 10 \lg \left(\frac{\beta}{n} \right). \quad (6)$$

Коэффициент прохождения звука через многорядную застройку в этом случае рассчитывается по измененному выражению (3):

$$\beta_p = n 10^{-0.1\Delta L}, \quad (7)$$

где $\Delta L = L_{св} - L_{пк}$ – см. выражение (3).

Проверка выполнена на основе сравнения уровней шума, рассчитанных по нормативной и предлагаемой методикам, для фрагмента примыкающей территории (рис. 6). Застройка состоит из трех рядов зданий со средними размерами $20 \times 10 \times 6(h)$ м, между ними просветы по 20 м. От крайней полосы дороги до фасадов зданий – 20 м. Расстояние между рядами застройки составляет 50 м. Расчет выполнен в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц. Уровни звукового давления на расстоянии 7.5 м от оси крайней полосы движения составляют 76 дБ. На рисунке также приведены уровни звукового давления L_p , рассчитанные по компьютерной программе на основе стандартной методики.

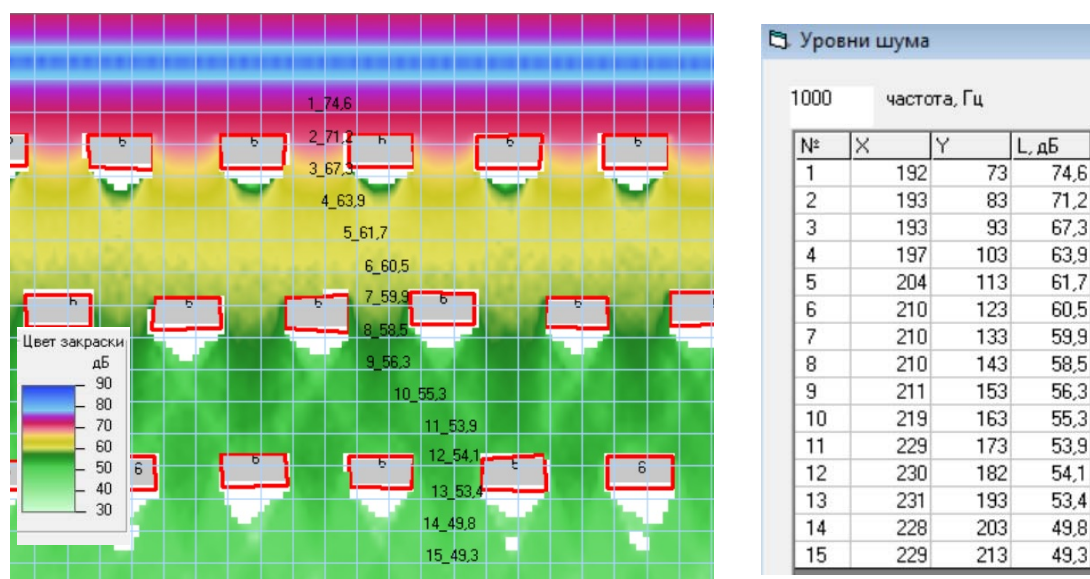


Рис. 6. Шумовая карта на фрагменте застройки, значения уровней в точках характерного сечения

В табл. 2 приведены уровни звукового давления L_p , рассчитанные по компьютерной программе на основе стандартной методики, а также подробные результаты расчета уровней шума по приближенному выражению (6) на основе средних коэффициентов прохождения шума по выражению (4).

Т а б л и ц а 2

Уровни шума на территории многорядной застройки, рассчитанные по нормативной L_p и приближенной L_n методикам

R, м	$L_{св},$ дБ	n	Обработка результатов расчета			Принято $\beta=0.23$	
			$L_p,$ дБ	$10^{0.1\Delta L}$	β_p	β/n	L_n
1	2	3	4	5	6	7	8
10	74,8	0	74,6	-	-	-	74,8
20	71,7	0	71,2	-	-	-	71,7
30	70,0	1	67,3	0,540	0,540	0,230	63,6
40	68,7	1	63,9	0,329	0,329	0,230	62,3
50	67,8	1	61,7	0,248	0,248	0,230	61,4
60	67,0	1	60,5	0,225	0,225	0,230	60,6
70	66,3	2	59,9	0,229	0,458	0,115	56,9
80	65,7	2	58,5	0,190	0,379	0,115	56,3
90	65,2	2	56,3	0,129	0,257	0,115	55,8

1	2	3	4	5	6	7	8
100	64,8	2	55,3	0,113	0,227	0,115	55,4
110	64,3	3	53,9	0,090	0,271	0,077	53,2
120	64,0	3	54,1	0,103	0,310	0,077	52,8
130	63,6	3	53,4	0,095	0,286	0,077	52,5
140	63,3	3	49,8	0,045	0,134	0,077	52,1
150	63,0	3	49,3	0,043	0,128	0,077	51,8

Обозначения: R – расстояние от дороги до расчетной точки; $L_{св}$ – уровни шума в свободном поле; L_p , L_n – уровни шума по нормативной и приближенной методикам; n – количество рядов застройки между дорогой и расчетной точкой.

На рис. 7 также представлены графики для сравнения уровней звука, рассчитанных по двум методикам. Степень совпадения результатов высокая. Наибольшее расхождение (до 4 дБ) наблюдается в просветах между зданиями. Компьютерный расчет показывает плавное изменение уровней, когда здания следующего эшелона застройки начинают загромождать часть дороги. Приближенный расчет приводит к резкому изменению уровней, когда на определенном расстоянии встречается следующий ряд зданий эшелона застройки. Однако такие локальные расхождения результатов не влияют на общую тенденцию изменений шумового режима застройки. Расхождения в большинстве расчетных точек не превышают 2,0 дБ, что соответствует требованиям, предъявляемым к инженерным акустическим расчетам.

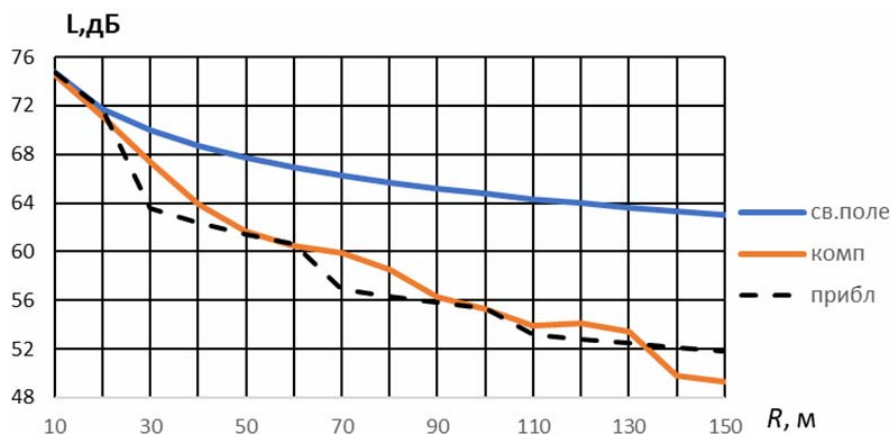


Рис. 7. Уровни шума на свободной территории и при наличии многорядной застройки (см. рис. 6), рассчитанные по стандартной методике и по приближенному выражению (6)

Выводы

1. Выполнено исследование шумовых полей от автодороги на примагистральной территории при наличии малоэтажной однорядной и многорядной застройки с различными геометрическими параметрами.

2. Обоснована возможность упрощенного расчета энергетических характеристик шума с использованием коэффициента прохождения звука через застройку. На основе статистической обработки результатов компьютерного моделирования получено аналитическое выражение коэффициента прохождения звука.

3. Предложен инженерный метод расчета прямого шума от автодороги на территории с нерегулярной малоэтажной застройкой. Погрешность расчетов транспортного шума между точным и инженерным методами не превышает 2 дБ.

4. Разработанный метод расчета транспортного шума, распространяющегося на малоэтажной примагистральной территории, позволит проектировщикам быстро выполнять расчет энергетических параметров звукового поля, оценивать влияние различных

параметров застройки на шумовой режим и, соответственно, проектировать эффективные мероприятия шумозащиты.

Список литературы

1. СП 276.1325800.2016. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков. – М.: Минстрой России, 2016.
2. Овсянников, С.Н. Автоматизированный расчет и построение цифровых карт акустического загрязнения примагистральных территорий городов / С.Н. Овсянников, М.С. Овсянников // Вестник ТГАСУ. – 2011. – № 3. – С. 108–115.
3. Бенов, Д.М. Автоматизация вычислений в акустике городской среды / Д.М. Бенов, Н.Д. Николов, И.Л. Шубин, М.Г. Маждраков // Жилищное строительство. – 2015. – № 6. – С. 23–26.
4. Бугарев, Е.А. Снижение шума, распространяемого на местности / Е.А. Бугарев, С.А. Айрбабамян // Образование. Наука. Научные кадры. – 2013. – № 3. – С. 125–131.

References

1. SP 276.1325800.2016. Buildings and territories. Protection design rules from traffic noise. – M.: Gosstroy of Russia, 2016.
2. Ovsyannikov, S.N. Automated calculation and construction of digital maps of acoustic pollution of the near highway territories of cities / S.N. Ovsyannikov, M.S. Ovsyannikov // Vestnik TSASU. – 2011. – №3. – P. 108–115.
3. Benov, D.M. Automation of calculations in the acoustics of the urban environment / D.M. Benov, N.D. Nikolov, I.L. Shubin, M.G. Mazhdrakov // Housing construction. – 2015. – № 6. – P. 23–26.
4. Bugarev, E.A. Reduction of noise distributed in the area / E.A. Bugarev, S.A. Airbabamyam // Education. The science. Scientific personnel. – 2013. – № 3. – P. 125–131.

УДК 72

DOI 10.54734/20722958_2022_2_175

*Петрозаводский государственный университет*Россия, 185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33,
тел.: (8142) 78 51-40**Макаревич Елена Александровна**,
магистрант кафедры «Технология
и организация строительства»
E-mail: elena.elmakar@ya.ru**Селютина Любовь Федоровна**,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства»
E-mail: selutinalf@mail.ru*Petrozavodsk State University*Russia, 185910, Petrozavodsk, 33,
Lenin Avenue
tel.: (8142) 78 51-40**Makarevich Elena Aleksandrovna**,
Master's degree student of the department
«Technology and Organization of
Construction»
E-mail: elena.elmakar@ya.ru**Selutina Lyubov Fedorovna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technology and
Organization of Construction»
E-mail: selutinalf@mail.ru

ОБЪЕКТ ИСТОРИИ АРХИТЕКТУРЫ И КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: ЧАСОВНЯ НИКОЛАЯ ЧУДОТВОРЦА В МЕЛОЙГУБЕ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

Е.А. Макаревич, Л.Ф. Селютина

Представлены результаты исследования часовни Николая Чудотворца в Мелойгубе (республика Карелия) как одного из немногих сохранившихся до наших дней памятников деревянного зодчества Русского Севера, построенных на рубеже XVII и XVIII веков. Объект исследования является важным материальным свидетельством истории этноархитектуры и культуры Заонежья, отражая особенности культового деревянного зодчества на территории Русского Севера в XVIII и XIX веках.

В ходе научной экспедиции получены новые данные о состоянии объекта и его истории. Также результатом исследования стало привлечение внимания к необходимости сохранения данного объекта истории архитектуры и культурного наследия, что проявляется в участии добровольцев в мероприятиях по восстановлению часовни Николая Чудотворца в Мелойгубе.

Ключевые слова: региональная архитектура, Заонежье, Русский Север, русское деревянное зодчество, деревянные церкви и часовни

THE OBJECT OF THE HISTORY OF ARCHITECTURE AND CULTURAL HERITAGE: THE CHAPEL OF ST. NICHOLAS THE WONDERWORKER IN MELOYGUBA (REPUBLIC OF KARELIA)

Е.А. Makarevich, L.F. Selutina

The article presents the results of the study of the chapel of St. Nicholas in Meloiguba as one of the few surviving monuments of wooden architecture of the Russian North, built at the turn of the XVII and XVIII centuries. The object of the study is an important material evidence of the history of the ethnoarchitecture and culture of the Zaonezhye region, reflecting the features of the cult wooden architecture in the territory of the Russian North in the XVIII and XIX centuries. The purpose of the work is to obtain new data on the state of the object and its history during the scientific expedition, to introduce this data into scientific circulation by publishing them and to draw attention to the need to preserve this object of architectural history and cultural heritage. Such objects continue to perform their social functions, which is manifested in the participation of volunteers in the restoration of the chapel of St. Nicholas in Meloiguba.

Keywords: regional architecture, Zaonezhye, Russian North, Russian wooden architecture, wooden churches and chapels

Введение

Часовня Святителя Николая находится в урочище Мелойгуба в Заонежье. Заонежье, земля «за Онегой» – это довольно обширный полуостров, окруженный многочисленными островами и заливами. В результате взаимовлияния прибалтийско-финской и славянской культур здесь сформировалась особая локальная этническая группа, которая носит название «русские Заонежья». Сами же жители этих мест называют себя «заонежана». Заонежье стало крупнейшим очагом новгородской культуры на Севере, здесь сохранились ценнейшие образцы культурного наследия Средневековой Руси, такие, как былинный эпос, традиции храмостроения и писания икон. В то же время жители Заонежья сохранили и традиции своих прибалтийско-финских предков.

По своему географическому расположению и историко-культурным особенностям Заонежье, как и всю Карелию, относят к территории Русского Севера. Русским Севером называют обширную территорию от междуречья Волги и Сухоны до Белого и Печорского морей, простирающуюся от контактной зоны русских с карелами на западе до контактной зоны русских с народами коми на востоке. Территория Русского Севера включает в себя Республику Карелия, Архангельскую, Вологодскую, Костромскую, Мурманскую и Ярославскую области, Республику Коми и Ненецкий автономный округ. Это земли, которые находятся по берегам рек Северная Двина, Онега, Мезень, Печора, в окрестностях озер Онежского и Белого и вдоль берегов множества других больших и малых рек и озер.

Понятие «Русский Север»

Понятие «Русский Север» имеет не столько географическое, сколько культурное и историческое значение. Большая часть населения этих краев – русские и именно здесь «традиции русской культуры сохранились в своей первозданной чистоте» [1]. Русские начали осваивать в эти земли с XI века, переселяясь сюда из новгородских и ростово-суздальских земель. Двигаясь по водным путям, они основывали свои поселения по берегам рек и озер и мирно сосуществовали с коренным населением этих краев.

Русский Север – это особый регион, который исследователи называют заповедником русской народной культуры. Академик Д.С. Лихачев так писал о Русском Севере: «Самое главное, чем Север не может не тронуть сердце каждого русского человека, – это то, что он самый русский. Он не только душевно русский тем, что сыграл выдающую роль в русской культуре, он спас нам от забвения русские былины, русские старинные обычаи, русскую деревянную архитектуру...» [2]. Осваивая северные территории, русские принесли сюда народные традиции своего народа и благодаря историческим условиям своего существования сохранили до наших дней те исконные традиции русской культуры, которые являются истоками нашей национальной самоидентичности. Это особенности русского языка, которые давно исчезли в других частях России, это обычаи и обряды, былинные и песенные традиции, традиции строительства из дерева и писания икон, народные промыслы.

Благодаря сохранившимся на Русском Севере уникальным образцам русского деревянного зодчества существует возможность изучать «одно из наиболее значительных и выдающихся проявлений художественной и строительной культуры русского народа» [1]. Ополовников А.В. говорил о деревянном зодчестве Руси как о народном зодчестве: русское деревянное зодчество – это воплощение в формах архитектуры эстетических идеалов народа, его духовных и материальных потребностей [1]. Русские испокон веков строили свои поселения и города, крепости, церкви, дома и хозяйственные постройки из дерева, и благодаря сохранившимся на Русском Севере образцам деревянной архитектуры мы можем познакомиться с уникальной культурой строительства из дерева, уходящей своими корнями в глубину веков.

«Страной зодчих» назвал Россию художник и реставратор, исследователь русского деревянного зодчества Игорь Эммануилович Грабарь [3]. Выработанные в результате многовекового опыта строительства из дерева приемы и формы русского плотницкого искусства рождались из особенностей древесины как строительного материала, а

также из возможностей инструмента. Основным инструментом плотника на протяжении всей истории развития деревянного зодчества был топор, а деревянные постройки вплоть до петровской эпохи не строились, а рубились. Не случайно плотников в то время именовали «рубленниками». И все многообразие деревянных построек создавалось с помощью одного и того же инструмента и практически одними и теми же приемами, которые составляют сейчас великую народную культуру строительства из дерева.

Часовня Святителя Николая Чудотворца как памятник архитектуры

Часовня Святителя Николая Чудотворца находится в урочище Мелойгуба в одноименном заливе на востоке Уницкой губы Онежского озера. В документах разного времени встречаются следующие варианты названия поселения на берегу этого залива: Милой губа, Милыя губа, Малая губа, Мела-губа и Мелой Губа. Когда-то здесь находился важный пункт древнего пути из Присвирья через Заонежье в Беломорье. По одной из версий название происходит от вепского слова *mela* – «весло». Это могло быть связано с тем, что здесь заканчивался пеший участок маршрута и начинался водный, гребной этап. Мелойгуба впервые упоминается в писцовых книгах Обонежской пятины – на пятины в те времена делились Новгородские земли. Деревня впервые упоминается в писцовых книгах Обонежской пятины в 1563 году [4]. Известно, что в 1696 году в Мелойгубе насчитывалось 5 крестьянских домов, спустя столетие в 1795 году население деревни составляло 29 человек. В 1905 году в деревне насчитывалось 10 крестьянских домов, в которых проживало 12 семей, состоявших из 64 человек (рис. 1). По данным переписи 1933 года население деревни составляло 38 мужчин и 36 женщин, и указана их национальность: все русские.



Рис. 1. На восточном берегу Уницкой губы Онежского озера
(источник: https://obsheedelo.ru/sites/default/files/styles/object_full/public/2021-11/vid-iz-meloy-guby-na-kokorin-ostrov.jpg?itok=ByeJtqcz)

Еще в 1985 году деревня была жилой, от деревни Уница сюда вела дорога. Через протоки, соединяющие внутренние озера с Онежским озером, были построены два моста. Сейчас деревня, просуществовав более четырех столетий, заброшена и пустует. Мосты разрушены, а добраться сюда можно только водным путем из Уницы по Уницкой губе Онежского озера.

Деревянная часовня Святителя Николая Чудотворца была срублена в конце XVII века в виде клетской часовни на высоком подклете и состояла из более высокого сруба основного помещения с повалами, низкой бесповальной трапезной и развитого крыльца. Стены часовни бревенчатые из сосны, рубленные «в обло» – так называется древнейший тип углового соединения бревен в срубе, представляющего собой круглую чашу с выходящими из угла концами бревен.

Сегодня исследователи памятников архитектуры обладают большим количеством практических и научных данных. Опираясь на опыт предыдущих исследований, при изучении часовни в современных условиях был использован комплексный подход [5, 6]. Методы, направленные на сохранение часовни, были определены на основании изучения состояния конструкций часовни с учетом влияния окружающей среды [7].

Современный облик часовни (рис. 2, 3) формировался в течение более двух столетий: этот путь преобразования клетской часовни в часовню с высокой колокольной и сенями с крыльцом или галереей прошли многие часовни на Русском Севере.



Рис. 2. Часовня Николая Чудотворца, начало 2000-х гг.
(источник: <https://pics.photographer.ru/nonstop/pics/pictures/971/971286.jpg>)

О времени строительства часовни стало известно по обнаруженной на тяблах иконостаса надписи: «Поставлена сия часовня во имя Николы Чюдотворца лета 7201-года мца майя въ 3 день. Построилъ сию часовню рабъ Бжій Іоаннъ Софронътевъ сын Шестаковъ. Поновлена тысяща семсотъ двадесятаго году марта 4 день». Из этой надписи мы узнаем год постройки часовни – 1693-й – и год поновления часовни – 1720-й.

Академик архитектуры В.П. Орфинский, обследуя сруб часовни, так охарактеризовал произошедшие в начале XVIII века поновления [8]: «Судя по следам, первоначально храм имел волоковые окна, неотесанные в интерьере стены и простейший иконостас в виде полки для икон, но уже вскоре после постройки, в 1720 году, подвергся реконструкции, при которой была выполнена отеска стен, увеличены оконные проемы и устроен двухрядный тябловый иконостас без деисуса, генетически восходящий к одному из древних типов оформления алтарных преград в церкви». Характерные зарубки на срубе свидетельствуют, что первоначальная кровля была выполнена по безгвоздевому типу «по курицам и потокам».



Рис. 3. Часовня в марте 1944 года, фотография Л. Петтерссона
(источник: https://obsheedelo.ru/sites/default/files/styles/object_full/public/2021-11/meloy-guba.-fotografiya-1944goda.jpg?itok=1eFXNoRA)

В конце XVIII века произошла следующая реконструкция часовни, при которой вместо разобранного крыльца пристроили сени с высокой колокольной над ними, представляющей из себя восьмерик с повалами, покрытый шатром на восьми столбах (рис. 4). Трапезную надстроили под общую крышу с моельным помещением, оставив потолки на прежнем уровне, тем самым придав равновысокость наружному объему сооружения с разновысоким интерьером, что В.П. Орфинский связывает с влиянием на народную деревянную архитектуру архитектуры профессиональной [9].

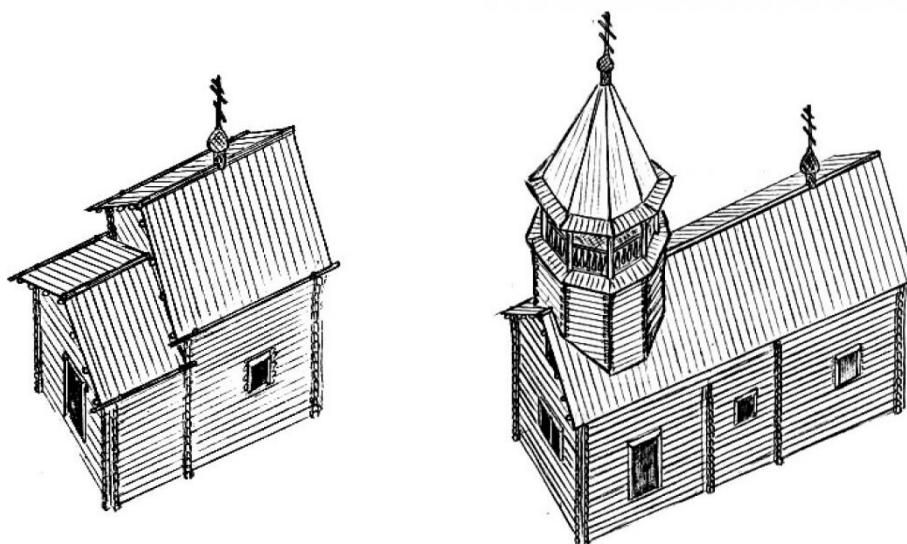


Рис. 4. Часовня в первый (конец XVII века) и второй (конец XVIII века) строительные периоды
(источник: https://obsheedelo.ru/sites/default/files/styles/object_full/public/2021-11/2-y-stroitelnyy-period.jpg?itok=lqenp9z6)

Третья реконструкция Никольской часовни произошла в 1890–1895 гг. В этот период с южной стороны перпендикулярно основному объёму часовни были пристроены сени в виде крытого крыльца, часовня была обшита тёсом с калёвкой по нижнему краю в горизонтальном направлении, а углы дополнительно зашиты тёсом вертикально с калёвкой по внешней стороне. Площадь основного помещения в этот последний строительный период была расширена за счёт трапезной благодаря растёске западной стены молельного помещения, при этом внутренние стены также были обшиты. Кровли, шатер и три луковичных главки с барабанами (над основным объёмом часовни, над шатром колокольни и над сенями-крыльцом), вероятно, в это же время были покрыты железом. Под свесами кровли, а также на северной и восточной стенах часовни сохранились остатки краски светло-серого, почти белого, цвета по которым можно судить, что часовня снаружи была покрашена по обшивке. Часовня была украшена резными декоративными элементами, из которых до настоящего времени сохранились только причелины и элементы подзора на колокольне.

Когда-то часовня имела богатое внутреннее убранство, в ней находился ордерный иконостас, иконы «неба» (особый способ размещения икон на потолке деревянного храма), состоящие из шестнадцати клиновидной формы икон, окружающих центральную круглую икону-медальон, а также расписные резные элементы. Иконы из Никольской часовни были вывезены этнографическими экспедициями в 1962 и 1970 годах и хранятся в фондах Музея изобразительных искусств Республики Карелия, а также частично в фондах Государственного музея-заповедника «Кижи». Клиновидные иконы неба (рис. 5) были вывезены из часовни экспедицией музея «Кижи» в 1970 году и хранятся в фондах музея.



Рис. 5. Клиновидная икона неба

(источник: https://obsheedelo.ru/sites/default/files/styles/object_full/public/2021-11/ikona-iz-nebes-1.png?itok=aRMMyQIic)

Часовня Николая Чудотворца, так же, как и многие другие деревянные церкви и часовни Русского Севера, постепенно ветшала в забытой людьми, заброшенной деревне. Ее ждала судьба множества других памятников деревянной архитектуры, которые были навсегда утрачены в последнее столетие истории нашей страны.

Но в 2021 году в ходе экспедиции волонтерского проекта «Общее дело. Возрождение деревянных храмов Севера» на часовне Николая Чудотворца были проведены консервационные работы. Был укреплен фундамент: установлены фундаментные тум-

бы, устроены водосточные каналы, а также устранен перекося юго-западного угла молельной части. Воссоздана часть обшивки на южной стене часовни, окрашена металлическая кровля, а утраченные части металлической кровли и сегмент основной главки восстановлены. Устранены протечки на ярусе звона. Также был изготовлен и заменен накренившийся крест на колокольне (рис. 6, 7).



Рис. 6. Работают волонтеры проекта «Общее дело. Фото Макаревич Е.А.



Рис. 7. Часовня Святителя Николая в 2021 г. Фото Макаревич Е.А.

В ходе экспедиции в часовне был установлен временный иконостас, иконы в который были подобраны после тщательных историко-архивных исследований (рис. 8).



Рис. 8. Иконостас часовни. Фото Макаревич Е.А.

Заключение

В последние годы утрачено значительное количество памятников деревянного зодчества, сохранившихся на Русском Севере и представляющих величайшую ценность как образец исконно русского самобытного искусства строительства из дерева. Возможно, что многие памятники будут утрачены в ближайшее время, если срочно не предпринять усилия по их сохранению. Наблюдения за состоянием деревянных конструкций, проведение защитных мероприятий и ремонтных работ увеличивают срок службы деревянных зданий. Первоочередной задачей, выполнение которой позволит спасти сохранившиеся памятники, исследователи считают их консервацию: проведение противоаварийных работ, в результате которых на объекте деревянного зодчества возможно выполнение реставрационных мероприятий. Опыт ряда стран подтверждает, что сохранение памятников региональной архитектуры является актуальной задачей, которая может быть решена с участием инженеров-строителей, архитекторов, историков и других специалистов, обладающих соответствующими компетенциями, которые подтверждены опытом их работы [10].

Задачу сохранения памятников культурного наследия Русского Севера, деревянных церквей и часовен в настоящее время успешно выполняют волонтеры.

Научным результатом экспедиции по изучению региональных памятников архитектурного наследия, сохранившихся на территории Республики Карелия, является получение и введение в научный оборот новых данных о состоянии часовни, относящихся к памятнику деревянного зодчества в Мелойгубе.

Список литературы

1. Ополовников, А.В. Русский Север. / А.В. Ополовников. – М.: Стройиздат, 1977. – 255 с.
2. Гемп К.П. Сказ о Беломорье / К.П. Гемп, предисловие Д.С. Лихачева. – Архангельск: Северо-Западное книжное изд-во, 1983. – С.7.

3. Грабарь, И.Э. История русского искусства / И.Э. Грабарь – М.: Изд. И. Кнебель, 1910. – Т.1. – 512 с.
4. Часовня Николая Чудотворца в д. Мелойгуба. – URL: <https://obsheedelo.ru/objects/respublika-kareliya-chasovnya-nikolaya-chudotvorca-v-d-meloyguba>. (дата обращения: 17.02. 2022).
5. Ahmad, Y. The scope and definitions of heritage: From tangible to intangible. *Int. J. Herit. Stud.* 2006, 12, 292–300. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Scope-and-Definitions-of-Heritage>. (дата обращения: 20.03. 2022).
6. Towards a Shared Understanding of the Concept of Heritage in the European Context. – URL: <https://usir.salford.ac.uk/id/eprint>. (дата обращения: 25.03. 2022).
7. Binda, L.; Cardani, G.; Modena, C.; Valluzzi, M.R.; Marchetti, L. Indagine sulla consistenza dell’edilizia storica, sul danno pregresso e sull’efficacia degli interventi svolta su quattro centri campione in Umbria. In *Proceedings of the 9th National Conference on Seismic Engineering in Italy ANIDIS*, Genova, Italy, 25–29 January 2004. – URL: https://www.researchgate.net/publication/314235532_Guidelines_for_restoration_and_improvement_of_historical_centers_in_seismic_regions (дата обращения: 20.03. 2022).
8. Орфинский, В.П. Часовни в традиционной культуре карел / В.П. Орфинский // *Народное зодчество: межвуз. сб.* – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. – С. 93–94.
9. Орфинский, В.П. Архитектурное наследие Заонежья / В.П. Орфинский // *Кижский вестник*. – 1993. – №2. – С.190.
10. Borri, A. Architectural heritage: A discussion on conservation and safety / A. Borri, M. Corradi // *Heritage*. – 2019. – Vol. 2, №. 1. – P. 631-647. – URL: <https://www.mdpi.com/2571-9408/2/1/41/pdf>. (дата обращения: 25.03. 2022).

References

1. Opolovnikov, A.V. *Russian North* / A.V. Opolovnikov. – М.: Stroyizdat, 1977. – 255 p.
2. Gemp, K.P. *The Tale of the White Sea* // K.P. Gemp, Preface D.S. Likhachev. – Arkhangelsk: North-Western Book Publishing House, 1983 – P.7.
3. Grabar, I.E. *History of Russian Art* / I.E. Grabar. – М.: Ed. I Knebel, 1910. – Vol.1. – 512 p.
4. The chapel of St. Nicolas the Wonderworker in the village of Meloiguba. – URL: <https://obsheedelo.ru/objects/respublika-kareliya-chasovnya-nikolaya-chudotvorca-v-d-meloyguba>. (date of access: 17.02.2022).
5. Ahmad, Y. The scope and definitions of heritage: From tangible to intangible. *Int. J. Herit. Stud.* 2006, 12, 292–300. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Scope-and-Definitions-of-Heritage>. (date of access: 20.03.2022).
6. Towards the Shared Understanding of the Concept of Heritage in the European Context. – URL: <https://usir.salford.ac.uk/id/eprint>. (date of access: 25.03.2022).
7. Binda, L.; Cardani, G.; Modena, C.; Valluzzi, M.R.; Marchetti, L. Indagine sulla consistenza dell’edilizia storica, sul danno pregresso e sull’efficacia degli interventi svolta su quattro centri campione in Umbria. In *Proceedings of the 9-th National Conference on Seismic Engineering in Italy ANIDIS*, Genova, Italy, 25–29 January 2004. – URL: https://www.researchgate.net/publication/314235532_Guidelines_for_restoration_and_improvement_of_historical_centers_in_seismic_regions (date of access: 20.03.2022).
8. Orfinsky, V.P. Chapels in traditional Karelian culture / V.P. Orfinsky // *Folk architecture: mezhvuz. sb.* – Petrozavodsk: Publishing House of PetrSU, 2004. – P. 93–94.
9. Orfinsky, V.P. Architectural heritage of Zaonezhye / V.P. Orfinsky // *Kizhi Bulletin*. – 1993. – No. 2. – P.190.
10. Borri, A. Architectural heritage: discussion on conservation and safety / A. Borri, M. Corradi // *Heritage*. – 2019. – Vol. 2, №. 1. – P. 631-647. – URL: <https://www.mdpi.com/2571-9408/2/1/41/pdf>. (дата обращения: 25.03. 2022).

УДК 72.04+69.01

DOI 10.54734/20722958_2022_2_184

Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова
Россия, 455000, г. Магнитогорск,
Челябинской обл., пр. Ленина, 38 (3519)
20-59-05

Чикота Сергей Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Проектирование зданий
и строительных конструкций», почетный
работник высшего профессионального
образования Российской Федерации
E-mail: s.chikota@magtu.ru

Magnitogorsk State Technical University
named after G.I. Nosov
Russia, 455000, Magnitogorsk, Chelyabinsk
region., Lenin Ave., 38 (3519) 20-59-05

Chikota Sergey Ivanovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Design of Buildings and
Building Structures», Honorary Worker of
Higher Professional Education of the Russian
Federation
E-mail: s.chikota@magtu.ru

ЛЕПНОЙ ДЕКОР ФАСАДОВ ЗДАНИЙ СОВЕТСКОГО ПЕРИОДА ГОРОДА МАГНИТОГОРСКА

С.И. Чикота

На примере сталинской архитектуры города Магнитогорска рассматриваются различия в декорировании фасадов лепными деталями в довоенный и послевоенный периоды середины XX века. Оценивается современное состояние элементов лепного декора, и предлагаются мероприятия, направленные на сохранение своеобразного социалистического архитектурного наследия города.

Ключевые слова: архитектурные детали, лепнина, фасады зданий, советская архитектура, реставрация зданий

STUCCO DECOR OF FACADES OF SOVIET-ERA BUILDINGS IN MAGNITOGORSK

S.I. Chikota

By the example of Stalin's architecture of the city of Magnitogorsk the differences in decorating facades with stucco elements in the pre-war and post-war periods of the middle of the twentieth century are examined. The current state of elements of a stucco decoration is estimated and the actions directed on preservation of the original architectural heritage of a socialist city are offered.

Key words: architectural details, stucco molding, building facades, Soviet architecture, building restoration

Введение. Город Магнитогорск — одна из значительных экспериментальных площадок градостроительства, где в советский период тестировались новые градостроительные идеи.

Архитектура города получила известность именно благодаря оригинальным градостроительным конкурсным разработкам 1929–30-х годов, к которым относятся *дезурбанистическая* схема планировки города-дороги М. Барща, В. Владимирова, М. Охитовича и Н. Соколова [1], *урбанистические* принципы планировки Р. Бриллинга, В. Семёнова, а также Н. Милютина [2]. В 1930 г. практическая разработка генерального плана Магнитогорска была поручена «Гипрогору», а рабочую комиссию возглавил архитектор С. Чернышев, в составе проектной группы которого активно работал немецкий архитектор Э. Май. В начальный период проектирования и строительства Магнитогорска ведущим архитектурным стилем в Советском Союзе оставался конструктивизм.

Декорирование фасадов в довоенный период. Первый этап сталинской архитектуры начинается с 1932 года — это период становления нового стиля. В это время начался процесс поисков новой образности в архитектуре, что проявилось в декориро-

вании конструктивистских проектов на стадии их практической реализации [3]. Новый стиль в архитектуре получает название постконструктивизм, или советский ар-деко [4].

Уже к концу 1930-х годов на смену простоте конструктивизма приходят неоклассические архитектурные формы (рис. 1). В моду входит лепной декор, псевдоклассические ордера, гигантомания и богатое убранство зданий.



Рис. 1. Декор общественных зданий довоенного периода:
а – заводская лаборатория ММК (арх. Ф. Ялов, 1936 г.);
б – Центральная сберегательная касса (1930-е годы)

В конце 1933 года принято постановление правительства о переносе жилищного строительства г. Магнитогорска подальше от промплощадки – с левого на правый берег р. Урал. И в 1934 году Ленинградское отделение «Горстройпроект» (архитектор Б. Данчич, инженер В. Попов) представило новый проект планировки г. Магнитогорска. Строительство на площадке в правобережной части реки Урал началась в 1940 году [5]. В этот период для декорирования фасадов зданий использовались архитектурные детали, отличающиеся строгой геометрией (рис. 2).



Рис. 2. Декор жилого дома по проспекту Ленина, 15
(арх. А. Дубинин, А. Амфилохийев, 1945 г.)

На рубеже 1941–42 годов в строительно-монтажном тресте «Магнитострой» создается лепное хозяйство и формируются три бригады лепщиков. В бригадах работали люди без специального образования. Изготовление лепных деталей осуществлялось по следующей технологии. Графическими средствами создавались эскизы, затем из глины вылепливалась модель декоративной детали, а из формопласта отливалась форма. Формопласт состоял из полихлорвиниловой смолы (20 %), дибутилфталата (76 %) с добавлением стеарата кальция (2 %) и жирных шклов (2 %) [6]. В основном лепнину делали из цемента и только под венчающими карнизами – из гипса. Материалом для цементных деталей служила смесь цемента и мелкого заполнителя в виде песка, гравия или щебня с водой. Для повышения пластичности раствора в него добавлялась известь или другой пластификатор. Раскрытие форм при отливках из цементного пластичного раствора производилось через 1–2 дня. Затем изделия выдерживались во влажных условиях в течение 8–10 дней. Гипсовые детали изготавливались из

гипсового теста с добавлением пакли, пеньки или вымоченной дранки. При массовой отливке деталей из гипса лепщик работал с 10–15 формами при изготовлении мелких деталей и 2–5 формами при изготовлении крупных деталей, таких, как капители, кронштейны, пазы. Чтобы готовое изделие без труда вынималось, внутреннюю поверхность форм смазывали автолом, тавотом или мыльной суспензией. В холодное время года бригады работали над отделкой интерьеров внутри зданий.

Рисунки декоративных деталей, сделанные архитекторами, были меньше их натуральной величины, что создавало лепщикам определенные трудности в процессе формирования увеличенных моделей. Квалификация работников лепного хозяйства треста «Магнитострой» вряд ли позволяла им справиться с работами по созданию сложных горельефов и скульптур, в композиции которых присутствовали изображения людей. Так как проектирование архитектурных объектов осуществляли ленинградские архитекторы, то можно предположить, что изготовление сложного лепного декора могло производиться в гипсоформовочной мастерской Академии художеств СССР, размещавшейся также в Ленинграде [7].

«Сталинский ампи́р» послевоенного периода. Переломным в застройке правобережной части города стал 1947 г. Новый проект планировки и застройки Магнитогорска способствовал формированию композиционно цельного селитебного образования. Генплан 1947 г. предусматривал в основном (60 %) малоэтажную (2–3 этажа) застройку города и только частично (20 %) – многоэтажную (4–5 этажей). Жилищное строительство послевоенного периода характеризуется переходом к комплексному возведению кварталов и стремлением к типизации [8]. Необходимость обеспечения людей жилищем в короткие сроки привела к ограничению количества применяемых типов домов, жилых секций и конструктивных решений. Проектирование жилых зданий велось на основе блок-секционного метода. Планировочные решения блок-секций и квартир представляли собой ограниченное количество типов [9]. Внешнее разнообразие зданий обеспечивалось различной пластикой фасадов и лепным барельефным декором.

Второй послевоенный этап сталинской архитектуры характеризуется появлением уже более конкретных признаков «сталинского ампира». В архитектурных образах этого периода смешались элементы классицизма, барокко и ар-деко. Стены представлялись максимально нерасчлененными плоскостями, а точечный лепной декор усиливал это впечатление. Барельефные композиции и скульптуры располагались в простых по форме нишах [10]. Архитектурное декорирование было призвано вызвать у советского человека чувство величия, гордости и восхищения, а лепное убранство придавало зданиям праздничность, пышность и особый размах.

В правобережной части города особенно богатое декоративное убранство получили здания, построенные по проектам ленинградских архитекторов на проспекте Металлургов. Оценивая архитектурный лепной декор фасадов зданий города Магнитогорска сталинского периода, можно отметить его основные отличительные черты:

- декорирование фасадов барельефами в виде советской символики (рис. 3);
- имитация кладки из природного камня (рис. 4,а);
- композиции из растительных форм (рис. 4, б,в);
- размещение на фронтонах, нишах и медальонах горельефных и скульптурных изображений людей и сцен созидательного труда и отдыха (рис. 5);
- активное использование элементов архитектурных ордеров (рис. 6).

Среди барельефных изображений советской символики в первую очередь представлены такие символы, как звезда, серп и молот [11]. В символике пятиконечная звезда рядом с серпом и молотом означала единение трудящихся пяти континентов. Молот – один из старейших символов ремесла. Серп – эмблема крестьянства. Серп и молот традиционно изображаются скрещенными. Образы щитов, картушей, флагов, лент и венков символизировали гордость за недавнюю победу в битве с фашизмом. Изображение снопов и колосьев хлеба, ваз с фруктами и рогов изобилия объясняется тем, что подобные символы были призваны олицетворять небывалые успехи экономики первого в мире государства рабочих и крестьян, подчеркивать сытость и благополучие граждан СССР.

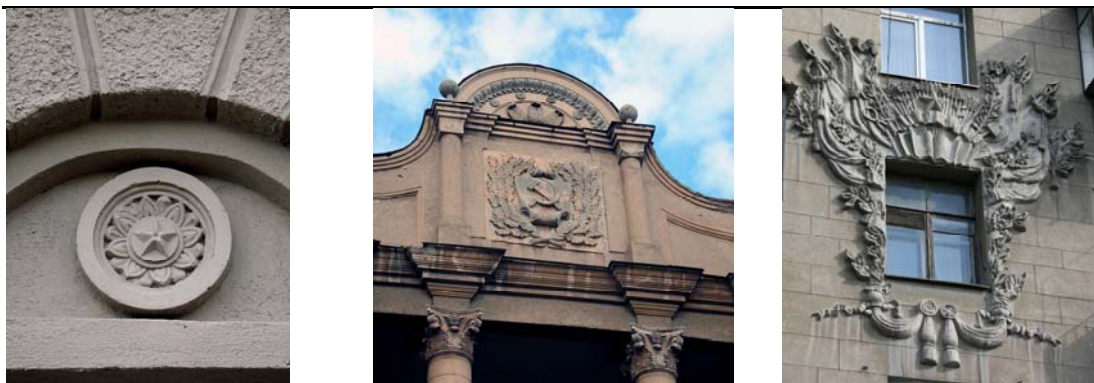


Рис. 3. Лепной декор с советской символикой



Рис. 4. Лепная имитация природного камня (а) и растительных форм (б, в)



Рис. 5. Скульптурные (а, б) и горельефные (в) изображения людей на фасадах



Рис. 6. Ордерные композиции в архитектуре жилых зданий

Что касается архитектурных ордеров и их отдельных элементов, то они использовались в оформлении входных портиков, арок и пропилеев, фронтонов, карнизов, зрительного обогащения плоскостей стен и имитации поддержки эркеров (рис. 7).



Рис. 7. Архитектурные ордера арки (а), пропилеев (б) и эркера (в)

Лепной декор в виде имитации кладки из природного камня можно встретить не часто, так как предпочтение все же отдавалось технологии имитации рустовки при штукатурке фасадов.

В начальный период внедрения полносборного домостроения [12] лепной декор еще был востребован, но использовался менее активно. А в 1956 году в период выполнения постановления КПСС «Об устранении излишеств в проектировании и строительстве» [13] лепное хозяйство треста «Магнитострой» было ликвидировано.

Современное состояние лепного декора. В исследованиях по видеоэкологии городской среды отмечается, что использование лепного декора на фасадах зданий благоприятно сказалось на восприятии застройки [14, 15]. Стиль неоклассицизма в архитектуре Магнитогорска, характеризующийся обилием и разнообразием архитектурных деталей, элементов декора, создает насыщенный эмоциональный фон в восприятии [16]. Такая архитектура содержит необходимые функциональные элементы, составляющие основу комфортной визуальной среды, обеспечивающей полноценную работу глаз.

За прошедшие три четверти века лепные детали многих зданий либо утрачены, либо подверглись физическому износу. Физическое состояние лепного декора характеризуется следующими недостатками (рис. 8):

- искажение внешнего вида напластованиями краски различного цвета, цементного раствора и штукатурки;
- повреждение поверхности трещинами;
- утрата отдельных фрагментов в результате выветривания и механических повреждений.

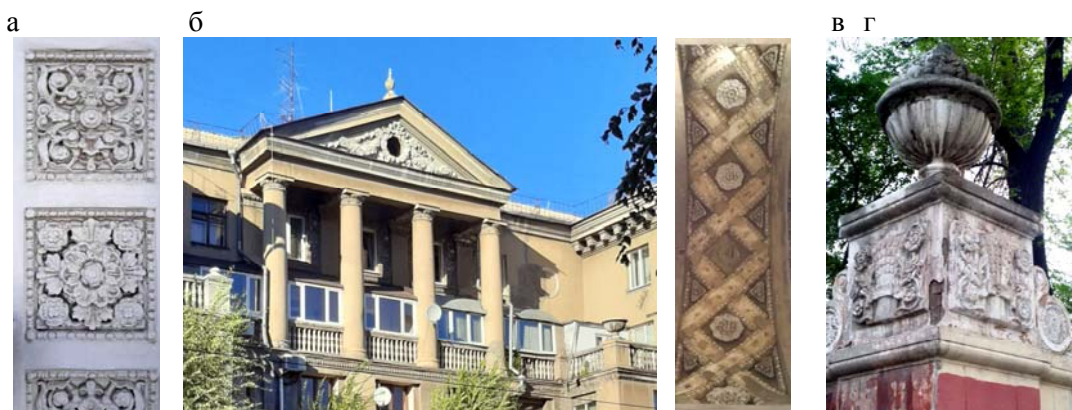


Рис. 8. Дефекты лепного декора:

- а – напластования краски; б – утрата вазона слева; в – утрата центральной розетки;
г – выветривание

Косметические ремонты не могут в полной мере решить проблему сохранения декоративных элементов, а только усугубляют ситуацию непрофессиональными дей-

ствиями неподготовленных рабочих. С каждым годом все острее обозначается проблема проведения реставрационных работ.

На самом деле отношение к декоративному лепному убранству зданий «сталинского ампира» далеко не однозначное. По сути, в провинциальном городе лепной декор представляет собой наивную и, пожалуй, даже бутафорскую попытку создать некую иллюзию помпезными архитектурными образами из простых и недолговечных материалов. С 1947 года минуло уже почти 75 лет, что составляет не менее 75 % от нормативной долговечности изделий из цементно-песчаного раствора [17]. С каждым годом вопрос об остаточном ресурсе лепных декораций фасадов становится все острее.

Одна из центральных проблем отношения к архитектуре XX века – это взаимоотношение современных тенденций и культурного наследия. К сожалению, нередко случаи, когда уничтожение лепного декора производится сознательно [18, 19]. Так, в Магнитогорске при строительстве подземных гаражей уничтожены ограда, опоры и порталы входов на территорию гимназии № 53 со стороны ул. Калинина, которые входили в ансамбль группы общественных зданий. При благоустройстве сквера по ул. Чапаева оригинальные исторические вазоны были заменены новыми изделиями, выполненными в современном стиле. Демонтировано полностью здание первого в городе кинотеатра «Магнит» вблизи главной проходной на территорию ММК. Такая же участь, скорее всего, ожидает и здание Дворца культуры калибровщиков (рис. 5, а, б), находящееся вблизи главной проходной калибровочного завода. Произведены перестройки интерьеров Главпочтамта и бывшего кинотеатра им. Горького, и в результате уничтожены их первоначальные своеобразные образы.

К положительным тенденциям можно отнести имеющие место, правда, пока что немногочисленные, примеры качественного выполнения ремонтно-восстановительных работ. Так, пропилен входа на территорию школы № 55 по улице Ленинградской предварительно были очищены от старых слоев краски, а затем заново окрашены, что позволило раскрыть первоначальную пластику лепных деталей и предотвратить их разрушение (рис. 8, б).

Выводы. В сложившейся ситуации для сохранения своеобразного архитектурного наследия социалистического города необходимо:

- произвести паспортизацию архитектурных объектов с целью выявления объектов, достойных войти в систему опорной исторической застройки этого периода;
- создать в городе реставрационную архитектурную мастерскую, ориентированную на сохранение архитектурного наследия;
- наладить профессиональное изготовление утраченных фрагментов лепного декора;
- применять в практике реставрационных работ современные материалы, например экструзионный пенополистирол;
- использовать при реставрации новые возможности, которые открывает технология 3D-печати.

Список литературы

1. Былинкин, Н.П. История советской архитектуры (1917–1954 гг.) / Н.П. Былинкин, В.Н. Калмыкова, А.В. Рябушин, Г.В. Сергеева. – М.: Стройиздат, 1985. – 256 с.
2. Рябушин, А.В. Советская архитектура / А.В. Рябушин, И.В. Шишкина. – М.: Стройиздат, 1984. – 216 с.
3. Хмельницкий, Д. Архитектор Николай Милютин / Д. Хмельницкий, Е. Милютин. – М.: Новое литературное обозрение, 2013. – 504 с.
4. Хан-Магомедов, С.О. Архитектура советского авангарда: в 2 кн. Кн.1: Проблемы формообразования. Мастера и течения / С.О. Хан-Магомедов. – М.: Стройиздат, 1996. – 709 с.
5. Казаринова, В.И. Магнитогорск / В.И. Казаринова, В.И. Павличенко. – М.: Стройиздат, 1961. – 249 с.

6. Лепные работы. – URL: <https://www.masterovoi.ru/lepnye-raboty> (дата обращения: 25.12.2021).
7. Гипсоформовочная мастерская. Историческая справка. – URL: http://rahsrb.ru/ru/masterskaya_gipsa.php (дата обращения: 25.12.2021).
8. Бумажный, Л.О. Магнитогорск / Л.О. Бумажный, М.Г. Морозов. – М.: Госстройиздат, 1958. – 24 с.
9. Антонова, Ю.В. Планировочные решения квартир и моральный износ застройки 1930–1950 годов г. Магнитогорска / Ю.В. Антонова, К.Е. Шахмаева, В.В. Гудовичев, А.В. Раенко, К.С. Борчев, З.У. Саралидзе, С.В. Соколов. // Academy. – 2016. – № 2 (5). – С. 17–26.
10. Сотвори себе дворец // Ремонт и строительство. – 2005. – Март. – URL: <https://lepnostyle.ru/statji-o-lepnine/lepnoj-dekor/sotvori-sebe-dvorec> (дата обращения: 25.12.2021).
11. Голубева, А.В. Советская символика в архитектуре города Магнитогорска / А.В. Голубева, Н.А. Нестерова, С.И. Чикота // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2010. – Т. 2, № 68. – С. 32–35.
12. Варламов, А.А. Новаторский опыт крупнопанельного домостроения в Магнитогорске / А.А. Варламов, В.И. Римшин, С.Ю. Тверской, С.И. Чикота // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 3 (83). – С. 63–71.
13. Постановления КПСС от 4 ноября 1955 года № 1871 «Об устранении излишеств в проектировании и строительстве». – URL: <https://web.archive.org/web/20140716132943/http://sovarch.ru/postanovlenie55/> (дата обращения: 25.12.2021).
14. Филин, В.А. Видеоэкология. Что для глаза хорошо, а что плохо / В.А. Филин. – М.: МЦ «Видеоэкология», 2001. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 25.12.2021).
15. Чикота, С.И. Видеоэкология города Магнитогорска / С.И. Чикота, В.В. Радионова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2009. – № 5 (124). – С. 32–33.
16. Ахмадуллина, Д.Д. Своеобразие архитектуры неоклассицизма в городе Магнитогорске / Д.Д. Ахмадуллина // Архитектон: известия вузов. – 2005. – №2(10). – URL: http://archvuz.ru/2005_2/38 (дата обращения: 25.12.2021).
17. Срок службы конструктивных элементов – URL: https://www.baurum.ru/_library/?cat=build_works&id=649 (дата обращения: 25.12.2021).
18. Смирнов, В. Уникальная архитектура Магнитогорска может исчезнуть / В. Смирнов // Диалог. – 2010. – 22 мая. – С. 3.
19. Мурат, А. Чудом выжившие. Кому нужны гипсовые скульптуры советского периода? / А. Мурат // Аргументы и Факты (АиФ в Туле). – № 43. – 2020. – 21 октября. – URL: https://tula.aif.ru/culture/history/chudom_vyzhivshie_komu_nuzhny_gipsovy_e_skulptury_sovetskogo_perioda (дата обращения: 25.12.2021).

References

1. Bylinkin, N.P. History of Soviet architecture (1917–1954) / N.P. Bylinkin, V.N. Kalmykova, A.V. Ryabushin, G.V. Sergeeva. – М.: Stroyizdat, 1985. – 256 p.
2. Ryabushin, A.V. Soviet architecture / A.V. Ryabushin, I.V. Shishkina. – М.: Stroyizdat, 1984. – 216 p.
3. Khmel'nitsky, D. Architect Nikolay Milyutin / D. Khmel'nitsky, E. Milyutina. – М.: New Literary Review, 2013. – 504 p.
4. Khan-Magomedov, S.O. Architecture of Soviet avant-garde: in 2 books. Book 1: Problems of shaping. Masters and currents / S.O. Khan-Magomedov. – М.: Stroyizdat, 1996. – 709 p.
5. Kazarinova, V.I. Magnitogorsk / V.I. Kazarinova, V.I. Pavlichenko. – М.: Stroyizdat, 1961. – 249 p.

6. Stucco work. – URL: <https://www.masterovoi.ru/lepnye-raboty> (date of application: 12/25/2021).
7. Gypsum molding workshop. Historical background. – URL: http://rahspsb.ru/ru/masterskaya_gipsa.php (date of address: 12/25/2021).
8. Paper, L.O. Magnitogorsk / L.O. Paper, M.G. Morozov. – M.: Gosstroizdat, 1958. – 24 p.
9. Antonova, Yu.V. Planning solutions of apartments and moral deterioration of buildings of 1930–1950 in Magnitogorsk / Yu.V. Antonova, K.E. Shakhmayeva, V.V. Gudovichev, A.V. Raenko, K.S. Borchev, Z.U. Saralidze, S.V. Sokolov. // Academy. – 2016. – № 2 (5). – P. 17–26.
10. Create a palace for yourself // Repair and construction. – 2005. – March. – URL: <https://lepnostyle.ru/statji-o-lepnine/lepnoj-dekor/sotvori-sebe-dvorec> (accessed: 12/25/2021).
11. Golubeva, A.V. Soviet symbolism in the architecture of the city of Magnitogorsk / A.V. Golubeva, N.A. Nesterova, S.I. Chikota // Actual problems of modern science, technology and education. – 2010. – Vol. 2, No. 68. – P. 32–35.
12. Varlamov, A.A. Innovative experience of large-panel housing construction in Magnitogorsk / A.A. Varlamov, V.I. Rimshin, S.Y. Tverskaya, S.I. Chikota // Construction and reconstruction. – 2019. – № 3 (83). – P. 63–71.
13. Resolution of the CPSU of November 4, 1955 No. 1871 "On the elimination of excesses in design and construction". – URL: <https://web.archive.org/web/20140716132943/http://sovarch.ru/postanovlenie55> / (accessed: 12/25/2021).
14. Filin, V.A. Videoecology. What is good for the eye and what is bad / V.A. Filin. – M.: MC "Videoecology", 2001. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki> / (date of reference: 12/25/2021).
15. Chikota, S.I. Videoecology of the city of Magnitogorsk / S.I. Chikota, V.V. Radionova // Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2009. – № 5 (124). – P. 32–33.
16. Akhmadullina, D.D. The originality of neoclassical architecture in the city of Magnitogorsk / D.D. Akhmadullina // Architecton: izvestiya vuzov. – 2005. – №2(10). – URL: http://archvuz.ru/2005_2/38 (date of reference: 12/25/2021).
17. Service life of structural elements – URL: https://www.baurum.ru/_library/?cat=build_works&id=649 (accessed: 12/25/2021).
18. Smirnov, V. The unique architecture of Magnitogorsk may disappear / V. Smirnov // Dialog. – 2010. – May 22. – p. 3.
19. Murat, A. Miraculously survived. Who needs plaster sculptures of the Soviet period? / A. Murat // Arguments and Facts (AIF in Tula). – No. 43. – 2020. – October 21. – URL: https://tula.aif.ru/culture/history/chudom_vyzhivshie_komu_nuzhny_gipsovyie_sculptury_sovetskogo_perioda (accessed: 12/25/2021).

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Городское
строительство и архитектура»
E-mail: ambereg@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Beregovoy Aleksander Markovich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Urban
Construction and Architecture»
E-mail: ambereg@rambler.ru

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА МИКРОКЛИМАТ И ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПОМЕЩЕНИЙ

А.М. Береговой

Дан анализ влияния на воздухообмен в помещении и экономию тепловой энергии естественной вентиляции и механизма инфильтрации воздуха через наружные ограждения. Показаны их конструктивные схемы, имеющие различную воздухопроницаемость. Выполнена оценка объемов инфильтрующегося воздуха, и проведено их сравнение с нормативным притоком воздуха для жилого помещения. Установлено, что помимо влияния на увеличение воздухообмена помещений наружные ограждения с небольшим сопротивлением воздухопроницанию обеспечивают определенный энергосберегающий эффект.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, воздухопроницаемость, естественная вентиляция, микроклимат помещений, воздухообмен, энергосбережение

INFLUENCE OF AIR PERMEABILITY OF EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES ON MICROCLIMATE AND HEAT LOSSES OF PREMISES

A.M. Beregovoy

The analysis of the effect of natural ventilation and the mechanism of air infiltration through external enclosure structures on indoor air exchange and thermal energy savings is given. The design schemes of these structures with different air permeability are shown. The volume of infiltrating air is estimated and compared with the standard air inflow for residential premises. It was found, that in addition to the effect on the increase in air exchange of premises, external enclosure structures with small resistance to air permeability provide a certain energy-saving effect.

Keywords: external enclosure structures, air permeability, natural ventilation, indoor microclimate, air exchange, energy saving

Исследования показывают, что на формирование комфортных условий микроклимата внутренней воздушной среды зданий, минимизацию расхода энергоресурсов на их отопление значительное влияние оказывает воздухообмен помещений [1–3]. В отопительный период недостаточный приток воздуха приводит к повышению относительной влажности ϕ воздуха помещений, что может значительно ухудшить экологические показатели микроклимата помещений. По данным исследований ученых Бристольского университета (Великобритания), в период пандемии вне зависимости от температуры воздуха при величине $\phi \leq 50\%$ вирус уже в течение 5 с теряет поло-

вину своего потенциала заражения людей, тогда как при $\varphi \geq 90\%$ он даже через 20 мин представляет опасность.

В данной работе дана сравнительная оценка двум факторам, оказывающим влияние на микроклимат и энергосбережение в жилых зданиях: естественной вентиляции и инфильтрации воздуха через наружные ограждающие конструкции.

В зимний период движение холодного и сухого воздуха через приточно-вытяжные отверстия хотя и улучшает экологические показатели воздуха, но в то же время приводит к ухудшению теплового режима помещений. Известно, что на подогрев холодного приточного воздуха может уходить до 50 % тепла, поступающего в помещение из системы отопления:

$$\Delta Q_{\text{вент}} = 0,28 \cdot \Delta w_{\text{вент}} \cdot \gamma_n \cdot c_v \cdot (t_v - t_n). \quad (1)$$

Использование стеновых вентиляционных клапанов позволяет сформировать более надежный процесс воздухообмена помещений и подогрев приточного воздуха, но при этом требуется размещение клапанов в каждом помещении, что приводит к дополнительным материально-техническим затратам на строительство здания.

В процессе инфильтрации через капиллярно-пористую структуру ограждения определенный объем наружного воздуха поступает в помещение при наличии разности давлений воздуха Δp на его поверхностях. Исследование такого физического процесса воздухопроницаемости представляет особый интерес, поскольку, как механизм тепломассопередачи, он обеспечивает определенный эффект энергосбережения за счет противоточного движения потоков инфильтрационного воздуха и уходящего тепла помещения [4].

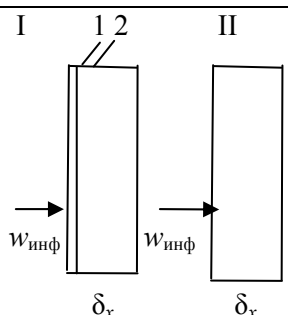
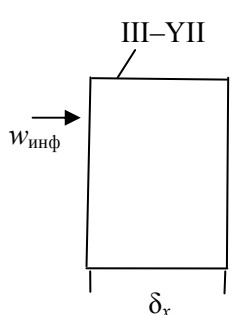
Анализ факторов воздействия на этот механизм тепломассопередачи показал, что помимо показателя Δp влияние на количество инфильтрующегося воздуха $w_{\text{инф}}$ оказывают сопротивление воздухопроницанию R_n конструкции ограждения в соответствии с уравнениями (2)–(3) и порядок расположения в нем конструктивных слоев (табл. 1):

$$w_{\text{инф}} = \Delta p / \sum R_n, \quad (2)$$

$$\Delta p = 0,55H(\gamma_n - \gamma_v) + 0,03\gamma_n v^2. \quad (3)$$

Т а б л и ц а 1

Конструктивные схемы наружных ограждений
с различным сопротивлением воздухопроницанию R_n , $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$

Конструктивные схемы			R_n
А		I – двухслойная конструкция: 1 – плотный наружный слой (штукатурка из цементно-песчаного раствора, $\delta = 15$ мм) 2 – относительно воздухопроницаемый слой II – однослойная конструкция из монолитного автоклавного пенобетона, $\delta = 100$ мм	371 2000
		III – керамзитобетон, $\delta = 25 - 40$ см, $\gamma = 1000$ кг/м ³ IV – шлакопемзобетон V – шлакобетон без швов, $\delta = 30$ см VI – кирпичная кладка ($\delta =$ от 25 см и больше) на цементно-песчаном растворе с использованием сухой штукатурки VII – газосиликат без швов, $\delta = 28$ см	53–80 20,3 42 18 42
Б			

В верхней части (А) табл. 1 показаны примеры конструкций с большой величиной показателя $R_{и}$. В конструктивной схеме I плотный наружный отделочный слой даже при наличии основного относительно воздухопроницаемого материала конструкции значительно уменьшает величину инфильтрационного потока воздуха. Если в капиллярно-пористом материале конструкции мало сквозных пор, то это значительно снижает ее воздухопроницаемость (схема II).

В нижней части (Б) табл. 1 даны примеры конструктивных решений наружных стен с небольшими значениями показателя $R_{и}$ (схемы III–VII). Среди показанных конструкций наибольшую воздухопроницаемость имеет кирпичная кладка из сплошного кирпича на цементно-песчаном растворе.

В табл. 2 приведены результаты расчета количества инфильтрующегося воздуха через 1 м² ограждения, выполненного по конструктивной схеме III, для двух зданий разной этажности при скорости ветра $v = 5,6$ м/с.

Т а б л и ц а 2

Значения величины $w_{инф}$, кг/(м²·ч), ограждений по схемам I–VII для 2- и 12-этажного зданий при $\Delta p = 8,5$ и 45 Па соответственно

Значения $w_{инф}$ для конструктивных схем по таблице 1							
Здания	I	II	III	IV	V	VI	VII
2-этажное	0,023	0,004	0,16–0,11	0,42	0,2	0,47	0,2
12-этажное	0,12	0,023	0,23–0,56	2,22	1,07	2,5	1,07

Показанные в табл. 1 показатели $w_{инф}$ через 1 м² ограждения имеют небольшую величину, однако через всю площадь наружной стены может проникать в помещение достаточно большое количество воздуха $W_{инф}$, в результате при определенных условиях достигается существенный эффект по его воздухообмену (табл.3). Особенно заметен такой эффект при использовании относительно воздухопроницаемых ограждений по схемам IV...VI в здании повышенной этажности. Так, например, количество инфильтрующегося воздуха, проникающего в жилое помещение 12-этажного здания со стенами из кирпичной кладки (схема VI), при принятых исходных данных может составить почти половину от нормативной величины.

Т а б л и ц а 3

Значения $W_{инф}$, кг/ч, через наружную стену ($F = 8,5$ м²) для помещения ($F = 12$ м²) по схемам I–VII и сравнение с нормируемым притоком воздуха в системе естественной вентиляции, %, в жилом здании

Здания	I	II	III	IV	V	VI	VII
2-этажное: $W_{инф}$	0,20	0,03	1,36–0,94	3,57	1,70	4,00	1,70
в % от норматива	0,46	0,07	3,15–2,18	8,26	3,94	9,26	3,94
12-этажное: $W_{инф}$	1,02	0,20	2,0–4,76	18,8	9,10	21,3	9,10
в % от норматива	2,36	0,46	4,63–11,0	43,7	21,1	49,2	21,1

Оценка упомянутого выше эффекта энергосбережения при инфильтрации воздуха через капиллярно-пористый материал наружного ограждения была дана в [4] на основе расчетной модели с использованием уравнений, показывающих величину теплового потока q и температуру t на внутренней поверхности наружного ограждения.

$$q_{и} = \frac{c_{в} \cdot w \cdot e^{c_{в} \cdot w \cdot R}}{e^{c_{в} \cdot w \cdot R_0} - 1} \cdot (t_{в} - t_{н}), \quad (4)$$

$$\tau_{в} = t_{н} + (t_{в} - t_{н}) \cdot \frac{e^{c_{в} \cdot w \cdot R} - 1}{e^{c_{в} \cdot w \cdot R_0} - 1}. \quad (5)$$

В результате исследований была определена величина экономии тепла на обогрев помещения, которая в результате экономайзерного эффекта повышается с уменьшением сопротивления конструкции воздухопроницанию, а также с увеличением

этажности здания. Так, на первом этаже 12-этажного здания этот эффект может составить для конструктивных схем ограждений III и VI соответственно 10 и 13 %, тогда как на цокольном этаже 2-этажного здания он оказался совсем небольшим (например, 3,4 % для конструктивной схемы III).

Таким образом, использование относительно воздухопроницаемых ограждающих конструкций в архитектурно-строительном решении многоэтажного здания позволяет при определенных условиях в холодное время года:

- обеспечивать внутреннюю воздушную среду прогретым вентиляционным воздухом, объем которого может составить до 40 % от требуемого воздухообмена для жилого помещения;
- экономить до 10–13 % тепла, расходуемого на обогрев помещений, вентилируемых системой приточных отверстий, в результате возникающего при этом экономайзерного эффекта.

Список литературы

1. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций. – URL: docs.cntd.ru>document/1200095525 (дата обращения: 14.08.20).
2. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции в системе воздухообмена жилого многоэтажного здания / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: www. science-education.ru /121-17257 (дата обращения: 04.02.2015).
3. Береговой, А.М. Теплоэнергетические и экологические показатели при определении тепловых потерь здания / А.М. Береговой, М.А. Дерина // Вестник ПГУАС. Строительство, наука и образование. – 2016. – №2. – С. 49–52.
4. Береговой, А.М. Эффект энергосбережения в помещении с естественной вентиляцией в условиях инфильтрации воздуха через наружную стену / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С. 140–144.

Reference

- 1 Air permeability of enclosure structures. – URL: docs.cntd.ru document/1200095525 (access date: 14.08.20).
2. Beregovoy, A.M. External enclosing structures in the air exchange system of a residential high-rise building / A.M. Beregovoy, M.A. Derina // Modern Problems of Science and Education. – 2015. – № 1. – URL: www. science-education.ru / 121–17257 (access date: 4.02.2015).
3. Beregovoy, A.M. Thermal energy and environmental indicators in determining the thermal losses of a building / A.M. Beregovoi, M.A. Derina // Bulletin of PGUAS Construction, science and education. – 2016. – №2. – P. 49–52.
4. Beregovoy, A.M. The effect of energy saving in room with natural ventilation in terms of air infiltration through exterior wall /A.M. Beregovoy, A.V. Maltsev, M.A. Derina, A.V. Grechishkin // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – C. 140–144.

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

Дерина Мария Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Петрянина Любовь Николаевна,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@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

Derina Maria Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Urban Construction and
Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Petryanina Lyubov Nikolaevna,
Associate Professor of the department «Urban
Construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

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

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ: ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, О.Л. Викторова

Изучена проблема нормативного и технического регулирования технико-экономических показателей при вариантном сравнении в архитектурно-строительном проектировании. Определены технико-экономические показатели для проектных решений зданий гражданского назначения. Дан сравнительный анализ комплекса показателей с учетом срока функционирования объектов. Установлено, что основным конструктивным элементом в разрабатываемых проектах гражданских зданий, определяющим большую часть технико-экономических показателей, являются стены. Указаны оптимальные варианты конструкций стен многоквартирных жилых зданий по конструктивным и экономическим показателям. Предложена методика определения протяженности конструктивных элементов стен, выполняющих функционально-планировочное назначение и приходящихся на 1 м² общей площади здания, позволяющая сопоставлять все технико-экономические показатели по единым значениям основного конструктивного элемента.

Ключевые слова: здание, оценка качества, технико-экономические показатели, архитектурно-строительное проектирование, проект-аналог, стены, стоимость

TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS IN ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION DESIGN: PROBLEMS AND SUGGESTIONS

M.A. Derina, L.N. Petryanina, O.L. Viktorova

The problem of normative and technical regulation of technical and economic indicators in case of variant comparison in architectural and construction design is studied. Technical and economic indicators for design solutions of civil buildings are determined. A comparative analysis of the complex of indicators is given, taking into account the period of operation of objects. It is established that the main structural element in the developed projects of civil buildings, determining most of the technical and economic indicators, are walls. The optimal variants of the wall designs of multi-apartment residential buildings according to structural and economic indicators are indicated.

A method is proposed for determining the length of structural elements of walls that perform a functional and planning purpose, falling on 1m² of the total area of the building, which allows comparing all technical and economic indicators according to the uniform values of the main structural element.

Keywords: building, quality assessment, technical and economic indicators, architectural and construction design, analog project, walls, cost

Технико-экономические показатели (далее ТЭП) в архитектурно-строительном проектировании – набор значений, необходимых для оценки ресурсов и материалов с целью выбора оптимального проектного решения при сравнении вариантов. На ТЭП основываются выводы технико-экономического обоснования (ТЭО) – начальной стадии проектирования, – которое разрабатывается для масштабных и комплексных объектов.

Однако понятия ТЭО и ТЭП для архитектурно-строительного проектирования, их состав в зависимости от технологических особенностей объекта на законодательном уровне отсутствуют. Экономическая эффективность проектируемого объекта определяется только показателем срока окупаемости проекта.

Поэтому была изучена проблема нормативно-технического регулирования в архитектурно-строительном проектировании по действующим технико-экономическим показателям.

В процессе изучения был определен набор нормативных ТЭПов и действующий порядок их расчета для разных проектных решений объектов гражданского назначения: строительный объем, общая площадь участка, общая площадь зданий и сооружений, общая площадь, жилая площадь и др. Очевидно, что многие показатели имеют одинаковые названия, но различаются конкретным назначением и методом расчета, закрепленными в разных типовых формах. При этом единственно важными для застройщика-инвестора показателями являются продаваемые площади. Другие из перечисленных показателей рассчитываются только для соблюдения требований норм и возможности документально манипулировать ими.

Поэтому был выполнен анализ для комплекса технико-экономических показателей с учетом срока функционирования запроектированных объектов.

Известно, что застройщик обязан перед началом строительства (по действующему законодательству) заполнить и опубликовать ряд типовых форм, информация для которых берется из разработанной и узаконенной проектно-сметной документации. Например, одним из таких документов является проектная декларация. Требования для застройщика по представлению всех необходимых технико-экономических показателей являются обязательными – от разработки проектно-сметной документации до введения объекта в эксплуатацию.

Технико-экономические показатели для гражданских зданий прописаны в нормативных документах и рассчитываются при составлении проектно-сметной документации. Однако на ресурсах, где размещается проектная декларация, порядок расчета ТЭП отсутствует.

При разработке отдельных разделов проектно-сметной документации в соответствии с требованиями постановления Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» от 16.02.2008 должны быть рассчитаны технико-экономические показатели проектируемых объектов капитального строительства и представлены в текстовой части раздела 1. Также следует рассчитать технико-экономические показатели земельного участка, предоставленного для размещения объекта капитального строительства (раздел 2).

Очевидно, что в действующие градостроительные документы, имеющие силу закона, необходимо внести разъяснения по понятию технико-экономических показателей и порядку их расчета, т.к. в разных источниках их трактование различно.

Так, после получения экспертного заключения проектно-сметная документация считается утвержденной. Поэтому технико-экономические показатели, заложенные в ней, становятся основными при заполнении типовых форм. Тогда необходимость единообразия технико-экономических показателей, их расчетов становится понятной.

После проведенного анализа технико-экономических показателей было принято, что одним из основных конструктивных элементов в разрабатываемых проектах гражданских зданий являются стены, характеристики которых определяют большую часть ТЭПов.

Для исследования на основе технико-экономического сравнения были выбраны оптимальные варианты ограждающих конструкций (стен) жилых многоквартирных зданий (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Наименование	Конструктивное решение ограждающей конструкции	Состав ограждающей конструкции
Вариант 1	Кладка из блоков арболитовых	
Вариант 2	Стеновые панели с тепло-, звукоизоляционным заполняющим слоем толщиной 150 мм, OSB-обшивкой (толщиной 22 мм) и деревянным каркасом	
Вариант 3	Армированная кладка из газобетонных блоков с наружным утеплением жесткими минераловатными плитами ROCKWOOL БАТТС	

Для сравнения вариантов по технико-экономическим показателям были выполнены теплотехнический и сметный расчеты (с применением индекса для перевода в текущие цены на 1-й квартал 2022 года).

Итоги сравнения сведены в таблицу, где представлены конструктивные и экономические показатели (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Показатели конструкции стен	Варианты конструкции стен		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Толщина, м	0,2	0,3	0,4
Расчетное сопротивление теплопередаче	3,7	2,3	4,1
Прямые затраты, руб.	496 968,62	725 142,70	1 592 588,54
Накладные расходы, руб.	1 351 722,39	1 346 737,68	2 074 989,05
Сметная стоимость, руб.	4 273 584, 67	4 421 148	6 115 283,83
НДС, руб.	6 115 283,83	795 448,46	1 100 212,83
Итого, руб.	4 924 832,28	5 212 606,59	7 212 506,35

Рассмотренные варианты стен разделяют между собой комнаты и квартиры. При использовании конструктивных схем с продольными или с поперечными несущими стенами они могут выполнять функции несущих конструкций, а также межкомнатных или межквартирных перегородок. При каркасной конструктивной схеме стены выполняют только ограждающую функцию. Поэтому целью приведения изученных проектов зданий с разными поэтажными планировочными решениями к сравниваемому виду стал расчет протяженности конструктивных элементов стен, выполняющих функционально-планировочное назначение, приходящихся на 1 м² общей площади здания. В разных проектах расположение стен изменялось только по планировочным соображениям, при этом конструктивная схема здания в целом сохранялась. Общая длина стен здания в проекте-аналоге определялась как

$$L_{\text{п-ан}} = \frac{L_{\text{п-ан}}^{\text{вн.с}} + L_{\text{п-ан}}^{\text{пер}}}{S_{\text{п-ан}}^3},$$

где $L_{\text{п-ан}}^{\text{вн.с}}$ – протяженность внутренних стен в проекте-аналоге; $L_{\text{п-ан}}^{\text{пер}}$ – протяженность перегородок на одном этаже в проекте-аналоге; $S_{\text{п-ан}}^3$ – застраиваемая площадь здания в проекте-аналоге.

Общая длина стен здания n -го проекта определялась аналогично:

$$L_n = \frac{L_n^{\text{вн.с}} + L_n^{\text{пер}}}{S_n^3}.$$

Планировочные решения зданий в рассматриваемых проектах приводились к сравниваемому виду изменением протяженности самонесущих стен. Отношение протяженности стен в проекте-аналоге и в проекте n -го здания было обозначено как β :

$$\beta = \frac{L_{\text{п-ан}}}{L_n}.$$

Тогда было получено выражение такого технико-экономического показателя, как коэффициент сопоставления проектов сравниваемых зданий с разными объемно-планировочными решениями:

$$K_{n \text{ пр}}^{\text{о-п}} = \frac{\beta_{n*} \sum L_n^{\text{эт}} - L_n^{\text{вн.с.эт}}}{L_n^{\text{пер.эт}}},$$

где $\sum L_n^{эт}$ – суммарная протяженность стен и перегородок здания n -го проекта в пределах одного этажа; $L_n^{вн.с.эт}$ – протяженность внутренних стен здания n -го проекта в пределах одного этажа; $L_n^{пер.эт}$ – протяженность перегородок здания n -го проекта в пределах одного этажа.

Стоимостной показатель внутренних стен и перегородок здания n -го проекта, приведенного к сравниваемому с проектом-аналогом виду, определялся как

$$C_{T_n}^{вн.с.} = C_{T_{см\ n}}^{вн.с.} \cdot K_{n\ пр}^{о-п},$$

где $C_{T_{см\ n}}^{вн.с.}$ – сметная стоимость внутренних стен и перегородок здания n -го проекта до приведения к сравниваемому виду.

Таким образом, разные объемно-планировочные решения зданий могут приводиться к сравниваемому виду по предлагаемой методике. При этом получаем:

- 1) минимальный объем расчета технико-экономических показателей;
- 2) набор технико-экономических показателей с учетом максимально возможных вариантов конструктивно-технологических и объемно-планировочных решений;
- 3) сопоставление всех технико-экономических показателей по единым значениям основного конструктивно-планировочного элемента зданий (стен), ликвидируя разобщенность ТЭПов;
- 4) унификацию ТЭПов и порядок их расчета.

Список литературы

1. Дерина, М.А. Сравнительный анализ технико-экономических показателей проектных решений жилых и общественных зданий / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №1(50). – С.134–139.
2. Дерина, М.А. Оценка и расчет проектных решений зданий с использованием системы технико-экономических показателей / Дерина М.А., Семина Г.А. // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – №1(32). – С.75–79.
3. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, Ю.С. Сергунина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1(42). – С.212–217.
4. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.203–208.
5. Дерина, М.А. Параметры выбора кровельного покрытия при капитальном ремонте здания / М.А. Дерина // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2019. – №1(40). – С.83–86.
6. Петрянина, Л.Н. К вопросу о комплексном градостроительном проектировании / Л.Н. Петрянина // Вестник Белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – №7. – С.57–64.
7. Петрянина, Л.Н. Система экологического менеджмента в проектной организации / Л.Н. Петрянина, А.А. Булдыгина, О.В. Карпова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С.164.
8. Петрянина, Л.Н. Проблемы теплозащиты зданий / Л.Н. Петрянина, Э.В. Санян, М.А. Дерина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – №6(13). – С. 179–187.
9. Бекренева, Т.А. Техничко-экономическое сравнение вариантов возведения ограждающих конструкций стен многоквартирных жилых зданий / Т.А. Бекренева // StudArctic Forum. – 2016. – №4(4). – С.8–13.
10. Девятникова, Л.А. Исследование технико-экономических параметров при выборе возведения ограждающих конструкций индивидуальных жилых домов / Л.А. Де-

вятникова, Е.Г. Емельянова, А.А. Кузьменков, А.А. Симонова // Ученые записи Петрозаводского государственного университета. – 2016. – №4. – С.82–88.

References

1. Derina, M.A. Comparative analysis of technical and economic indicators of design solutions of residential and public buildings / M.A. Derina, L.N. Petryanina, O.L. Viktorova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1(50). – P.134–139.
2. Derina, M.A. Evaluation and calculation of design solutions of buildings using a system of technical and economic indicators / M.A. Derina, G.A. Semina // Education and science in the modern world. Innovation. – 2021. – No. 1(32). – P.75–79.
3. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina, M.A. Derina, Sergunina Y.S. // Regional architecture and engineering. – 2020. – No.1(42). – P.212–217.
4. Petryanina, L.N. Concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1(38). – P.203–208.
5. Derina, M.A. Parameters of the choice of roofing during major repairs of the building / M.A. Derina // Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. – 2019. – No. 1(40). – P.83–86.
6. Petryanina, L.N. On the issue of integrated urban planning / L.N. Petryanina // Bulletin of the Belgorod Technological University named after V.G. Shukhov. – 2018. – No.7. – P.57–64.
7. Petryanina, L.N. Environmental management system in a project organization / L.N. Petryanina, A.A. Buldygina, O.V. Karpova // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4. – P.164.
8. Petryanina, L.N. Problems of thermal protection of buildings / L.N. Petryanina, E.V. Sanyan, M.A. Derina // Education and science in the modern world. Innovation. – 2017. – No.6(13). – P. 179–187.
9. Bekreneva, T.A. Technical and economic comparison of options for the construction of enclosing structures of walls of multi-apartment residential buildings / T.A. Bekreneva // StudArctic Forum. – 2016. – No.4(4). – P.8–13.
10. Devyatnikova, L.A. Study of technical and economic parameters when choosing the construction of enclosing structures of individual residential buildings / L.A. Devyatnikova, E.G. Emelyanova, A.A. Kuzmenkov, A.A. Simonova // Scientific records of Petrozavodsk State University. – 2016. – No. 4. – P.82–88.