

**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 использо-
вание в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.

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

Подписано к печати 15.03.2023.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 25,25. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 139.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

1(54)/2023

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 4

Гришина А.Н., Королев Е.В.
БИО- И ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ
НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО ЦЕМЕНТНОГО
КАМНЯ, СОДЕРЖАЩЕГО
ГИДРОСИЛИКАТЫ МЕТАЛЛОВ..... 4

Обухова С.Ю., Королев Е.В., Карпунина А.О.
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗИНОСОДЕРЖАЩИХ
ОТХОДОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ.... 15

**Селяев В.П., Селяев П.В.,
Алимов М.Ф., Аверкина М.Ю.**
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ 28

Фролов М. В., Логанина В.И.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА
В СТЕНАХ ЗДАНИЙ ИЗ ГАЗОБЕТОНА
ДЛЯ УСЛОВИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ
АЗИИ..... 37

**Будылина Е.А., Гарькина И.А.,
Данилов А.М.**
АНАЛИТИКО-СИНТЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД
К РАЗРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ 46

Бикаева Ю.В., Ибрагимов Р.А.
СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ
НА ОСНОВЕ НИЗКОСОРТНОГО
ДОЛОМИТОВОГО СЫРЬЯ..... 52

Макридин Н.И., Максимова И.Н.
ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРНОЙ МЕХАНИКИ
РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПАРАМЕТРЫ
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ
СИСТЕМ 65

**Будылина Е.А., Гарькина И.А.,
Данилов А.М.**
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ СИСТЕМНОГО
АНАЛИЗА ПРИ СИНТЕЗЕ КОМПОЗИТОВ 71

© Авторы публикаций, 2023

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2023

© ПГУАС, 2023

Романенко И.И., Фадин А.И. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА 85	Андреев С.Ю., Салмин С.М., Лебединский К.В. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИЕМА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЕКЦИОНИРОВАНИЯ..... 137
Логанина В.И. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ОТСЛАИВАНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ.... 93	Андреев С.Ю., Князев В.А., Лебединский К.В. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВОБОДНОПЛАВАЮЩИХ В АЭРАЦИОННОМ ОБЪЕМЕ АЭРОБНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ..... 148
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ99	Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А. ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ВОЗДУХА В СТОКОПРИЕМНОМ ОТВЕРСТИИ И В ЗОНЕ СВОБОДНОГО ПРОСТРАНСТВА ВЫТЯЖНОГО ЗОНТА 156
Артюшин Д.В. , Коновалов П.В. СОПРОТИВЛЕНИЕ МОНОЛИТНЫХ УЗЛОВ СОПРЯЖЕНИЯ КОЛОНН И БАЛОК МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ 99	АРХИТЕКТУРА..... 169
Мартышкин Д.О., Арискин М.В. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВКЛЕЕННЫМИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫМИ ШАЙБАМИ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ 108	Мирхасанов Р.Ф., Садков В.А., Сабитов Л.С., Бочарова Ю.В. АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ КИТЧА В АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТАХ 169
Кочеткова М.В. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОСТВЕРКОВ ПОД КОЛОННУ НА ОСНОВЕ КАРКАСНО-СТЕРЖНЕВОЙ МОДЕЛИ 115	Мирсаханов Р.Ф., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. ОТ «ЧУГУННОЙ АРХИТЕКТУРЫ» К МЕТАЛЛИЧЕСКОМУ КАРКАСУ..... 178
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ121	Корнеев А.А., Ратькова Е.И., Селютина Л.Ф. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОХРАНЕНИЯ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В ПОВЕНЦЕ 186
Гришин Б.М., Бикунова М.В., Салмин С.М. ОЦЕНКА ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ АКТИВНОГО ИЛА, ОБРАБОТАННОГО В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ 121	Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Сазонова М.А. ПЕРЕПЛАНИРОВКА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ: ОПТИМИЗАЦИЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ..... 196
Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ..... 129	

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	4	Martyshkin D.O., Ariskin M.V. BEARING CAPACITY OF WOODEN STRUCTURES CONNECTIONS WITH DIFFERENT THICKNESS OF GLUED FIBERGLASS WASHERS	108
Grishina A.N., Korolev E.V. BIO- AND CHEMICAL RESISTANCE OF NANOMODIFIED COMPOSITE CEMENT STONE CONTAINING METAL HYDROSILICATES*	4	Kochetkova M.V. EFFICIENCY OF DESIGNING GRILLINGS FOR A COLUMN BASED ON A FRAME-ROD MODEL.....	115
Obukhova S.Yu., Korolev E.V., Karpunina A.O. STATUS AND PROSPECTS OF RUBBER-CONTAINING WASTE APPLICATION IN HIGHWAY ENGINEERING.....	15	ENGINEERING SYSTEMS.....	121
Selyaev V.P., Selyaev P.V., Alimov M.F., Averkina M.Yu. INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF CONCRETE DEFORMATION AND DESTRUCTION DURING COMPRESSION	28	Grishin B.M., Bikunova M.V., Salmin S.M. ASSESSMENT OF THE OXIDATIVE CAPACITY OF ACTIVATED SLUDGE TREATED IN AN ELECTRIC FIELD.....	121
Frolov M.V., Loganina V.I. STUDY OF THE HUMIDITY REGIME IN THE WALLS OF BUILDINGS FROM AERATED CONCRETE FOR CONDITIONS OF NORTHEAST ASIA	37	Akifev I.V., Eremkin A.I., Ponomareva I.K. COMPARATIVE STUDY OF MODERN GEODETIC METHODS FOR DETERMINING COORDINATES IN REAL CONDITIONS ON A CONSTRUCTION SITE	129
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. ANALYTICAL-SYNTHETIC APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF MATERIALS.....	46	Andreev S.Yu., Salmin S.M., Lebedinskiy K.V. INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT THROUGH THE USING THE TECHNOLOGY OF HYDRAULIC PARTITIONING	137
Bikaeva Yu.V., Ibragimov R.A. THE STATE AND TENDENCY OF DEVELOPMENT MAGNESIUM BINDERS ON LOW-GRADE DOLOMITE.....	52	Andreev S.Yu., Knyazev V.A., Lebedinskiy K.V. BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT BASED ON THE USE OF AEROBIC MICROORGANISMS FLOATING FREELY IN THE AERATION VOLUME.....	148
Makridin N.I., Maksimova I.N. ELEMENTS OF STRUCTURAL MECHANICS OF MATERIALS DISTRUCTION AND PARAMETERS OF CRACK RESISTANCE OF CEMENT SYSTEMS	65	Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Orlova N.A. FORMATION OF THE AIR FLOW IN THE DRAIN HOLE AND IN THE ZONE OF THE FREE SPACE OF THE HOOD.....	156
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. MATHEMATICAL PROBLEMS OF SYSTEM ANALYSIS IN THE SYNTHESIS OF COMPOSITES.....	71	ARCHITECTURE	169
Romanenko I.I., Fadin A.I. BUILDING MATERIALS BASED ON ACTIVATED STEEL-MAKING SLAG.....	85	Gaiduk A.R., Sabitov L.S., Mirkhasanov R.F., Bocharova Y.V. АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ КИТЧА В АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТАХ.....	169
Loganina V.I. STATISTICAL ANALYSIS OF THE PROBABILITY OF PEELING OF PAINT COATINGS OF CEMENT CONCRETE.....	93	Mirsakhanov R.F., Sabitov L.S., Garkin I.N. FROM «CAST IRON ARCHITECTURE» TO METAL FRAME.....	178
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	99	Korneev A.A., Ratkova E.I., Selutina L.F. ANALYSIS OF THE STATE AND POSSIBILITIES OF PRESERVATION A CULTURAL HERITAGE SITE IN POVENETS.....	186
Artyushin D.V., Konovalov P.V. RESISTANCE OF MONOLITHIC KNOTS OF INTERFACE OF COLUMNS AND BEAMS OF MULTI-STOREY BUILDINGS FRAMES.....	99	Derina M.A., Petryanina L.N., Sazonova M.A. REDEVELOPMENT OF RESIDENTIAL BUILDINGS DURING RECONSTRUCTION: OPTIMIZATION AND SEQUENCE OF DESIGNING	196

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.54:620.1

DOI 10.54734/20722958_2023_1_4

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

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

Гришина Анна Николаевна,

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник НОЦ
«Наноматериалы и нанотехнологии»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*

Россия, 190005, Санкт-Петербург,
ул. Вторая Красноармейская, д. 4

Королев Евгений Валерьевич,

доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе

*National Research Moscow State University of
Civil Engineering*

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

Grishina Anna Nikolaevna,

Candidate of Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher of Scientific and
Educational Center «Nanomaterials and
Nanotechnology»

E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

*St. Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering*

Russia, 190005, St. Petersburg, 4,
Second Krasnoarmeyskaya St.

Korolev Evgeny Valerievich,

Doctor of Sciences, Professor,
Vice-Rector for Scientific Work

БИО- И ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ГИДРОСИЛИКАТЫ МЕТАЛЛОВ*

А.Н. Гришина, Е.В. Королев

Представлены результаты испытания наномодифицированного композиционного цементного камня, содержащего гидросиликаты цинка и меди, на биостойкость и химическую стойкость в органических кислотах. Подтверждена эффективность биоцидных модификаторов. Установлено, что химическая стойкость наномодифицированного искусственного камня на указанном вяжущем определяется не силой кислоты, используемой для экспозиции, а растворимостью образующихся продуктов. Так, при использовании более сильной щавелевой кислоты происходит накопление малорастворимых оксалатов кальция в поровом пространстве камня и его химическая стойкость возрастает, а при использовании более слабой лимонной кислоты химическая стойкость материала ниже, что обусловлено более высокой растворимостью цитрата

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз», номер проекта # FSWG2020-0007).

кальция, который периодически накапливается на поверхности образцов и отделяется от нее. Указанное подтверждается колебаниями массы образцов при экспозиции в агрессивных средах.

Ключевые слова: биостойкость, химическая стойкость, химическое взаимодействие, гидросиликаты металлов, наномодифицированный композиционный цементный камень

BIO- AND CHEMICAL RESISTANCE OF NANOMODIFIED COMPOSITE CEMENT STONE CONTAINING METAL HYDROSILICATES*

A.N. Grishina, E.V. Korolev

The article presents the results of testing nanomodified composite cement stone containing zinc and copper hydrosilicates for biostability and chemical resistance in organic acids. The effectiveness of biocidal modifiers has been confirmed. It is established that the chemical resistance of nanomodified artificial stone on the specified binder is determined not by the strength of the acid used for exposure, but by the solubility of the products formed, so using stronger oxalic acid, the accumulation of poorly soluble calcium oxalates in the pore space of the stone occurs and its chemical resistance increases, and using weaker citric acid, the chemical resistance of the material is lower, which is due to the higher solubility of calcium citrate, which periodically accumulates on the surface of the samples and separates from it. This is confirmed by mass fluctuations during exposure in aggressive environments.

Keywords: biostability, chemical resistance, chemical interaction, metal hydrosilicates, nanomodified composite cement stone

Введение

Вопросы обеспечения биобезопасности являются одними из актуальных в современном обществе. Это вызвано увеличением заболеваемости населения болезнями, вызванными попаданием в организм человека микроорганизмов, особенно спор и продуктов жизнедеятельности плесневых грибов, первое место из которых занимают аспергиллы [1...3]. Лечение грибковых инфекций часто не проводится своевременно, что приводит к общему ухудшению самочувствия человека и осложнению течения болезни. Кроме того, эти же грибы являются основными деструкторами цементных бетонов [4...6].

Одной из эффективных мер борьбы с заболеваниями, вызванными проникновением грибов в организм человека, является профилактика заболеваний, которая направлена на снижение концентрации спор грибов и продуктов их жизнедеятельности в воздухе. Так как до 80 % времени человек находится в помещениях зданий, то обеспечение биоцидности строительных материалов будет способствовать решению указанной задачи. Такой приём можно классифицировать как пассивный способ пролонгированного действия.

Однако подход, используемый в строительном материаловедении, направлен в большей степени не на подавление распространения мицелия грибов, а на сохранение свойств материалов при воздействии продуктов их жизнедеятельности – органических кислот. Поэтому решение задачи обеспечения биобезопасности может заключаться во внедрении в строительные материалы биоцидных добавок, которые, взаимодействуя с органическими кислотами, будут выделять ионы биоцидных металлов. При этом важно сохранить как активность и длительность действия биоцидной добавки, так и объёмное распределение добавки в материале.

В строительном материаловедении используются различные модифицирующие добавки, обеспечивающие защиту материалов, однако их активность может снижаться во времени. Поэтому применение гидросиликатов биоцидных металлов, проявляющих активность при воздействии кислоты, является способом обеспечения пролонгированных биоцидных свойств. Однако при этом установление химической стойкости материала в растворах кислот является классическим и необходимым способом оценки стойкости материала к воздействию биологического фактора эксплуатации (химиче-

ское связывание в нерастворимые соединения под воздействием внешних факторов и т.д.).

Методы и материалы

Оценка биоцидных свойств проводилась для наномодифицированных композиционных цементных камней, содержащих 10 % от массы гидросиликатов бария и биоцидный микроразмерный модификатор – 0,25; 0,5; 0,75; 1 % гидросиликатов меди или 0,5; 1; 2; 3; 5; 6 % гидросиликатов цинка. В качестве наномодификатора использовался коллоидный раствор гидросиликатов цинка, полученный при $C(Fe(OH)_3) = 0,3$ % и $\alpha = 1,0$ [7]. Определение стойкости к плесневым грибам проводили в соответствии с ГОСТ 9.048-89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов».

При оценке стойкости определялась прочность при сжатии образцов-кубиков, изготовленных из наномодифицированного композиционного цементного камня. Учитывая образование органических кислот различными штаммами грибов [8], для экспозиции использовали растворы лимонной и щавелевой кислот. Для увеличения скорости деструкции концентрация кислот была повышена до 5 %, что существенно выше традиционно используемых концентраций агрессивных сред [9].

Результаты и их обсуждение

Осмотр образцов после заражения грибами *Aspergillus ostianus* и *Aspergillus alliaceus* проводился на 30-е и 90-е сутки в соответствии с методами 1 и 3 ГОСТ 9.048-89 (табл. 1). В числителе приведен результат испытаний образцов при заражении *Aspergillus ostianus*, в знаменателе – *Aspergillus alliaceus*.

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний искусственных цементных камней
с биоцидными добавками

Вид и концентрация биоцидного модификатора	Баллы	
	Метод 1	Метод 3
Гидросиликаты меди, 0,25 %	0/0	0/0
Гидросиликаты меди, 0,25 %	0/0	0/0
Гидросиликаты меди, 0,25 %	0/0	0/0
Гидросиликаты меди, 0,25 %	0/0	0/0
Гидросиликаты цинка, 0,5 %	0/0	0/0
Гидросиликаты цинка, 1 %	0/0	0/0
Гидросиликаты цинка, 2 %	0/0	0/0
Гидросиликаты цинка, 3 %	0/0	0/0
Гидросиликаты цинка, 5 %	0/0	0/0
Гидросиликаты цинка, 6 %	0/0	0/0

Анализ результатов испытания показал, что использование нано- и микроразмерных биоцидных модификаторов в цементном камне продемонстрировало высокую эффективность защиты от развития плесневых грибов.

Механизм активации биоцидного модификатора состоит в выделении ионов цинка или меди при его взаимодействии с органическими кислотами, являющимися продуктами их метаболизма. Для определения изменения концентрации ионов цинка и меди при воздействии кислот, выделяемых плесневыми грибами, были исследованы концентрации ионов меди и цинка в растворах при экспозиции гидросиликатов цинка и меди в количестве один грамм в 100 мл дистиллированной воды, 0,1 % раствора щавелевой кислоты, 1 % раствора лимонной кислоты. Концентрации кислот были выбраны на основании данных о модельных системах [9]. Окраска водной вытяжки и вытяжек, приготовленных с использованием растворов кислот, различна: голубая окраска вытяжек, полученных с использованием кислот, свидетельствует о наличии в

растворах ионов меди. Водные вытяжки бесцветны. Установлено, что в водной вытяжке определяются следовые количества ионов меди, а ионы цинка в воде не обнаружены. При воздействии лимонной кислоты концентрация ионов Zn^{2+} в растворе составляет 0,034 моль/л, а ионов Cu^{2+} – 0,071 моль/л. В вытяжке, изготовленной с использованием щавелевой кислоты, концентрация ионов Zn^{2+} составляет 0,005 моль/л, а ионов Cu^{2+} – 0,008 моль/л. Указанное свидетельствует об активации биоцидного модификатора под действием органических кислот, образующихся при метаболизме плесневых грибов.

Несмотря на подавление развития микроорганизмов, кислоты оказывают начальное воздействие на материал. В этой связи проведены исследования химической стойкости наномодифицированных биоцидных композиционных цементных камней. Результаты изменения химической стойкости образцов с добавлением гидросиликатов меди приведены на рис. 1-2.

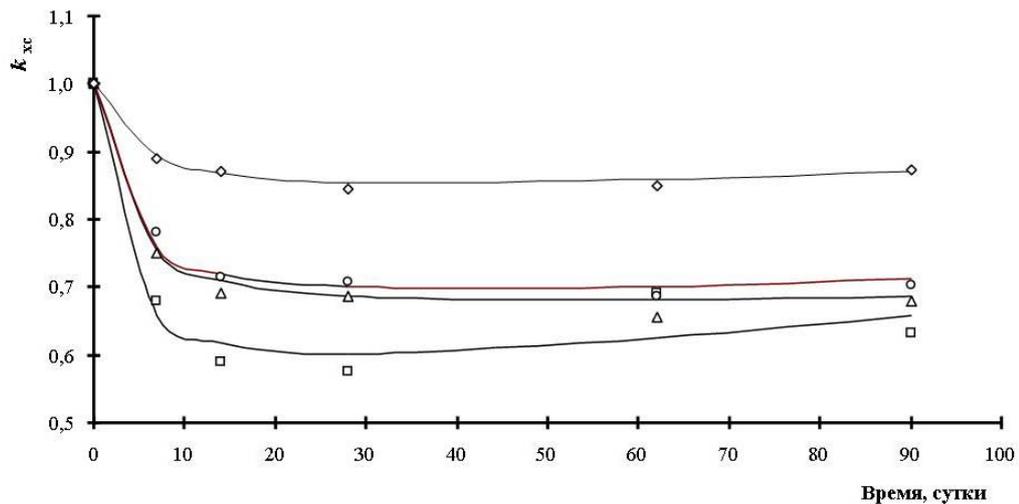


Рис. 1. Кинетика изменения химической стойкости в лимонной кислоте наномодифицированного композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами меди:

◇ – 1 % гидросиликатов меди; ○ – то же 0,75 %; □ – то же 0,5 %; △ – то же 0,25 %

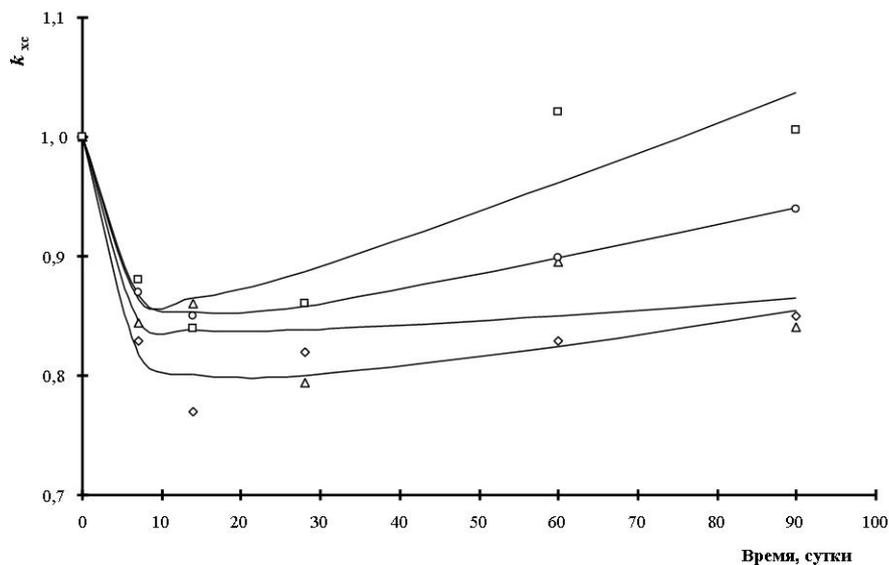


Рис. 2. Кинетика изменения химической стойкости в щавелевой кислоте наномодифицированного композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами меди:

□ – 1 % гидросиликатов меди; ○ – то же 0,75 %; ◇ – то же 0,5 %; △ – то же 0,25 %

Зависимости, представленные на рис. 1 и 2, удовлетворительно описываются функцией вида:

$$k_{xc} = \frac{1+bt}{1+ct+dt^2}, \quad (1)$$

где при $t = 0$ коэффициент химической стойкости $k_{xc}(0) = 1$; b, c, d – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Значения эмпирических коэффициентов модели (1)

Содержание биоцидной добавки, %	Значения эмпирических коэффициентов		
	b	c	d
Лимонная кислота			
0,25	0,20	0,31	$-1,89 \cdot 10^{-4}$
0,50	0,23	0,43	$-8,21 \cdot 10^{-4}$
0,75	0,22	0,33	$-2,63 \cdot 10^{-4}$
1,00	0,14	0,18	$-1,29 \cdot 10^{-4}$
Щавелевая кислота			
0,25	0,78	0,95	$-5,39 \cdot 10^{-4}$
0,50	0,39	0,52	$-6,12 \cdot 10^{-4}$
0,75	0,31	0,38	$-5,93 \cdot 10^{-4}$
1,00	0,65	0,78	$-17,85 \cdot 10^{-4}$

Анализ эмпирических коэффициентов демонстрирует несколько особенностей поведения материала в исследуемых органических кислотах:

1) При выдержке в растворах кислот для всех исследованных составов наблюдается возрастание сопротивления материала. На это указывают положительные величины коэффициента b числителя функции (1), который описывает конструктивный процесс сопротивления материала воздействию агрессивной среды. Причём при экспозиции в щавелевой кислоте коэффициенты b имеют более высокие значения по сравнению с указанным коэффициентом, вычисленным по экспериментальным данным для образцов, выдержанных в лимонной кислоте.

2) Для деструктивного процесса, представленного знаменателем функции (1), наблюдается снижение интенсивности. На это указывают отрицательные величины коэффициента d . При этом коэффициент c , который является основным* в формировании деструктивного влияния на материал для составов, испытанных в щавелевой кислоте, также имеет более высокие значения по сравнению с образцами, выдержанными в лимонной кислоте.

3) Обобщения, представленные в приведённых пунктах, демонстрируют, что важными являются не значения коэффициентов b и c , а их соотношение b/c , которое можно использовать для оценки коэффициента стойкости материала (с относительной погрешностью до 15 %). Указанное следует из предположения о том, что коэффициент стойкости является индикатором, характеризующим соотношение скоростей конструкционного и деструктивного процессов, то есть

$$k_{xc} = \frac{\mathfrak{G}_k}{\mathfrak{G}_d},$$

где

$$\mathfrak{G}_k = \frac{dP_k}{dt} = b;$$

* Максимальная интенсивность деструктивного процесса, вычисленная по формуле $c/2d$, для исследованных составов изменяется в широком диапазоне – от 200 до 700 суток.

$$\vartheta_d = \frac{dP_d}{dt} = c + 2dt;$$

P_k и P_d характеризуют изменение параметров структуры (структурообразование) при конструктивном и деструктивном процессах.

Отсюда следует, что использование соотношения b/c для оценки коэффициента химической стойкости является частным случаем, реализующимся только при условиях: $b, c > 0, d < 0$, а соотношение $|d/c| \ll 1$. Кроме того, верно утверждение, согласно которому параметры структуры материалов при воздействии агрессивной среды формируются обязательно под влиянием конструктивного и деструктивного процессов, то есть $b, c > 0$, а среда эксплуатации обязательно инициирует указанные частные процессы структурообразования.

Представленные особенности хорошо согласуются с другими экспериментальными данными по экспозиции образцов. При визуальной оценке поверхность образцов, хранящихся в щавелевой кислоте, слабо изменяется, а в лимонной – покрывается белым налетом, который имеет рыхлую структуру, по мере накопления удаляется с поверхности и осаждается на дне ёмкости для выдержки образцов.

Основной причиной такого различия в поведении образцов в указанных агрессивных средах является разная растворимость продуктов взаимодействия органических кислот с кальцийсодержащими соединениями – оксалатом и цитратом кальция. Так, оксалат кальция имеет растворимость 0,00067 г/100 мл воды и представлен прозрачными моноклинными кристаллами, которые при визуальном исследовании незаметны. В то время как растворимость цитрата кальция составляет 0,85 г/100 мл воды. Это обеспечивает его удаление с поверхности образцов. Такое различие в растворимости оказывает влияние на барьерные свойства продуктов реакции. Очевидно, что в случае образования оксалата кальция сопротивление движению среды в объём материала значительно выше, чем при образовании цитрата кальция. В этом заключается положительный эффект от образования продуктов реакции с органическими кислотами. Отрицательный эффект состоит в физическом давлении, которое возникает вследствие роста кристаллов продуктов, особенно имеющих волокнистую форму. Указанное чётко демонстрируют величины эмпирических коэффициентов, представленные в табл. 2.

Отсюда следует, что сила кислоты не является определяющей для прогнозирования долговечности материала, подвергнутого ее воздействию. Важными являются растворимость и физические характеристики (включая геометрические) образующегося продукта взаимодействия.

Изменение химической стойкости композиционных цементных камней, изготовленных с использованием гидросиликатов цинка, имеет сложный характер (рис. 3 и 4). При этом характер изменения химической стойкости сохраняется: в лимонной кислоте наблюдается отрицательный тренд, а в щавелевой – положительный. Возрастание химической стойкости при хранении в лимонной кислоте (наблюдающееся в отдельных случаях), вероятно, имеет периодический характер и определяется временным наличием в поровом пространстве продуктов взаимодействия.

Очевидно, что массопоглощение должно отражать процессы, сопряжённые с временным или постоянным сохранением в поровом пространстве продуктов взаимодействия. Результаты определения массопоглощения приведены на рис. 5-8.

Анализ рис. 5 и 6 показывает, что наблюдается как прирост, так и уменьшение массы, что подтверждает периодичность накопления и потери массы в процессе экспозиции материала в растворе лимонной кислоты*. При экспозиции в щавелевой кислоте наблюдается только прирост массы (см. рис. 7 и 8), что подтверждает выдвинутое предположение об обеспечении прочности за счет временного блокирования порового пространства продуктами взаимодействия композита с лимонной кислотой.

* Указанное явление периодического изменения физической величины, сопряжённой с геометрическими размерами и/или массопоглощением, получило наименование техногенного метасоматоза [10-13].

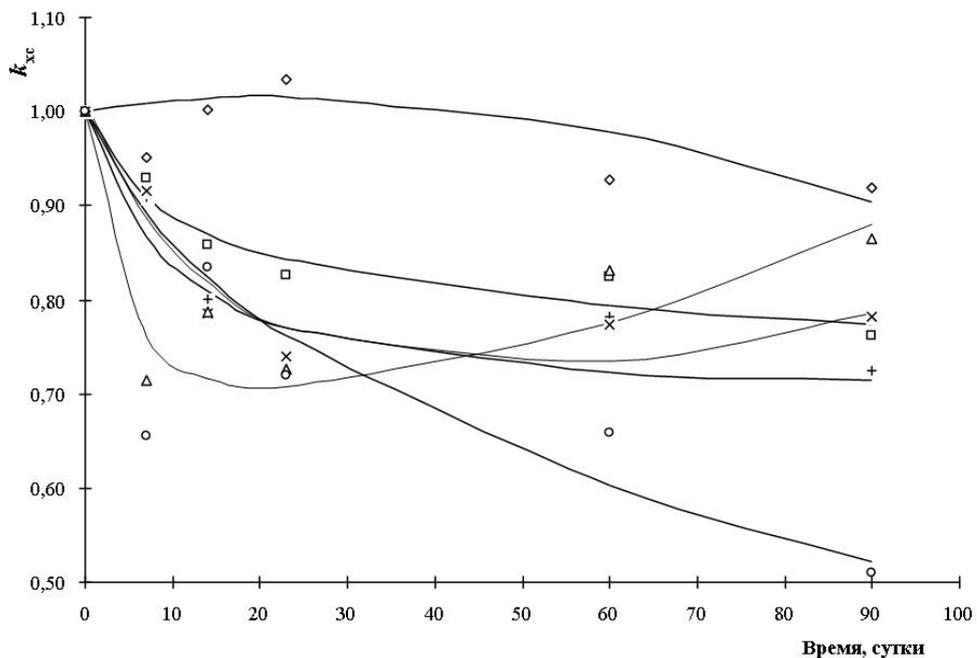


Рис. 3. Кинетика изменения химической стойкости в лимонной кислоте наномодифицированного композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами цинка:
 □ – 0,5 % гидросиликатов цинка; + – 1 % гидросиликатов цинка;
 × – 2 % гидросиликатов цинка; Δ – 3 % гидросиликатов цинка; ◇ – 5 % гидросиликатов цинка;
 ○ – 6 % гидросиликатов цинка

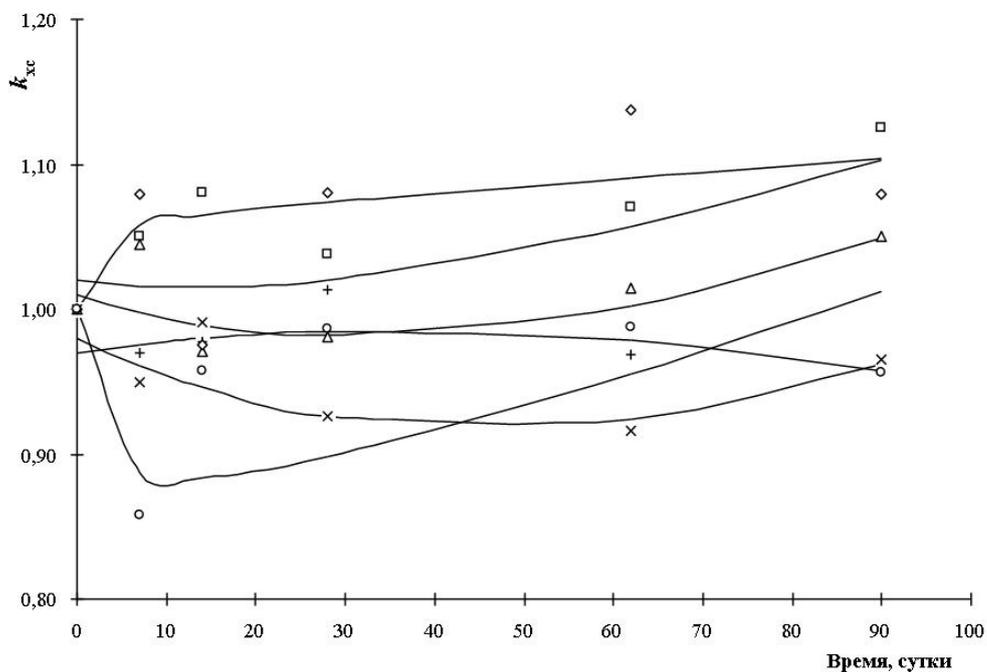


Рис. 4. Кинетика изменения химической стойкости в щавелевой кислоте наномодифицированного композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами цинка:
 □ – 0,5 % гидросиликатов цинка; + – 1 % гидросиликатов цинка;
 × – 2 % гидросиликатов цинка; Δ – 3 % гидросиликатов цинка;
 ◇ – 5 % гидросиликатов цинка; ○ – 6 % гидросиликатов цинка

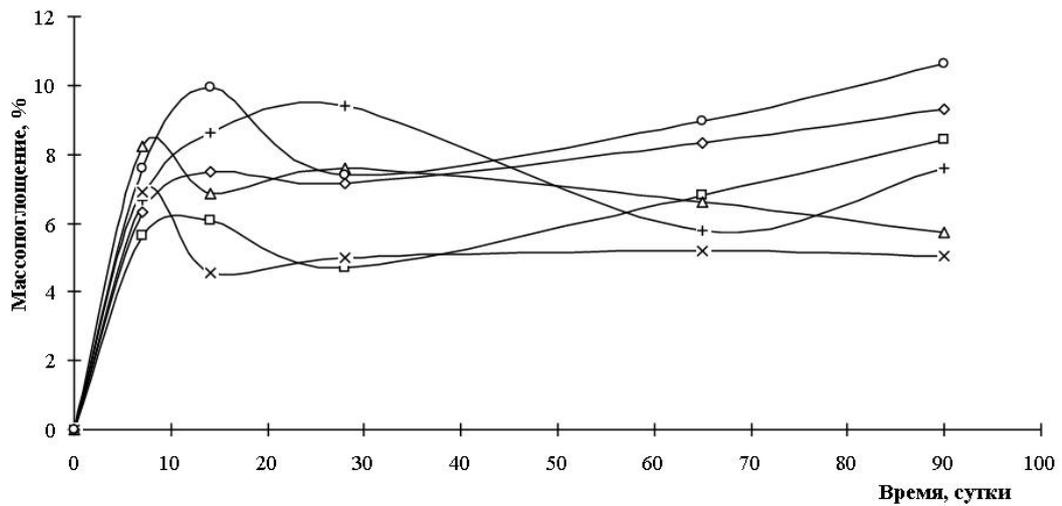


Рис. 5. Кинетика массопоглощения в лимонной кислоте наномодифицированного композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами цинка:

- – 0,5 % гидросиликатов цинка; + – 1 % гидросиликатов цинка;
- × – 2 % гидросиликатов цинка; Δ – 3 % гидросиликатов цинка;
- ◇ – 5 % гидросиликатов цинка; ○ – 6 % гидросиликатов цинка

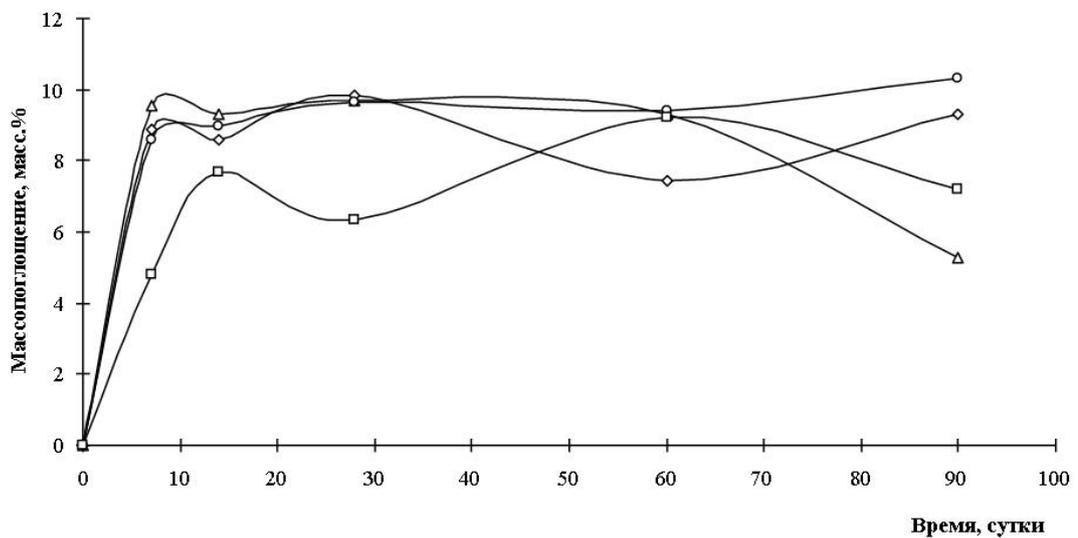


Рис. 6. Кинетика массопоглощения в лимонной кислоте наномодифицированного композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами меди:

- ◇ – 1 % гидросиликатов меди; ○ – то же 0,75 %; □ – то же 0,5 %; Δ – то же 0,25 %

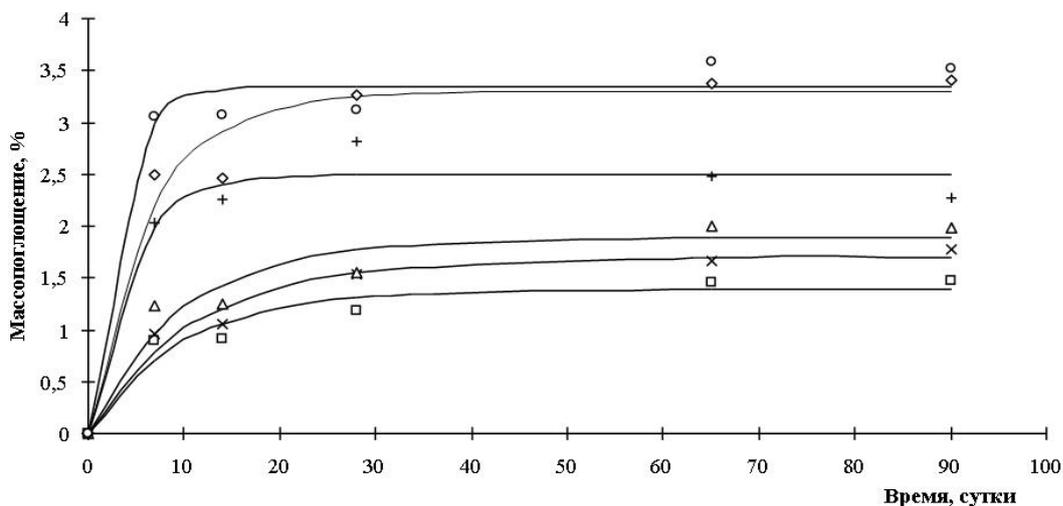


Рис. 7. Кинетика массопоглощения в щавелевой кислоте наномодифицированного композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами цинка:

□ – 0,5 % гидросиликатов цинка; + – 1 % гидросиликатов цинка;
 × – 2 % гидросиликатов цинка; Δ – 3 % гидросиликатов цинка;
 ◇ – 5 % гидросиликатов цинка; ○ – 6 % гидросиликатов цинка

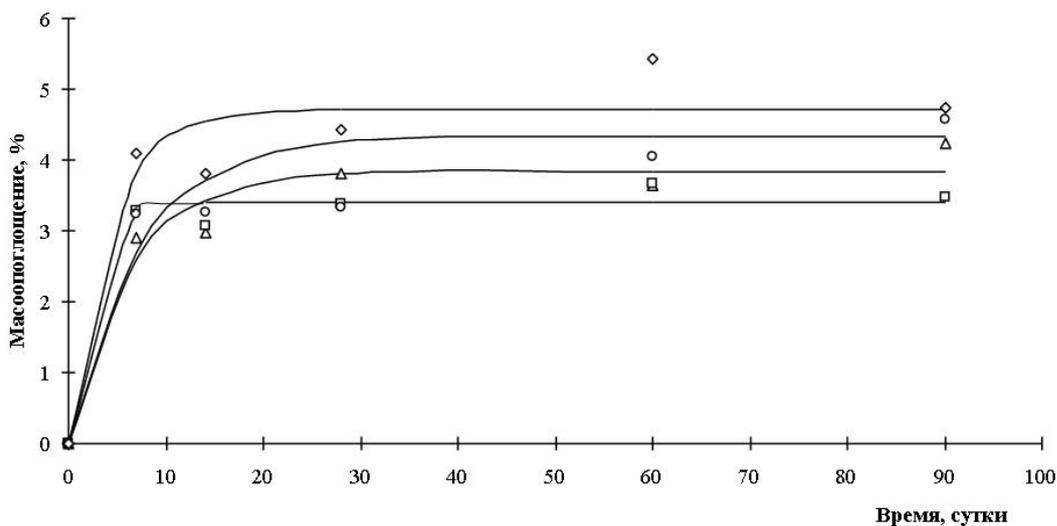


Рис. 8. Кинетика массопоглощения в щавелевой кислоте наномодифицированного композиционного цементного камня, модифицированного гидросиликатами меди:

◇ – 1 % гидросиликатов меди; ○ – то же 0,75 %; □ – то же 0,5 %; Δ – то же 0,25 %

Выводы

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что искусственные камни из наномодифицированного композиционного вяжущего на основе портландцемента, содержащего гидросиликаты бария, гидросиликаты цинка или меди, имеют высокую биостойкость: развитие грибов видов *Aspergillus ostianus* и *Aspergillus alliaceus* не обнаружено.

2. Выявлено, что химическая стойкость искусственного камня на указанном вяжущем определяется не силой кислоты, используемой для экспозиции, а растворимостью образующихся продуктов. Так, при использовании более сильной щавелевой кислоты происходит накопление малорастворимых оксалатов кальция в поровом пространстве камня и его химическая стойкость возрастает, а при использовании более слабой лимонной кислоты химическая стойкость материала ниже, что обусловлено более высокой растворимостью цитрата кальция, который периодически накапли-

вается на поверхности образцов и отделяется от нее. Указанное подтверждается колебаниями массы при экспозиции в агрессивных средах.

3. Определено, что для оценки коэффициента стойкости материала (с относительной погрешностью до 15 %) можно использовать соотношение эмпирических коэффициентов $\frac{b}{c}$ зависимости $k_{xc} = \frac{1+bt}{1+ct+dt^2}$, которые характеризуют интенсивность конструктивного (коэффициент b) и деструктивного (коэффициент c) процессов, протекающих при воздействии на материал агрессивной среды.

Список литературы

1. Силкина, Т.А. Грибковые инфекции – актуальность и возможности лабораторной диагностики / Т.А. Силкина, Д.Р. Псеунова, Э.Р. Янбухтина // Лаборатория ЛПУ. – 2014. – №4. – С. 56.
2. ВОЗ опубликовала первый в мире перечень опасных для здоровья грибов // Ведомственные новости 25 октября 2022 г. – URL: <https://www.who.int/ru/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (дата обращения 30.10.2022).
3. Saber, S.M., Mycotoxins production by *Aspergillus ostianus* Wehmer and using phytochemicals as control agent / S.M. Saber, M.S. Youssef, R.F. Arafa, A.M.A. Hassane // Journal of Scientific and Engineering Research. – 2016. – V. 3(2). – P. 198–213.
4. Строганов, В.Ф. Метод испытания минеральных строительных материалов на биостойкость в модельных агрессивных средах / В.Ф. Строганов, Д.А. Куколева, Л.Р. Бараева // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 17. – С. 117–121.
5. Сидоров, В.И. Обеспечение биостойкости зданий и сооружений молочной промышленности / В.И. Сидоров, Т.П. Никифорова, Ю.В. Доможилова // Вестник МГСУ. – 2007. – № 1. – С. 157–159.
6. Ерофеев, В.Т. Биостойкость декоративных цементных композитов / В.Т. Ерофеев, А.И. Родин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 32–38.
7. Гришина, А.Н. Синтез и исследование устойчивости золь гидросиликатов бария / А.Н. Гришина, Е.В. Королев, А.Б. Сатюков // Строительные материалы. – 2013. – № 9. – С. 91–93.
8. Сазанова, К.В. Органические кислоты грибов и их экологофизиологическое значение: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.12 – Микология. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2014. – 159 с.
9. Строганов, В.Ф. Комплексное исследование процессов биоповреждения минеральных строительных материалов / В.Ф. Строганов, Е.В. Сагадеев, Л.И. Потапова, Д.А. Куколева // Известия КГАСУ. – 2011. – № 4 (18). – С. 274–281.
10. Королев, Е.В. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Модель процесса / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.В. Михеев, В.А. Гладких // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 4 (81). – С. 134–143.
11. Гришина, А.Н. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Экспериментальные результаты / А.Н. Гришина, Е.В. Королев, А.В. Михеев, В.А. Гладких // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 6 (83). – С. 140–148.
12. Лесовик, В.С. К проблеме техногенного метасоматоза в строительном материаловедении / В.С. Лесовик, А.А. Володченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 4. – С. 38–41.
13. Лесовик, В.С. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении / В.С. Лесовик, Е.В. Фомина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2019. – № 1–2. – С. 100–106.

References

1. Silkina, T.A. Fungal infections – relevance and possibilities of laboratory diagnostics / T.A. Silkina, D.R. Pseunova, E.R. Yanbukhtina // Laboratory of LPU. – 2014. – No. 4. – P. 56.
2. WHO has published the world's first list of fungi dangerous to health // Departmental news October 25, 2022. – URL: <https://www.who.int/ru/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> / Date of appeal 30.10.2022
3. Saber, S.M., Mycotoxins production by *Aspergillus ostianus* Wehmer and using phytochemicals as control agent / S.M. Saber, M.S. Youssef, R.F. Arafa, A.M.A. Hassane // Journal of Scientific and Engineering Research. – 2016. – V. 3(2). – P. 198–213.
4. Stroganov, V.F. Method of testing mineral building materials for biostability in model aggressive environments / V.F. Stroganov, D.A. Kukoleva, L.R. Baraeva // Bulletin of Kazan Technological University. – 2011. – No. 17. – P. 117–121.
5. Sidorov, V.I. Ensuring the biostability of buildings and structures of the dairy industry / V.I. Sidorov, T.P. Nikiforova, Yu.V. Domozhilova // Bulletin of MGSU. – 2007. – No. 1. – P. 157–159.
6. Erofeev, V.T. Biostability of decorative cement composites / V.T. Erofeev, A.I. Rodin // Regional architecture and engineering. – 2013. – No. 3. – P. 32–38.
7. Grishina, A.N. Synthesis and stability study of barium hydrosilicate sols / A.N. Grishina, E.V. Korolev, A.B. Satyukov // Building materials. – 2013. – No. 9. – P. 91–93.
8. Sazanova, K.V. Organic acids of fungi and their ecological and physiological significance: dis. ... cand. biol. sciences: 03.02.12 – Mycology. – SPb.: St. Petersburg State University, 2014. – 159 p.
9. Stroganov, V.F. Complex investigation of the processes of bio-damage of mineral building materials / V.F. Stroganov, E.V. Sagadeev, L.I. Potapova, D.A. Kukoleva // News of KGASU. – 2011. – № 4 (18). – P. 274–281.
10. Korolev, E.V. Moisture deformations of concrete exposed to alkaline corrosion. Process model / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.V. Mikheev, V.A. Gladkikh // Bulletin of Civil Engineers. – 2020. – № 4 (81). – P. 134–143.
11. Grishina, A.N. Moisture deformations of concrete exposed to alkaline corrosion. Experimental results / A.N. Grishina, E.V. Korolev, A.V. Mikheev, V.A. Gladkikh // Bulletin of Civil Engineers. – 2020. – № 6 (83). – P. 140–148.
12. Lesovik, V.S. On the problem of technogenic metasomatism in building materials science / V.S. Lesovik, A.A. Volodchenko // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. -2015. – No. 4. – P. 38–41.
13. Lesovik, V.S. Some aspects of technogenic metasomatism in building materials science / V.S. Lesovik, E.V. Fomina, A.M. Aisenstadt // Building Materials. – 2019. – No. 1–2. – P. 100–106.

УДК 691.16

DOI 10.54734/20722958_2023_1_15

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

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

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

Карпунина Ангелина Олеговна,
аспирант
E-mail: Angelina-line@yandex.ru
*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*

Россия, 190005, Санкт-Петербург,
ул. Вторая Красноармейская, д. 4

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

*National Research Moscow State University of
Civil Engineering*

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

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

Karpunina Angelina Olegovna,
Postgraduate
E-mail: Angelina-line@yandex.ru
*St. Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering*

Russia, 190005, St. Petersburg, 4,
Second Krasnoarmeyskaya St.

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

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗИНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

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

Рассмотрена проблема накопления и повторного использования резиносодержащих отходов, представлена информация о международном опыте применения резиновой крошки в дорожно-строительных материалах. Приведены и проанализированы результаты последних исследований в данной области, а также рассмотрено влияние различных факторов на качество и процесс приготовления резинобитумного вяжущего «мокрым» способом, позволяющим наиболее полно раскрыть полезные свойства резины.

Ключевые слова: резиновая крошка, резиносодержащие отходы, битум, резинобитумное вяжущее, сухой и мокрый способы, асфальтобетонные смеси, асфальтобетон

STATUS AND PROSPECTS OF RUBBER-CONTAINING WASTE APPLICATION IN HIGHWAY ENGINEERING

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

The article deals with the problem of accumulation and recycling of rubber-containing waste, provides information on international experience in the application of crumb rubber in road construction materials. The results of recent research in this area are presented and analyzed. The influence of various factors on the preparation process and the quality of the rubberbitumen binder by «wet» method, which allows the most complete disclosure of the useful properties of rubber, is considered.

Keywords: crumb rubber, rubber-containing waste, bitumen, rubberbitumen binder, dry and wet methods, asphalt mixes, asphalt concrete

Введение

В связи с нерешенной проблемой накопления изношенных автомобильных покрышек, содержащих ценное сырье в виде каучука, и необходимостью их эффективной переработки, использование резиновой крошки в качестве функциональных

модификаторов битумных вяжущих и асфальтобетонных смесей остается актуальным вопросом и с новой силой привлекает интерес мирового научного сообщества. Ресурсосбережение посредством возврата вторичного ресурса – резинотехнических отходов – в битумное производство для дорожного строительства является активно развивающимся в России. На сегодняшний день в Российской Федерации воссоздается отрасль рециклинга отходов, то есть деятельности по преобразованию отходов во вторичные ресурсы, которые содержат материалы и энергию, ранее затраченные на получение первоначальной продукции.

Ежегодное увеличение рынка автотранспортных средств напрямую связано с образованием отходов от их эксплуатации, в частности изношенных шин. Однако проблема рациональной переработки использованных изношенных шин и их повторного применения на сегодняшний день так и не имеет эффективного решения. По различным оценкам, запасы изношенных шин, накопленных в мире на сегодняшний день, составляют 60–80 млн тонн и имеют прирост более 10 млн тонн в год. Но несмотря на значительные мировые объемы отходов, из общего числа всех шин перерабатывается только 20 % [1–3].

В соответствии с информацией, представленной ассоциацией «Шинэкология», ежегодно в Российской Федерации образуется более 1 млн тонн отходов резинотехнических изделий. Основная часть отходов сосредоточена в центральной части страны – до 70 %. Также необходимо отметить, что, к сожалению, в Российской Федерации отсутствует официальный фактический статистический учет количества резинотехнических изделий, которые были выведены из эксплуатации; поэтому действительные цифры ежегодного образования отходов будут отличаться от представленных в сторону увеличения. По данным ассоциации содействия восстановлению и переработке шин «Шинэкология», в Российской Федерации ежегодно на переработку попадает не более 10 % объема всех изношенных шин, выведенных из эксплуатации [4, 5].

Повторное использование отходов резинотехнических изделий обеспечивает экологическую безопасность, ввиду того что изношенные шины, выведенные из эксплуатации, в большинстве случаев попадают на различные свалки и образуют значительные запасы отходов, которые служат источниками возникновения трудногазисимых пожаров за счет хорошей воспламеняемости шин [6]. Экономическое значение применения резинотехнических отходов заключается в том, что шины имеют в своем составе каучук, получаемый из невозобновляемого ресурса – нефти [7]. В одной тонне данных отходов может содержаться до 700 кг каучука. Однако одновременно с этим, если сжигать тот же самый объем отходов, то в окружающую среду будет выделяться 270 кг сажи и 450 кг токсичных газов [8], что пагубным образом отразится на экологической обстановке. Повторное использование отработанных шин позволит снова вовлечь каучук с его полезными свойствами в производство и получить при этом дополнительную экономическую выгоду. Кроме того, растущая стоимость природных ресурсов обуславливает развитие технологий вторичной переработки с точки зрения экономической составляющей энергоносителей.

Наиболее освоенным методом переработки резинотехнических отходов является измельчение с получением резиновой крошки. В мировой практике одной из основных отраслей, активно использующей резиновую крошку, является дорожная отрасль [9–12]. Российская Федерация пока в недостаточной степени реализует данные возможности рынка вторсырья резиновых отходов. Эффективное использование резиновой крошки в дорожном строительстве в качестве модификатора дорожно-строительных материалов на сегодняшний день остается нерешенной проблемой. В этой связи для создания качественного и долговечного дорожного покрытия, содержащего резиновую крошку, необходимы систематизация разрозненного мирового опыта, выявление эффективных практик, а также выявление и изучение механизма функционирования системы «резиновая крошка – битум – минеральный наполнитель», определение диапазонов варьирования факторов для достижения стабильности и качества материала.

Способы введения резиновой крошки в асфальтобетонные смеси

В настоящее время в мировой практике применяют два метода получения асфальтобетонных с резиновой крошкой: сухой и мокрый [11-13]. При сухом способе ввода резиновая крошка используется в качестве добавки к минеральному наполнителю асфальтобетона, а мокрый способ подразумевает добавление и диспергирование резиновой крошки при высокой температуре в битум и дальнейшее использование резинобитумного вяжущего в асфальтобетоне.

В *сухом способе* резиновая крошка в асфальтобетонной смеси выступает в качестве дисперсной фазы (наполнителя/заполнителя) и лишь частично в качестве модификатора битумного вяжущего. В общем виде способ введения резиновой крошки по сухому методу представлен на рис. 1.



Рис. 1. Схематичное изображение сухого метода введения резиновой крошки в асфальтобетонную смесь

Приготовление асфальтобетонных смесей с вовлечением резиновой крошки классическим сухим способом технологически осуществляется в три этапа:

1) на первом этапе смесь минеральных заполнителей разогревают до температуры 160-180 °С, добавляют в нее резиновую крошку или резиносодержащие гранулы в количестве 2...4 % от массы заполнителей и перемешивают в течение 15-30 с в шнековом или бочковом миксере. Размеры резиновой крошки в данном случае могут варьироваться от 2 до 6 мм [11, 13];

2) на втором этапе в минеральную смесь с резиновой крошкой вводится предварительно разогретый битум, и смесь перемешивается 2-3 мин;

3) на третьем этапе асфальтобетонная смесь направляется в накопительный бункер для готовой смеси, где может храниться в течение 3-5 часов. Также на данном этапе возможна частичная модификация битумного вяжущего резиновой крошкой с последующим улучшением вязкоупругих свойств смеси.

Технологически классический сухой способ введения реализуется в асфальтобетонном смесителе и считается наиболее простым и низкзатратным. Однако у него есть ряд недостатков:

- сложность контроля равномерного распределения резиновой крошки в объеме материала;

- неконтролируемое набухание резиновой крошки в объеме, что впоследствии приводит к преждевременному разрушению асфальтобетонного покрытия.

Также при классическом сухом способе ввода резиновой крошки в асфальтобетон ценные свойства каучука используются не полностью.

В настоящее время традиционные технологии введения в состав асфальтобетона резиновой крошки претерпевают некоторые изменения. Современные технические решения по совершенствованию сухого способа, предложенные различными научными коллективами, предусматривают использование в асфальтобетоне комплексных композиций и модификаторов на основе резиновой крошки [14, 15]. Так, в настоящее время разрабатываются модификаторы для асфальтобетона, содержащие кроме резиновой крошки различные функциональные добавки. Коллективом ученых [14] был разработан концентрат резинобитумного вяжущего. Данный концентрат имеет сухую гранулированную форму и содержит 10...50 % активного резинового порошка фракции от 0 до 0,63 мм, пластифицирующий компонент, битум нефтяной дорожный

и стабилизирующую добавку. Авторы [15] предлагают концентрат полимеррезинобитумного вяжущего, также имеющий сухую гранулированную форму и в добавление к перечисленным компонентам содержащий 10...50 % термоэластопласта. Авторы данных изобретений предлагают использовать концентраты резинобитумного вяжущего и полимеррезинобитумного вяжущего как сухим, так и мокрым способом. Так, при сухом способе концентраты вяжущих вводятся в асфальтобетонную смесь непосредственно в момент ее приготовления на асфальтобетонном заводе (АБЗ). Для этих целей, как правило, применяется линия подачи стабилизирующей добавки.

В *мокрой* способе резиновая крошка выполняет функцию модификатора битумного вяжущего. Эффективность действия модификатора зависит от уровня деструкции и девулканизации резины в битуме, который впоследствии используется при изготовлении асфальтобетона. В отличие от сухого метода, термин «мокрый метод» используется для описания целой группы технологий, которые отличаются друг от друга применяемыми условиями. В общем виде данный способ представлен на рис. 2.



Рис. 2. Схематичное изображение мокрого метода введения резиновой крошки в асфальтобетонную смесь

Технологически в общем виде мокрый способ приготовления асфальтобетонных смесей с предварительным вовлечением резиновой крошки в битумное вяжущее осуществляется в 3 этапа:

1) на первом этапе в предварительно разогретый до температуры 180-220 °C битум вводят резиновую крошку в количестве от 3 до 30 %. Дополнительно могут быть введены различные пластифицирующие вещества, добавки и девулканизаторы [16, 17]. Далее смесь перемешивают в течение 45-60 мин [12] до однородного состояния, на достижение которого оказывают влияние несколько факторов: температура смешения, продолжительность реакции, тип смесительного оборудования, размер и текстура резиновой крошки, соотношение ароматической и нафтеновой частей в битуме [11, 18];

2) на втором этапе в предварительно нагретые минеральные материалы вводится резинобитумное вяжущее, и асфальтобетонная смесь перемешивается в течение 15-45 секунд;

3) на третьем этапе готовая асфальтобетонная смесь направляется в бункер, где может храниться в течение 3-5 часов.

В результате данного процесса получается асфальтобетон с высокой трещиностойкостью при низких температурах, повышенным сроком службы покрытия и удлинёнными межремонтными сроками. Основными недостатками этого способа являются [19, 20]:

- использование различных пластификаторов и дополнительного смесительного оборудования;
- снижение адгезии вяжущего, сдвиговых показателей асфальтобетона и его водостойкости;
- трудности контроля процесса деструкции резиновой крошки в битумном вяжущем.

Особенности мокрого способа и факторы, влияющие на процесс девулканизации

Основной задачей мокрого метода является получение модифицированного резинобитумного вяжущего (РБВ) с улучшенными эксплуатационными свойствами по сравнению с исходным битумом. Получение РБВ основывается на процессах

набухания, частичной девулканизации, диспергирования и растворения резиновой крошки в битумном вяжущем [10, 21-24]. Данные процессы при получении резинобитумного вяжущего можно осуществить двумя способами. Первый способ заключается в предварительном выдерживании резиновой крошки в пластификаторе ароматической природы при температурах до 230 °С в течение нескольких часов и в последующем смешении с битумом. Полученные данным способом РБВ характеризуются относительной гомогенностью [21]. Второй способ заключается в продолжительном перемешивании резиновой крошки с битумом при температурах 180-200 °С в течение от 45 мин до 6 часов [21].

Таким образом, величина и степень модифицирования битумного вяжущего резиновой крошкой могут сильно различаться за счет влияния различных факторов. Такими факторами являются:

- состав дисперсионной среды (пластификатора/битума);
- геометрические размеры и шероховатость поверхности резиновой крошки;
- температура и продолжительность процесса смешения;
- рецептура РБВ (в том числе наличие минеральной дисперсной фазы и т.д.).

Таким образом, наличие большого количества разнообразных факторов предопределяет вариативность результатов. С целью изучения этого вопроса рассмотрим существующий опыт получения резинобитумных вяжущих.

Современный мировой опыт получения резинобитумных вяжущих

Современные отечественные и зарубежные исследования показывают, что для повышения эксплуатационных свойств дорожного асфальтобетона при любой схеме введения резиновых частиц необходимо тонкое измельчение используемой резины. Отмечается, что даже при самом мелком измельчении резины (например до размера 1 мм), крошка не растворяется в битуме, а находится в нём в виде частично набухшей дисперсной фазы [25, 26].

Группой ученых [27] были проведены исследования влияния размеров крошки на температуру и продолжительность приготовления РБВ, необходимые для диспергирования резиновой крошки до размеров, не превышающих 0,1 мм. РБВ получали в две стадии: на первой стадии получали суспензию, а на второй – конечный продукт. Это обусловлено тем, что при длительном высокотемпературном воздействии химический состав битума изменяется с увеличением высокомолекулярных и уменьшением низкомолекулярных соединений. Однако получить суспензию на основе резиновой крошки с размерами частиц менее 1 мм не удалось. Данный факт объясняется тем, что размеры частиц исходной резиновой крошки достаточно большие (3-5 мм), для их полного смачивания оказалось недостаточным количество пластификатора и потребовалось дополнительное количество вяжущего. Увеличение температуры до 235...245 °С привело к выгоранию пластификатора, частицы резины оказались в полном объеме не смоченными и начали распадаться с образованием низкомолекулярных соединений. Полный распад наблюдался через 3,0-3,5 ч. Также в работе [27] установлено влияние на свойства вяжущего соотношения максимального диаметра резиновой крошки к минимальному. Показано, что при величине данного соотношения, равной 10, наблюдаются полная деструкция мелких частиц резины с образованием низкомолекулярных соединений и только частичная деструкция крупных частиц. Результатом указанного исследования является получение резинобитумного вяжущего с температурой размягчения, равной +42 °С, и температурой хрупкости – -25 °С. Тогда как температура размягчения исходного битума была +44 °С. Из представленных результатов (в том числе зарубежного опыта [28]) следует, что для получения РБВ рационально использовать резиновую крошку, для которой выполняются следующие условия:

- максимальный размер частиц резиновой крошки – не более 1-3 мм;
- соотношение максимального размера резиновой крошки к минимальному – менее 10.

Другим важным фактором, влияющим на качество резинобитумного вяжущего, является количество стадий процесса его приготовления. Так, авторами исследования [29] было изучено влияние стадийности технологического процесса приготовления РБВ на его свойства. Авторами указанной работы критикуется способ предварительного пластифицирования резиновой крошки в масле из-за того, что применение большого количества масла для пластификации приводит к снижению вязкости и теплостойкости конечного продукта. В этой связи в работе [29] было рассмотрено несколько способов приготовления РБВ:

– одностадийный способ, при котором все компоненты были загружены в один реактор;

– второй способ заключался в предварительной термомеханической обработке 37,5 % резиновой крошки в среде, содержащей 50 % битума и 12,5 % нефтяного масла, для получения концентрированной суспензии резинобитумной композиции. Далее 52 % указанной композиции совмещалось с 48 % битума;

– третий способ заключался в повторении второго с вводом резиновой крошки тремя равными частями.

По результатам исследований авторы сделали заключение о предпочтительности второго способа, продемонстрировавшего сравнительно лучшие показатели качества резинобитумных вяжущих.

Также известен двухстадийный способ приготовления резинобитумного вяжущего [30], когда отработанная резина предварительно измельчается для получения частиц с размером не более 1,5 мм. Далее 30...60 % резиновой крошки термомеханическим способом перемешивается с 30...60 % нефтяного битума марки БНД 60/90 (БНД 90/130) и 10...25 % нефтяного масла, содержащего ароматические углеводороды не менее 50 %. На следующем этапе производства полученная смесь (30...60 %) термомеханически смешивается с 40...70 % битума нефтяного дорожного марки БНД 60/90 (БНД 90/130). Авторами изобретения сообщается, что полученные таким методом дорожные смеси показывают улучшение таких показателей, как однородность, прочность, морозо-, трещино- и влагостойкость, устойчивость к высоким температурам, повышается срок службы дорожных покрытий.

Отсюда следует, что стадия предварительной пластификации резиновой крошки в технологии резинобитумных вяжущих является обязательной. Однако её эффективность зависит от вида используемого пластификатора. В качестве пластификаторов рассматриваются различные продукты и вещества, имеющие химическое сродство к резиновой крошке, например углеводородные масла, смолы, остаточные продукты и полупродукты нефтепереработки. В работе [31] представлены результаты оценки применимости в качестве пластификатора углеводородных сред, содержащих большое количество высокомолекулярных ароматических соединений и смол (асфальтит, тяжелый газойль каталитического крекинга, экстракт селективной очистки масел и прямогонный гудрон). По данным флуоресцентной микроскопии установлено, что среди выбранных диспергирующих агентов лучшей растворяюще-диспергирующей способностью по отношению к резине обладают тяжелый газойль каталитического крекинга и экстракт селективной очистки масел, что объясняется высоким соотношением парафинафтеновых веществ и асфальтенов в данных продуктах и соответственно более низкой вязкостью системы [31].

Авторами [32] изучалось влияние добавки нефтеполимерной смолы на качественные показатели резинобитумных вяжущих. Было установлено снижение температуры размягчения РБВ и увеличение их пенетрации при возрастании содержания нефтеполимерной смолы в резинобитумном вяжущем. Введение нефтеполимерной смолы в РБВ позволяет улучшить совместимость нефтяного битума и резиновой крошки за счет деструкции и сшивки частиц резины и конденсированных компонентов битума в присутствии смол. Однако в [33] отмечается отсутствие заметного улучшения свойств резинобитумного вяжущего при пластифицировании резиновой крошки смолами и высокомолекулярными ароматическими углеводородами битумов. По мнению авторов

указанной работы, этот эффект возникает вследствие стеклования этих компонентов при высоких температурах.

В работе [34] утверждается, что эффективным девулканизатором и растворителем резиновой крошки является нафталиновая фракция каменноугольной смолы. Растворение крошки размером 5-7 мм происходит при температуре 200-230 °С за 3-4 часа (в растворенном композите допускается содержание неоднородностей размером менее 0,1 мм). Отмечается, что дальнейшее увеличение продолжительности процесса с целью уменьшения размеров неоднородностей нецелесообразно, так как они не влияют на физико-механические свойства асфальтобетона на основе резинобитумного композита.

Разработан также способ пластификации резиновой крошки [35], который осуществляют путем пропускания набухшей в нефтяном битуме резины через аппарат-пластификатор при температуре 225-235 °С. Продолжительность процесса обработки варьируется от 30 минут до нескольких часов. В результате набухшая резина постепенно пластифицируется и органические компоненты переходят в раствор [35]. Однако в работе [33] авторами утверждается, что при температуре приготовления резинобитумного вяжущего выше 208-230 °С в резиновой крошке, введенной в битум, преобладают деструктивные процессы, которые в зависимости от продолжительности и температуры могут привести к полной деструкции резины, при этом образуются низкокипящие углеводороды, являющиеся разжижителями битума. Это также вызывает и деструкцию углеводородных компонентов битума.

Обобщение опыта по применению резиновой крошки в технологии асфальтобетонов приведено в таблице.

Основные факторы и диапазоны их варьирования для получения резинобитумных вяжущих

Факторы процесса получения РБВ	Рекомендации исследователей	Обоснование рекомендаций
Размер резиновой крошки и соотношение максимального и минимального её размера	1-3 мм [27, 28] соотношение размеров – менее 10 [27]	Резиновая крошка менее 1 мм имеет более высокую удельную поверхность и требует дополнительного введения пластификатора для смачивания ее поверхности, что отрицательно сказывается на свойствах исходного битума [27]
Температура процесса	180-220 °С [11, 12, 33, 34]	При температурах выше 230 °С в резиновой крошке, введенной в битум, преобладают деструктивные процессы, которые могут привести к полной деструкции резины [33]
Количество стадий процесса	Двухстадийный способ, включающий предварительную пластификацию резиновой крошки [29-32, 34]	При одностадийном процессе приготовление РБВ требует большего времени, что негативно отражается на качестве продукта (за счет протекающих процессов окисления и старения) и на производительности установок [29]
Пластификаторы резиновой крошки	Углеводородные среды, содержащие большое количество высокомолекулярных ароматических соединений и смол [21, 31, 32, 34]	Пластификаторы, обладающие высоким соотношением «парафинафтеновые вещества: асфальтены», способствуют ускорению процессов набухания и диспергирования молекул каучука [31]

Анализ данных и гипотез, представленных авторами различных публикаций, показывает, что в настоящее время отсутствует единое научное знание о физических и

химических механизмах, приводящих к получению резинобитумных вяжущих, обладающих высокими эксплуатационными свойствами и имеющих характерные признаки, присущие композиционным материалам.

В большинстве случаев процесс термомеханической пластификации резины авторы описывают следующим образом: при совместной термомеханической обработке измельченная резина набухает в масляных фракциях битума, что ослабляет межмолекулярные связи в резине. В результате продолжающихся подвода тепла и механических воздействий происходит разрыв по этим ослабленным связям, то есть осуществляется деструкция / девулканизация¹ резины с образованием каучукового вещества, которое структурирует битум [31, 35]. Схематично механизм термомеханической пластификации резиновой крошки представлен на рис. 3. Структурирующей функцией каучукового вещества объясняются эффекты повышения качества резинобитумного вяжущего и асфальтобетона на его основе.

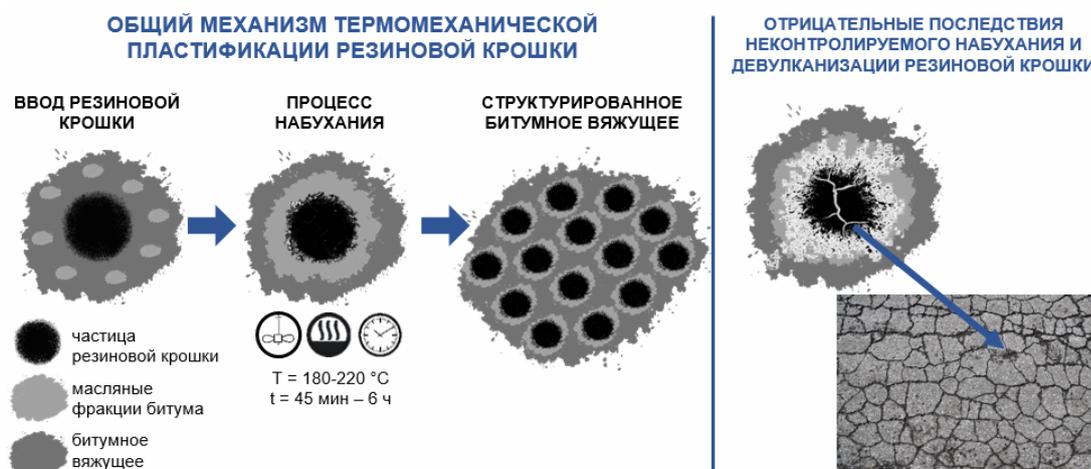


Рис. 3. Механизм термомеханической пластификации резиновой крошки

Выводы

1. На основе анализа научно-технической литературы [10-35] установлено, что для достижения равномерной девулканизации резины и улучшения физико-химических свойств РБВ отношение максимального размера резиновой крошки к минимальному должно быть наименьшим, а размер частиц резиновой крошки – не более 1-3 мм. Выявлена необходимость предварительной обработки резиновой крошки в пластификаторах, которые должны характеризоваться высоким соотношением парафинафтеновых веществ и наличием асфальтенов и, как правило, более низкой вязкостью.

2. Установлено наличие общей проблемы, связанной с обеспечением эффективного диспергирования и равномерного объемного распределения модификаторов как в среде-носителе, так и в модифицируемой матрице битумного вяжущего. Отсутствие знаний об особенностях процесса структурообразования, объясняющих влияние различных факторов на эффективность процесса модификации битумов резиновой крошкой, приводит к вариативности результатов исследований и неоднозначности рекомендуемых технологических параметров. В настоящий момент также отсутствуют научно обоснованные критерии получения эффективных устойчивых дисперсионных систем, содержащих резиновую крошку. Кроме того, отсутствие знаний о процессе взаимодействия жидких сред-носителей и девулканизированной резиновой крошки не позволяет эффективно управлять процессом ее растворения для получения дисперсных систем с заданными параметрами свойств и их стабильностью.

3. Недостаточно изучено влияние резиновой крошки в составе резинобитумного вяжущего на структуру и свойства асфальтобетона, так как при добавлении резиновой

¹ Авторы работ [31, 35] предполагают, что происходит деструкция связей S-S. Однако прямых доказательств нет.

крошки в составе битумного вяжущего в асфальтобетон изменяется состояние контакта между материалами в его структуре, и в случае, если не будет обеспечено прочное сцепление в зоне контакта «минеральный материал – резинобитумное вяжущее», дорожное покрытие, устроенное с применением такого асфальтобетона, под действием всевозрастающих нагрузок от транспортных средств будет подвержено преждевременному разрушению.

Список литературы

1. По материалам исследовательской компании «Текарт». Переработка шин в России и мире // Твердые бытовые отходы. – 2018. – № 6. – С. 32–36. – URL: <https://techart.ru/files/publications/tverdye-bytovye-othody-06-2018.pdf>. Дата обращения: 01.04.2022.
2. Дярькин, Р.А. Обеспечение экологической безопасности урбанизированных территорий путем утилизации изношенных автомобильных шин в строительстве / Р.А. Дярькин, В.С. Демьянова // Вестник Волгогр. гос. архит.- строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2013.– Вып. 32 (51). – С. 200–205.
3. Худякова, Т.А. Анализ динамики и перспектив утилизации автомобильных шин в рамках концепции развития умных городов / Т.А. Худякова, А.В. Шмидт, С.А. Шмидт // Вестник ЮУрГУ. – 2019. – №4. – С. 42–54.
4. Анализ рынка переработки резинотехнических изделий в России. – URL: <http://colesa.ru/news/23249>. – Дата обращения: 01.04.2022.
5. Утилизация шин. – URL: <http://tma-rf.ru/directions/utilizatsiya-shin/>. – Дата обращения: 01.04.2022.
6. Змеева, А.А. Автомобильные покрышки как проблема утилизации в России / А.А. Змеева // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 11–1. – С. 138–141.
7. Утилизация изношенных автомобильных шин. – URL: <https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=302>. – Дата обращения: 01.04.2022.
8. Шестаков, Н.И. Сравнительный анализ биопозитивности проектных решений объектов дорожно-транспортного комплекса / Н.И. Шестаков, К.Л. Чертес, Е.В. Ткач // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2022. – № 3 (39). – С. 106–120.
9. Беляев, П.С. Решение проблемы утилизации полимерных отходов путем их использования в процессе модификации дорожного вяжущего / П.С. Беляев, О.Г. Маликов, С.А. Меркулов, Д.Л. Полушкин, В.А. Фролов // Строительные материалы. – 2013. – № 10. – С. 38–41.
10. Dong, D. Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt / D. Dong, X. Huang, X. Li, Zhang L. // Construction and Building Materials. – 2012. – № 29. – P. 316–322.
11. Ali, H. Assessment the performance of asphalt mixtures modified with waste tire rubber at high temperatures / H. Ali, H. J. Hasan // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1895 (1). – 012026.
12. Lo Presti, D. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review / D. Lo Presti // Construction and Building Materials. – 2013. – №. 49. – P. 863–881.
13. Dantas Neto, S.A. Influence of cryogenic and ambient crushed rubber on the mechanical properties of hot mix asphalt / S.A. Dantas Neto, M.M. Farias, J.C. Pais // Proc Asphalt Rubber Conf, Nanjing, China. –2009. – P. 341–354.
14. Патент №2735306 РФ. МПК C08L95/00. Концентрат резинобитумного вяжущего / Анисимов С.А., Шимов А.А., Тезин А.К.; Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное объединение «Градиент». № 2020102475; заявл. 22.01.2020; опубл. 29.10.2020; Бюл. № 31.
15. Патент №2718069 РФ. МПК C08L95/00. Концентрат полимеррезинобитумного вяжущего / Анисимов С.А., Шимов А.А., Тезин А.К.; Общество с ограниченной

ответственностью Научно-производственное объединение «Градиент». № 2020102472; заявл. 22.01.2020; опубл. 30.03.2020; Бюл. № 10.

16. Аюпов, Д.А. Девулканизация резиновой крошки в среде битума / Д.А. Аюпов, А.В. Мурафа, Д.Б. Макаров, Ю.Н. Хакимуллин, В.Г. Хозин // Структура и динамика молекулярных систем: сб. трудов Международной НТК. – Яльчик, 2010. – С. 14.

17. Аюпов, Д.А. Битум-полимерные композиции, модифицированные девулканизатами резин / Д.А. Аюпов, А.В. Мурафа, Ю.Н. Хакимуллин, В.Г. Хозин // Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии: сб. научных трудов. – Казань, 2010. – Т. 1. – С. 478–482.

18. XiaoPing, W. Grafting waste rubber powder and its application in asphalt / W. XiaoPing, H. Li, W. HaiJian, L. HuiLin, J. DeMing // Construction and Building Materials. – 2021. – № 271. – 121881.

19. Лукьянова, М.А. Обоснование рационального состава битумных вяжущих, модифицированных резиновой крошкой / М.А. Лукьянова, Е.М. Вахьянов // КузГТУ. – 2015. – №4. – С.143–146.

20. Аюпов, Д.А. Современные способы регенерации резин и возможности использования их в строительной отрасли / Д.А. Аюпов, А.В. Мурафа, Ю.Н. Хакимуллин, В.Г. Хозин // Известия КазГАСУ. – 2010. – № 1 (13). – С. 260–263.

21. Галдина, В.Д. Использование резиновой крошки для модификации битумов / В.Д. Галдина, В.С. Новиков // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. – С. 660–665.

22. Руденский, А.В. Резинобитумные вяжущие. Различные варианты технологии приготовления / А.В. Руденский, О.Н. Никонова // Дороги и мосты. – 2008. – № 1(19). – С. 215–223.

23. Иванов, С.А. Обоснование влияния технологии производства резинобитумного вяжущего на физико-химические свойства / С.А. Иванов, Е.М. Вахьянов, С.Н. Шабаев // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. – 2016. – № 1(51). – С. 222–228.

24. Беляев, П.С. Повышение качества нефтяных битумов путем модификации продуктами переработки изношенных автомобильных шин / П.С., Беляев О.Г. Маликов, М.В. Забавников, Соколов А.Р. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 1. – С. 63–69.

25. Прокопец, В.С. Повышение эффективности дорожно-строительных материалов механоактивационным модифицированием исходного сырья: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.11 / В.С. Прокопец. – Белгород: БГТУ, 2005. – 42 с.

26. Алфимова, Н.И. Механоактивации как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении / Н.И. Алфимова, В.В. Калатоzi, С.В. Карацупа, Я.Ю. Вишнеvская, М.С. Шейченко // БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 85–89.

27. Шабаев, С.Н. Влияние размера резиновой крошки на технологические параметры получения резинобитумного вяжущего / С.Н. Шабаев, С.А. Иванов, Е.М. Вахьянов // Молодой ученый. – 2013. – № 2 (49). – С. 75–77.

28. Hyang, J. Influence of crumb rubber particle sizes on rutting, low temperature cracking, fracture, and bond strength properties of asphalt binder / J. Hyang, O-A. Wang // Materials and Structures. – 2021. – №54. – URL. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01647-4>

29. Иванов, С.А. Исследование влияния стадийности технологического процесса получения композиционных резинобитумных вяжущих на их свойства / С.А. Иванов, С.Н. Шабаев // Вестник ВСГУТУ. – 2016. – № 4. – С. 153–158.

30. Патент №2655334 РФ. МПК С08L95/00, С08L17/00, С04В26/26. Композиционное резинобитумное вяжущее и способ его получения / Шабаев С.Н., Иванов С.А., Вахьянов Е.М.; Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. №2016118144; заявл. 10.05.2016; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 15.

31. Нгуен Тхи Тхань Иен. Разработка научно-технологических основ производства резиносодержащих дорожных вяжущих: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 / Нгуен Тхи Тхань Иен. – М., 2021. – 119 с.
32. Юрченко, О.В. Влияние добавок нефтеполимерной смолы на пластичные свойства резинобитумных вяжущих / О.В. Юрченко, О.В. Никонов, В.С. Смолко, А.О. Шрубко // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – Минск: БГТУ, 2018. – № 1. – С. 137–143.
33. Галдина, В.Д. Модифицированные битумы / В.Д. Галдина. – Омск: СибАДИ, 2009. – 228 с.
34. Патент №2327719 РФ. С08L 95/00, С08L 17/00, С08J 3/20. Битумно-резиновая композиция и способ ее получения / Алексеенко В.В., Кижняев В.Н., Верещагин Л.И., Житов Р.Г., Смирнов А.И., Митюгин А.В. № 2007113596/04; заявл. 11.04.2007; опубл. 27.06.2008, Бюл. № 18.
35. Материалы из резиновых и каучуковых отходов // bibliotekar.ru. – URL: <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-110-stroitelnye-materialy/38.htm?ysclid=137fadg6k1>. – Дата обращения: 01.04.2022.

References

1. According to the materials of the research company «Tekart». Tire processing in Russia and the world // Solid household waste. – 2018. – No. 6. – P. 32–36. – URL: <https://techart.ru/files/publications/tverdye-bytovye-othody-06-2018.pdf>. Date of access: 04/01/2022.
2. Dyarkin, R.A. Ensuring the environmental safety of urbanized territories by recycling worn-out automobile tires in construction / R.A. Dyarkin, V.S. Demyanova // Vestnik Volgogr. state archit.-builds. university Ser.: Construction and architecture. – 2013. – Issue. 32 (51). – P. 200–205.
3. Khudyakova, T.A. Analysis of the dynamics and prospects for the utilization of automobile tires within the framework of the concept of development of smart cities / T.A. Khudyakova, A.V. Shmidt, S.A. Shmidt // Bulletin of the South Ural State University. – 2019. – No. 4. – P. 42–54.
4. Analysis of the market for the processing of rubber products in Russia. – URL: <http://colesa.ru/news/23249>. – Date of access: 04/01/2022.
5. Tire recycling. – URL: <http://tma-rf.ru/directions/utilizatsiya-shin/>. – Date of access: 04/01/2022.
6. Zmeeva, A.A. Automobile tires as a recycling problem in Russia / A.A. Zmeeva // Modern trends in the development of science and technology. – 2016. – No. 11–1. – P. 138–141.
7. Recycling of used car tires. – URL: <https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=302>. – Date of access: 04/01/2022.
8. Shestakov, N.I. Comparative analysis of the biopositivity of design solutions for road transport facilities / N.I. Shestakov, K.L. Chertes, E.V. Tkach // Biospheric compatibility: man, region, technology. – 2022. – No. 3 (39). – P. 106–120.
9. Belyaev, P.S. Solving the problem of recycling polymeric wastes by using them in the process of modifying road binder / P.S. Belyaev, O.G. Malikov, S.A. Merkulov, D.L. Polushkin, V.A. Frolov // Stroitel'nye materialy. – 2013. – No. 10. – P. 38–41.
10. Dong, D. Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt / D. Dong, X. Huang, X. Li, Zhang L. // Construction and Building Materials. – 2012. – № 29. – P. 316–322.
11. Ali, H. Assessment the performance of asphalt mixtures modified with waste tire rubber at high temperatures / H. Ali, H. J. Hasan // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1895 (1). – 012026.
12. Lo Presti, D. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review / D. Lo Presti // Construction and Building Materials. – 2013. – №. 49. – P. 863–881.

13. Dantas Neto, S.A. Influence of cryogenic and ambient crushed rubber on the mechanical properties of hot mix asphalt / S.A. Dantas Neto, M.M. Farias, J.C. Pais // Proc Asphalt Rubber Conf, Nanjing, China. –2009. – P. 341–354.
14. Patent No. 2735306 RF. IPC C08L95/00. Concentrate of rubber-bitumen binder / Anisimov S.A., Shimov A.A., Tezin A.K.; Limited Liability Company Research and Production Association «Gradient». No. 2020102475; appl. 01/22/2020; published 29.10.2020; Bull. No. 31.
15. Patent No. 2718069 RF. IPC C08L95/00. Concentrate of polymer-rubber-bitumen binder / Anisimov S.A., Shimov A.A., Tezin A.K.; Limited Liability Company Research and Production Association «Gradient». No. 2020102472; appl. 01/22/2020; published 03/30/2020; Bull. No. 10.
16. Ayupov, D.A. Devulcanization of crumb rubber in bitumen / D.A. Ayupov, A.V. Murafa, D.B. Makarov, Yu.N. Khakimullin, V.G. Khozin // Structure and dynamics of molecular systems: Sat. Proceedings of the international scientific and technical complex. – Yalchik, 2010. – P. 14.
17. Ayupov, D.A. Bitumen-polymer compositions modified with rubber devulcanizates / D.A., Ayupov A.V. Murafa, Yu.N. Khakimullin, V.G. Khozin // Achievements and problems of materials science and modernization of the construction industry: Sat. scientific works. – Kazan, 2010. – V. 1. – P. 478–482.
18. XiaoPing, W. Grafting waste rubber powder and its application in asphalt / W. XiaoPing, H. Li, W. HaiJian, L. HuiLin, J. DeMing // Construction and Building Materials. – 2021. – № 271. – 121881.
19. Lukyanova, M.A. Substantiation of the rational composition of bituminous binders modified with crumb rubber / M.A. Lukyanova, E.M. Vakhyanov // KuzGTU. – 2015. – No. 4. – P.143–146.
20. Ayupov, D.A. Modern methods of rubber regeneration and the possibility of using them in the construction industry / D.A. Ayupov, A.V. Murafa, Yu.N. Khakimullin, V.G. Khozin // Izvestiya KazGASU. – 2010. – No. 1 (13). – P. 260–263.
21. Galdina, V.D. The use of crumb rubber for bitumen modification / V.D. Galdina, V.S. Novikov // Education. Transport. Innovation. Construction: Collection of materials of the IV National scientific and practical conference. – Omsk: Siberian State Automobile and Road University (SibADI), 2021. – P. 660–665.
22. Rudensky, A.V. Rubber binders. Various options for cooking technology / A.V. Rudensky, O.N. Nikonova // Roads and bridges. – 2008. – No. 1(19). – P. 215–223.
23. Ivanov, S.A. Substantiation of the influence of the production technology of rubber-bitumen binder on the physical and chemical properties / S.A. Ivanov, E.M. Vakhyanov, S.N. Shabaev // Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after. N. Isanova. – 2016. – No. 1(51). – P. 222–228.
24. Belyaev, P.S. Improving the quality of oil bitumen by modifying the products of the processing of worn tires / P.S. Belyaev, O.G. Malikov, M.V. Zabavnikov, A.R. Sokolov // Bulletin of the Tambov State Technical University. – 2003. – V. 9. – No. 1. – P. 63–69.
25. Prokopets, V.S. Improving the efficiency of road construction materials by mechanical activation modification of the feedstock: Ph.D. dis. ... Dr. tech. Sciences: 05.23.11. – Belgorod: BSTU, 2005. – 42 p.
26. Alfimova, N.I. Mechanical activation as a way to increase the efficiency of using raw materials of various genesis in building materials science / N.I. Alfimova, V.V. Kalatozi, S.V. Karatsupa, Ya.Yu. Vishnevskaya, M.S. Sheichenko // BSTU im. V. G. Shukhov. – 2016. – No. 6. – P. 85–89.
27. Shabaev, S.N. Influence of the size of rubber crumb on the technological parameters of obtaining a rubber-bitumen binder / S.N. Shabaev, S.A. Ivanov, E.M. Vakhyanov // Young scientist. – 2013. – No. 2 (49). – P. 75–77.
28. Hyang, J. Influence of crumb rubber particle sizes on rutting, low temperature cracking, fracture, and bond strength properties of asphalt binder / J. Hyang, O-A. Wang // Materials and Structures. – 2021. – №54. – URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01647-4>

29. Ivanov, S.A. Investigation of the influence of the staging of the technological process of obtaining composite rubber-bitumen binders on their properties / S.A. Ivanov, S.N. Shabaev // Bulletin of the ESGUTU. – 2016. – No. 4. – P. 153–158.
30. Patent No. 2655334 RF. IPC C08L95/00, C08L17/00, C04B26/26. Composite rubber-bitumen binder and method of its production / Shabaev S.N., Ivanov S.A., Vakhyanov E.M.; Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev. No. 2016118144; appl. 05/10/2016; published May 25, 2018, Bull. No. 15.
31. Nguyen Thi Thanh Yen. Development of scientific and technological foundations for the production of rubber-containing road binders: dis. ... cand. of Sciences: 05.17.07 / Nguyen Thi Thanh Yen. – M., 2021. – 119 p.
32. Yurchenko, O.V. Influence of additives of petroleum polymer resin on the plastic properties of rubber-bitumen binders / O.V. Yurchenko, O.V. Nikonov, V.S. Smolko, A.O. Shrubok // Proceedings of BSTU. Ser. 2, Chemical technology, biotechnology, geoecology. – Minsk: BSTU, 2018. – No. 1. – P. 137–143.
33. Galdina, V.D. Modified bitumens / V.D. Galdina.– Omsk: SibADI, 2009. – 228 p.
34. Patent No. 2327719 RF. C08L 95/00, C08L 17/00, C08J 3/20. Bitumen-rubber composition and method of its production / Alekseenko V.V., Kizhnyaev V.N., Vereshchagin L.I., Zhitov R.G., Smirnov A.I., Mityugin A.V. No. 2007113596/04; appl. 04/11/2007; published 06/27/2008, Bull. No. 18.
35. Materials from rubber and rubber waste // bibliotekar.ru. – URL: http://www.bibliotekar.ru/spravochnik_110_stroitelnye_materialy/38.htm?ysclid=l37fadg6k1. – Date of access: 04/01/2022.

УДК 691.327

DOI 10.54734/20722958_2023_1_28

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевистская, д. 68

Селяев Владимир Павлович,
доктор технических наук,
профессор, академик РААСН,
зав. кафедрой «Строительные
конструкции»
E-mail: ntorm80@mail.ru

Селяев Павел Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: ntorm80@mail.ru

Аверкина Маргарита Юрьевна,
студентка, специальность «Строительство
уникальных зданий
и сооружений»
E-mail: margo_averkina@mail.ru

ООО «Конструкционные композиты»
Россия, 431451, Республика Мордовия,
Рузаевка, ул. Промышленная, д. 5

Алимов Марат Фатихович,
кандидат технических наук,
главный инженер проекта
E-mail: ma@scomposites.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.

Selyaev Vladimir Pavlovich,
Doctor of Sciences, Professor, Academician of
the Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, Head of the
Department «Building Structures»
E-mail: ntorm80@mail.ru

Selyaev Pavel Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building Structures»
E-mail: ntorm80@mail.ru

Averkina Margarita Yurievna,
Student, specialty «Construction of unique
buildings and structures»
E-mail: margo_averkina@mail.ru

LLC "Structural composites"
Russia, 431451, Republic of Mordovia,
Ruzaevka, 5, Promyshlennaya St.

Alimov Marat Fatihovich,
Candidate of Sciences, Chief Project Engineer
E-mail: ma@scomposites.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ

В.П. Селяев, П.В. Селяев, М.Ф. Алимов, М.Ю. Аверкина

Экспериментально, путем испытания на сжатие образцов из бетона при постоянной скорости деформирования 0,5 мм/мин и частоте записи показаний «нагрузка-перемещение» 10 измерений в секунду, получены диаграммы деформирования, анализ которых подтверждает гипотезу о блочном строении структуры бетона, о дискретном механизме разрушения структуры бетона. Предложены эмпирические функции для описания процесса накопления повреждений в структуре бетона.

Ключевые слова: бетоны, отказ, разрушение, фрактал

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF CONCRETE DEFORMATION AND DESTRUCTION DURING COMPRESSION

V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, M.F. Alimov, M.Yu. Averkina

Experimentally, by compression testing of concrete samples at a constant deformation rate of 0.5 mm/min and the frequency of «load-displacement» readings recording of 10 measurements per second, deformation diagrams were obtained, the analysis of which confirms the hypothesis of the block structure of the concrete structure, and discrete mechanism of concrete structure failure. Empirical functions are proposed to describe the process of damage accumulation in the concrete structure.

Keywords: concrete, failure, destruction, fractal

Экспериментальные и теоретические исследования процессов накопления повреждений, эволюции структуры бетона при деформировании и разрушении являются актуальной задачей механики материалов. Её решение позволит глубже понять природу процессов разрушения и разработать новые эффективные методы оценки ресурса и прогнозирования долговечности изделий.

В классической механике, построенной на аксиомах об однородности и сплошности твердого тела, разрушение рассматривается как мгновенный акт, проявляющийся в отделении одной части материала о другой. При этом реализуется один из механизмов разрушения: 1 – отрывной; 2 – сдвиговой. Предполагается, что разрушение происходит тогда, когда: напряжение достигает критической величины (Галилей); касательные напряжения превосходят как сцепление материала, так и трение (Кулон); работа формоизменения достигает критической величины (Максвелл); нормальные напряжения (Ламе) или деформации (Сен-Венан) достигнут максимальных значений. Известны и другие критерии разрушения [1–3].

Однако из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что в природе практически отсутствуют материалы, которые имеют однородную структуру и не имеют дефектов, нарушений сплошности.

Гриффитс первым обратил внимание, что прочность материала зависит от дефектов структуры, наличия трещин [4].

Исследованиями структуры бетона установлено, что она является неоднородной, фрагментарной, грубогетерогенной, сформированной в виде иерархически организованной, масштабно-инвариантной системы. Отмечается повторяемость структурных образований по форме и свойствам на разных масштабных уровнях [5–7]. Следовательно, при анализе процесса разрушения структуры бетона целесообразно использовать методы механики разрушения твердых тел (Гриффитс) и фрактальной геометрии строения сплошных систем (Мандельброт) [4, 8].

Перед нами была поставлена задача экспериментально подтвердить, что разрушение структуры бетона под действием сжимающей нагрузки – это дискретно-непрерывный процесс, происходящий на различных масштабных уровнях, отличающийся подобием проявления механизма разрушения.

Для решения поставленной задачи были испытаны образцы из высокопрочного рядового (конструкционного) и легкого (теплоизоляционного) бетона. Исследования проводились на машине (модель 13-PD (401)), которая имеет следящую систему, обеспечивающую постоянную скорость деформирования; быстродействующую обратную связь с программным комплексом Wille Geotechnik.

Технические возможности испытательного комплекса позволили провести испытания на сжатие образцов из бетона при постоянной скорости нагружения $v=0,5$ мм/мин и частоте записи показаний «нагрузка-перемещение» 10 измерений в секунду.

По результатам испытаний определялись макромасштабные характеристики образцов: геометрические размеры, предел прочности при сжатии σ_{bu} , предельная относительная деформация ε_{bu} , соответствующая напряжению σ_{bu} (табл. 1, рис.1).

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Образец	Высота образца, см	σ_{bu} , МПа	$\varepsilon_{bu} \cdot 10^4$	$E \cdot 10^{-3}$ МПа	D	Энергия $U \cdot 10^4$ мДж
1	ТТБ5К	2	26	8	35	1,3	104
2	ТТБ2К	5	14	4	35	1,3	28
3	КБ10К	10	60	24	43	1,6	720
4	ВП14х7ц	14	110	24	52	1,6	1320

П р и м е ч а н и е. ТТБ5К – теплоизоляционный туфобетон, который представлен образцом в виде куба высотой 5 см; ТТБ2К – аналогичный образец-куб с высотой ребра 2 см; КБ10К – образец конструкционного бетона (КБ) с размером ребра куба 10 см (10К); ВП14х7ц – образец высокопрочного бетона в виде цилиндра диаметром 7 см и высотой 14 см.

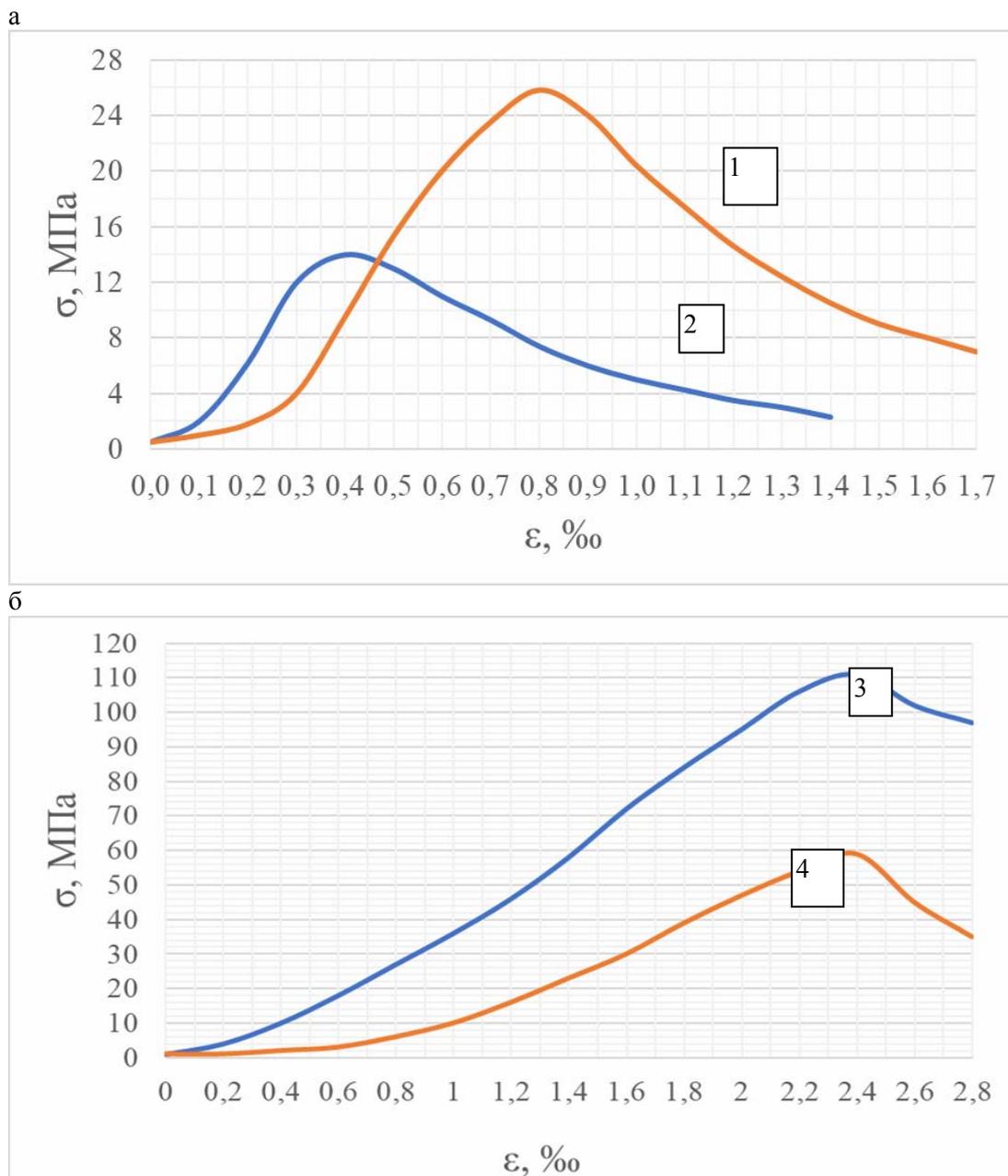


Рис. 1. Диаграммы деформирования бетонов:
а – теплоизоляционных; б – конструкционных

Расшифровка обозначений 1, 2, 3, 4 дана в табл. 1.

Представленные на рис. 1 графики « σ – ϵ » построены по усредненным значениям напряжений и относительных деформаций, полученным путем обработки экспериментальных диаграмм деформирования. При проведении испытаний программным комплексом Wille Geotechnik фиксировались значения приложенных к образцу усилий P , Н, и соответствующих перемещений Δ , мм. После испытаний расшифровку данных можно производить, имитируя замедленную скорость нагружения, позволяющую выявить особенности процесса деформирования в заданном интервале времени и перемещений. Характерные графики « P – Δ » представлены на рис. 2 и 3.

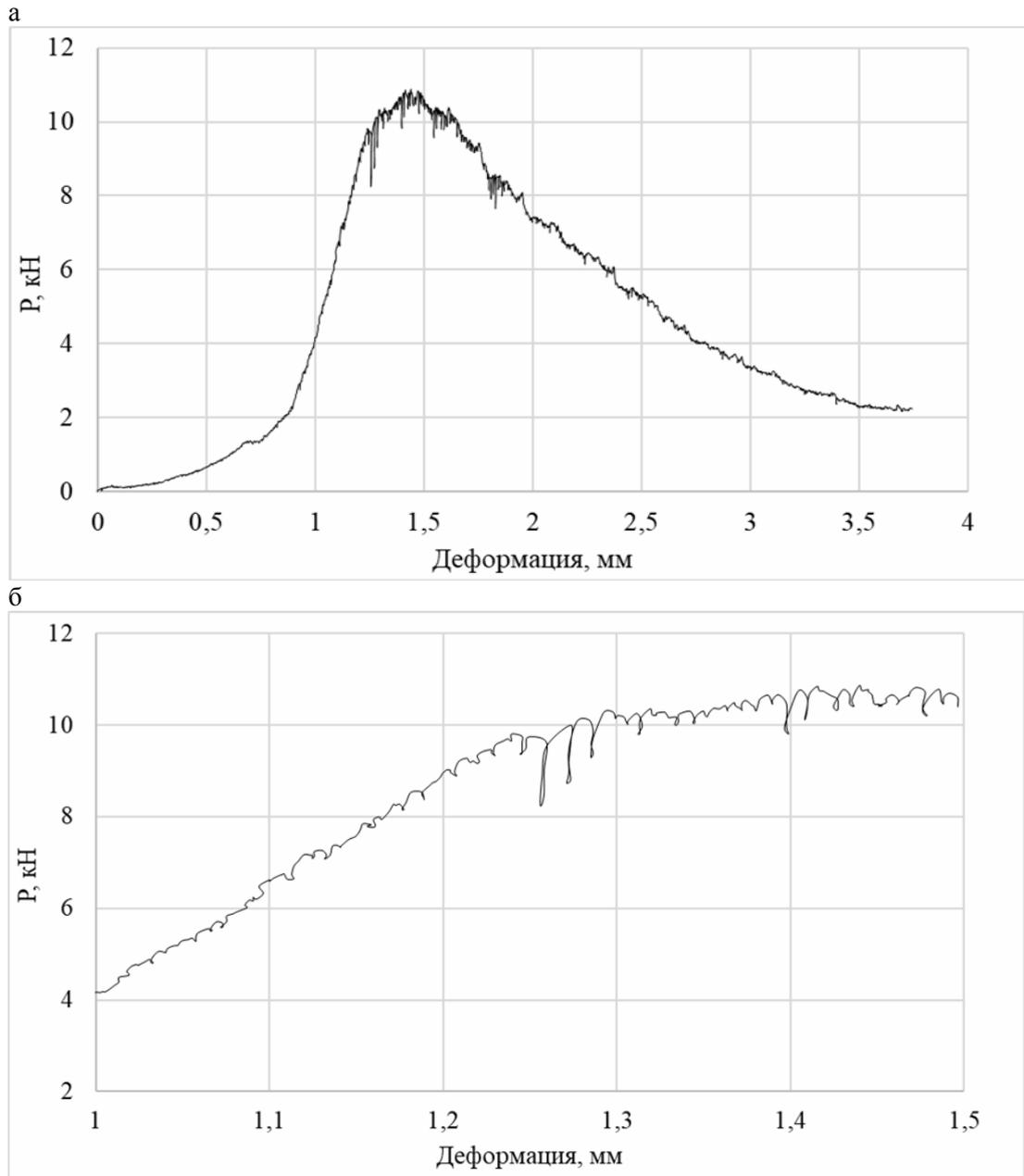


Рис. 2. Диаграмма деформирования образца ТТБ2К (а); участок диаграммы 1~1,5 мм (б)

По результатам испытаний образцов на сжатие были получены диаграммы деформирования (см. рис. 2, 3), из анализа которых следует, что разрушение бетона – это дискретно-непрерывный процесс, происходящий на различных масштабных уровнях по мере увеличения деформаций, отличающийся проявлением подобия в механизмах разрушения. Характерной особенностью дискретности разрушения является образование петель на отдельных участках диаграмм деформирования. Образование подобных петель описано в литературе по механике разрушения металлов [9].

Механизм образования петель на диаграммах деформирования металла и бетона подобен. Для металла это явление связано с движением дислокации. Для бетона это явление можно объяснить ростом микротрещин.

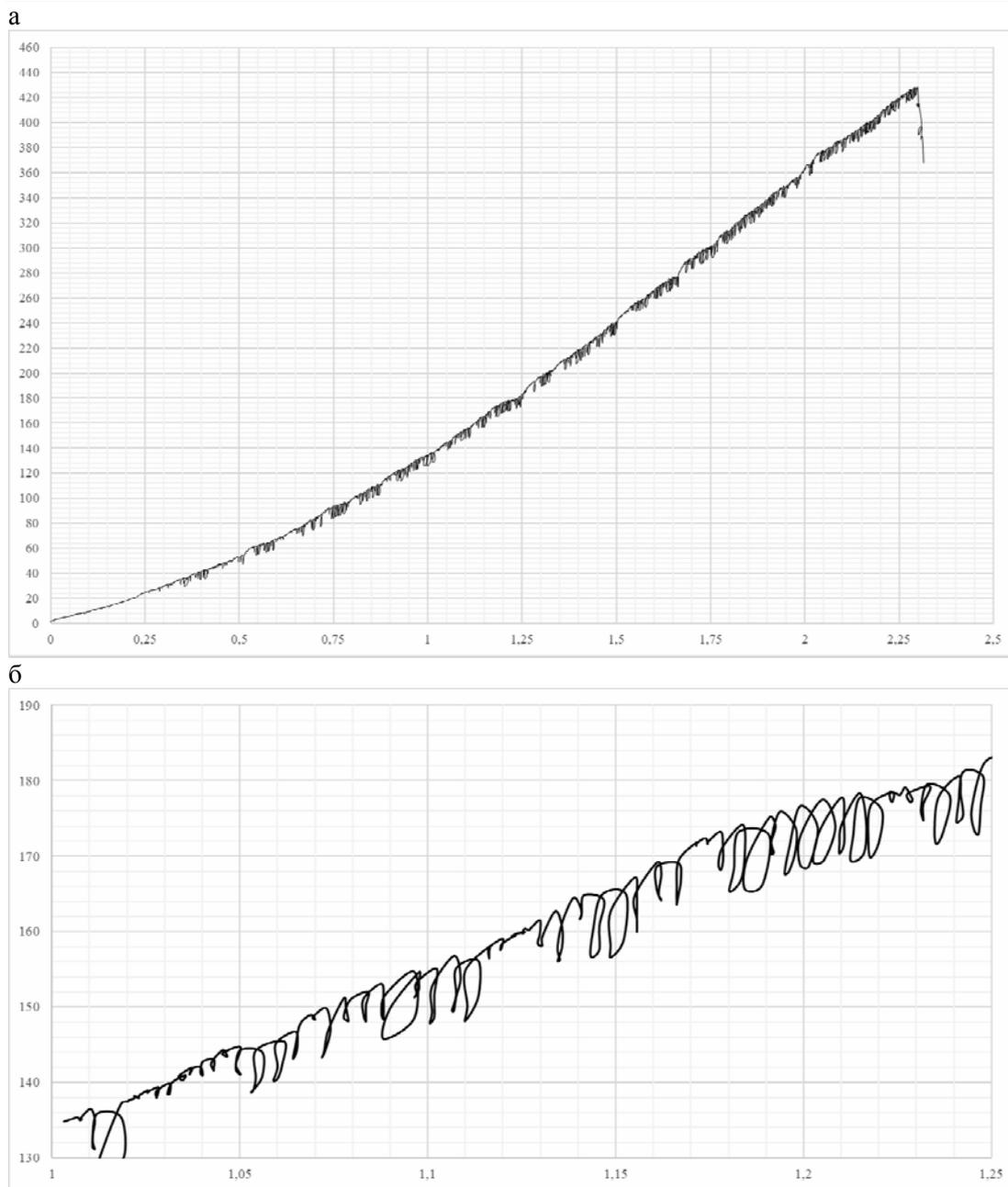


Рис. 3. Диаграмма деформирования образца из высокопрочного бетона класса В80 (а); участок диаграммы 1~1,5 мм (б)

Экспериментально установлено, что в структуре бетона возможно формирование трещин: технических – полученных в процессе изготовления изделий; силовых – образующихся в процессе деформирования. Разрушение бетона происходит в процессе развития магистральной трещины, формированию которой предшествует процесс образования, объединения микротрещин на различных масштабных уровнях структуры.

Установлено, что первые очаги микроразрушения возникают на микроуровне в местах повышенной концентрации напряжений: устье микротрещины; зона контакта матрицы жёсткого включения; участок между близко расположенными микропорами и т.д. [5].

Переход структуры бетона из некоторого исходного состояния в смежное происходит с образованием петель. По мере роста напряжений, локализованных в устье трещины, энергия упругих деформаций частично рассеивается, частично

переходит в поверхностную энергию, что сопровождается ростом трещин (образованием новых поверхностей).

Приращение поверхностной энергии трещины с ростом напряжений будет продолжаться до тех пор, пока в конце концов какое-либо препятствие не приостановит ее движение. Если препятствие демпфирующее, то произойдет сброс упругой энергии и начнется новый этап роста напряжений, но с более низкого уровня. Так образуется петля, формирование которой можно сопоставить с разрушением структурного элемента (фрактала) на определенном масштабном уровне.

В объеме материала таких локальных очагов разрушения по описанному сценарию может быть несколько, и этот локальный процесс находит отражение в локальном петлеобразном очертании диаграмм деформирования.

Можно предположить, что каждая петля – это диаграмма деформирования и разрушения структурного элемента. Тогда по параметрам диаграммы можно определить величину энергии, затраченной на разрушение фрактала. В табл. 2 приведены результаты вычислений. Определены для сравнения лишь минимальные и максимальные значения квантов энергии разрушения структурных блоков или энергии, затраченной на образование новой поверхности (участка трещины).

Т а б л и ц а 2

Фрактальная размерность D и энергия разрушения E , мДж

№ п/п (по табл.1)		Номер участка диаграммы									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	E_{\min}	0,08	0,0	0,0	0,7	0,18	0				
	E_{\max}	0,195	0,15	2,8	1,25	0,2	10,4				
	D	1,176	1,06	1,6	1,17	1,16	1,16				
3	E_{\min}	0,45	23,8	18,75	11,25	14,0	15,5	14,0	10,5	9,75	12,6
	E_{\max}	0,8	32,5	20,75	28,7	22,5	23,0	30	20	22,5	17,6
	D	1,1	1,36	1,47	1,39	1,4	1,3	1,4	1,36	1,4	1,47
4	E_{\min}	1,51	0	1,4	2,4	35,2	42				
	E_{\max}	5,4	0	60	19	39	57				
	D	1,39	1,0	1,3	1,37	1,31	1,22				

Процессы, происходящие в структуре бетона под действием сжимающих усилий, наиболее полно и адекватно представлены на диаграмме деформирования образца 1 из туфобетона.

В начальный период деформирования структурная система работает как самоупрочняющаяся. Происходит обжатие материала без разрушения структуры. На первом, втором и третьем участках замечены лишь единственные петли, свидетельствующие о разрушении структуры. Но основной объем материала работает без разрушений в диапазоне изменения нагрузки от 0 до 20 % от P_{bu} . Затем зависимость « $P-\Delta$ » имеет практически линейный характер (в диапазоне нагрузки (0,2~0,8) P_{bu}).

При нагрузке 0,8 P_{bu} начинается период развития нелинейной деформации. На этой границе фрактальная размерность достигает предельного значения (1), идет процесс формирования магистральной трещины, который завершается при нагрузке $P = P_{bu}$. После этого начинается процесс роста магистральной трещины, который обеспечивает разрушение структуры элементов (фракталов). Ниспадающая ветвь диаграммы деформирования характеризуется постоянством фрактальной размерности и более высоким уровнем энергии, необходимой для разрушения фракталов.

Подобный характер изменения диаграммы деформирования, показателей энергии разрушения фракталов, фрактальной размерности наблюдали и при деформировании конструкционного бетона. Однако у конструкционного бетона энергия, необходимая для разрушения фракталов была значительно выше: для КБ10К $E_{\max} = 57$ мДж, для образцов ТТБ2К $E_{\max} = 10,4$ мДж.

Несколько иной характер изменения диаграммы деформирования и показателей E_{\max} , E_{\min} , D наблюдается при испытании образцов из высокопрочного бетона.

В начальный период нагружения заметно уплотнение и упрочнение структуры, разрушаются слабые фракталы и уже при нагрузке 5 % от разрушающей начинают работать основные структурные элементы, для разрушения которых требуется энергия на уровне 20~30 мДж. Этот энергетический уровень разрушения фракталов сохраняется на всём периоде формирования магистральной трещины, который заканчивается при условии $P=P_{bu}$. Основное отличие процесса разрушения высокопрочного бетона заключается в нарастании частоты отказов структурных элементов по мере приближения уровня нагрузки к разрушающему.

В общем случае гистограмма частоты отказов структурных элементов с ростом деформации представлена на рис. 4. График накопления повреждений соответствует классическим представлениям об отказе элементов в сплошной системе. Интенсивность отказов по экспериментальным диаграммам деформирования определяли по формуле

$$\lambda_i = \frac{j(\Delta t_i)}{(m-j)\Delta t} = \frac{j(\Delta \varepsilon_i)}{(m-j)\Delta \varepsilon}, \quad (1)$$

где переменную Δt заменили на $\Delta \varepsilon$, так как деформирование образца происходило с постоянной скоростью $v(\varepsilon = vt)$; j – число отказов за интервал Δt или $\Delta \varepsilon$; m – общее число отказов при деформировании до ε_u при $P=P_{bu}$. Гистограмму частоты отказов, полученную по экспериментальным данным, предложено описывать функцией вида

$$\lambda_0 = \beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bu}} \right)^{\alpha-1}, \quad (2)$$

где λ_0 – частота отказов в относительных единицах λ_i / m , определяемая в интервале нагружения от 0 до P и, соответственно, от 0 до ε_{bu} . Параметры α и β определяли по экспериментальным данным, представленным на графике рис. 4. Методом логарифмической линеаризации функции 2 получены нижеследующие значения α_i и β_i (табл. 3).

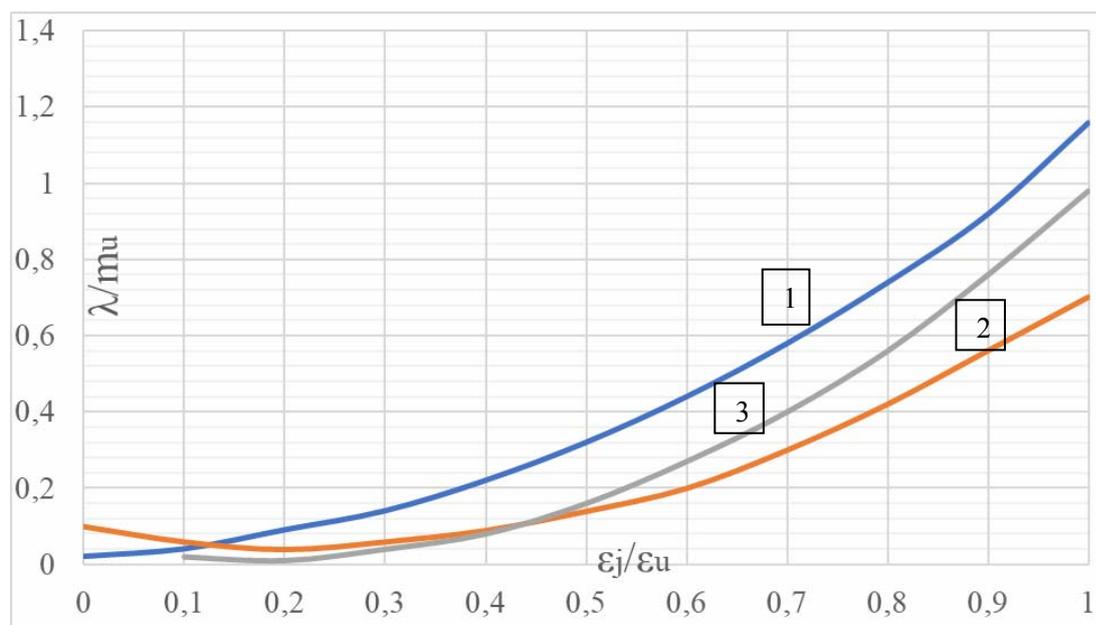


Рис. 4. График накопления повреждений по экспериментальным данным:
1 – высокопрочный бетон В80; 2 – рядовой бетон В20; 3 – бетон В60

Параметры α и β для функции (2)

Параметр	Класс бетона по прочности на сжатие		
	B20	B60	B80
α	1,6	6,0	4,4
β	0,3	1,5	4,5

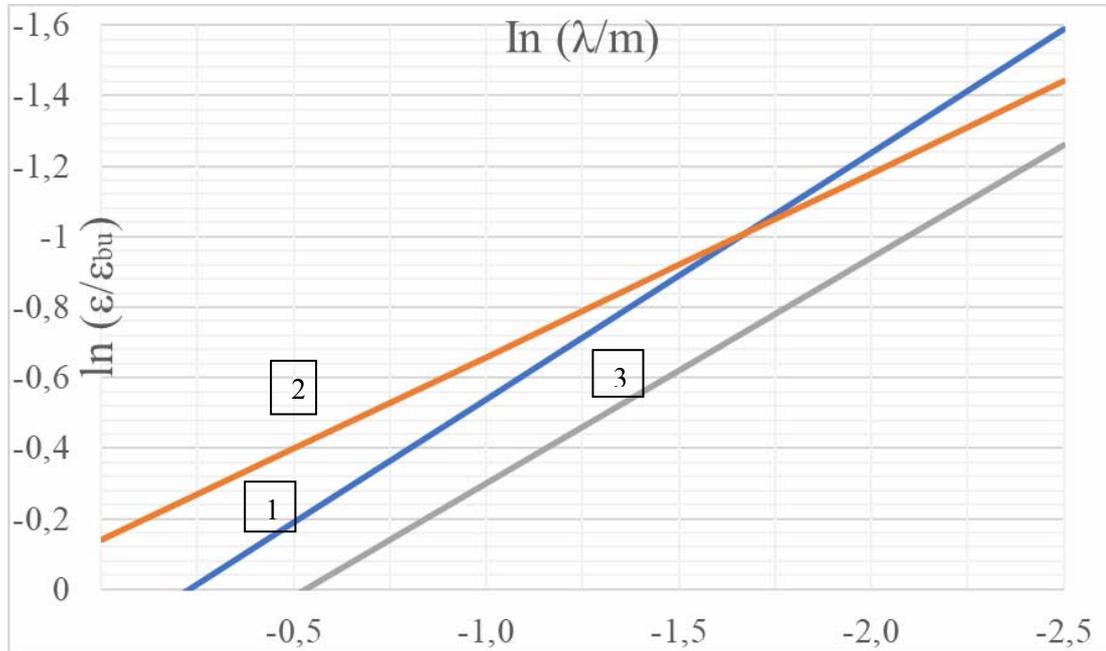


Рис. 5 Линейаризация графиков накопления повреждений:
1 – высокопрочный бетон B80; 2 – рядовой бетон B20; 3 – бетон B60

Полученные результаты: подтверждают гипотезу о дискретном характере строения и разрушения бетона; дают возможность рассматривать предельные состояния по образованию трещин, разрушению изделия как процесс накопления повреждений, формирования, развития трещин. Кинетическая модель, описывающая процессы накопления повреждений, роста деформаций, открывает новые возможности создания методов прогнозирования работы бетона под нагрузкой с учетом окружающей среды эксплуатации.

Список литературы

1. Тимошенко, С.П. Механика материалов. / С.П. Тимошенко, Дж. Гере; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; под ред. Э. И. Григолюка. – М.: Мир, 1976. – 669 с.
2. Петров, В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика / В.В. Петров. – М.: ИНФРА – Инженерия, 2014. – 480 с.
3. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Изд-во МГУ им. Н.П. Огарева, 2018. – 220 с.
4. Griffith, A. The theory of rupture / A. Griffith // In: Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech. – Delft, 1924. – P. 55–63.
5. Селяев, В.П. Фрактальная квантово-механическая модель деформирования и разрушения бетона / В.П. Селяев, П.В. Селяев, А.Л. Лазарев, С.Ю. Грязнов, М.Ю. Аверкина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №4(53). – С. 31–40.

6. Селяев, В.П. Химическое сопротивление накопления цементных композитов / В.П. Селяев, В.И. Соломатов, М.М. Ошкина. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2000. – 152 с.
7. Чернышов, Е.М. Сопротивление разрушению высокопрочных бетонов, модифицированных наноразмерными частицами / Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких, О.В. Артамонова // Деформация и разрушение материалов: тез. докл. 3-й международной конференции. – Москва, 12–15 октября, 2009. – С. 325–330.
8. Mandelbrot, B. The Fractal Geometry of Nature / B.B. Mandelbrot. – N.Y.: Freeman, 1983. – 480 p.
9. Немец, Я. Жесткость и прочность стальных деталей / Я. Немец. – М. Машиностроение, 1974. – 528 с.

References

1. Timoshenko, S.P. Mechanics of materials / S.P. Timoshenko, J. Gere; Translated from English by L.G. Korneychuk; Edited by E. I. Grigolyuk. – M.: World Publishing House, 1976. – 669 p.
2. Petrov, V.V. Nonlinear incremental construction mechanics / V.V. Petrov – M.: INFRA – Engineering, 2014. – 480 p.
3. Selyaev, V.P. Physico-chemical fundamentals of mechanics of destruction of cement composites / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. – Saransk: Publishing House of the Ogarev Moscow State University, 2018. – 220 p.
4. Griffith, A. The theory of rupture / A. Griffith // In: Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech. – Delft, 1924. – P. 55–63.
5. Selyaev, V.P. Fractal quantum-mechanical model of concrete deformation and destruction / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, A.L. Lazarev, S.Y. Gryaznov, M.Y. Averkina // Regional architecture and engineering. – 2022. – №4(53). – P. 31–40.
6. Selyaev, V.P. Chemical resistance of accumulation of cement composites. / V.P. Selyaev, V.I. Solomatov, M.M. Oshkina. – Saransk: Publishing House of Mordovians. un-ta, 2000. – 152 p.
7. Chernyshov, E.M. Resistance to destruction of high-strength concrete modified with nanoscale particles / E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh, O.V. Artamonova // Deformation and destruction of materials: Tez. dokl. the third International Conference. – M., October 12–15, 2009. – P. 325–330.
8. Mandelbrot, B. The Fractal Geometry of Nature / B.B. Mandelbrot. – N.Y.: Freeman, 1983. – 480 p.
9. Nemets, Ya. Rigidity and strength of steel parts / Ya. Nemets. – M. Mechanical engineering, 1974. – 528 p.

УДК 697.147

DOI 10.54734/20722958_2023_1_37

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Фролов Михаил Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теплогазоснабжение и
вентиляция»
E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Frolov Mikhail Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Heat, gas supply and
ventilation»
E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В СТЕНАХ ЗДАНИЙ ИЗ ГАЗОБЕТОНА ДЛЯ УСЛОВИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

М.В. Фролов, В.И. Логанина

Приведены результаты оценки влияния характеристик наружных отделочных покрытий на влажностный режим в стенах из газобетона марок D350-D500 для зданий, расположенных в географических условиях субрегиона Северо-Восточная Азия. Выполнено сравнение влажностного режима в стенах для условий российских городов Хабаровска и Владивостока, а также для городов, расположенных на территории Китая близко к границе с Россией, – Пекина и Харбина. Установлено, что влажностный режим стен зданий из газобетона марок D350-D500 в городах Китая в большей степени зависит от характеристик наружного отделочного покрытия по сравнению с городами России.

Ключевые слова: отделочный состав, температура начала конденсации, конденсация влаги, газобетон, Северо-Восточная Азия

STUDY OF THE HUMIDITY REGIME IN THE WALLS OF BUILDINGS FROM AERATED CONCRETE FOR CONDITIONS OF NORTHEAST ASIA

M.V. Frolov, V.I. Loganina

The influence of the characteristics of external finishing coatings on the humidity regime in walls made of aerated concrete grades D350-D500 for buildings located in the geographic conditions of Northeast Asia subregion has been assessed. The humidity regime in the walls was compared for the conditions of Russian cities Khabarovsk and Vladivostok, as well as for cities located in China close to the border with Russia – Beijing and Harbin. It has been established that the humidity regime of walls made of aerated concrete grades D350-D500, for the considered cities of China to a greater extent depends on the characteristics of the external finishing coating in comparison with the considered cities of Russia.

Keywords: finishing composition, temperature at the beginning of condensation, moisture condensation, aerated concrete, Northeast Asia

При строительстве зданий в различных географических районах необходимо стремиться к снижению потребления энергии при их дальнейшей эксплуатации [1, 2]. Нормы по тепловой защите существенно различаются в разных странах. Также при проектировании ограждающих конструкций важно оценивать влажностный режим, который будет возникать в них в ходе эксплуатации. Конденсация влаги происходит

из-за существенного различия паропроницаемости и теплопроводности материалов, используемых в ограждающей конструкции. Для снижения количества образующейся влаги при движении от внутренней поверхности ограждения к наружной паропроницаемость материалов должна увеличиваться, а теплопроводность уменьшаться [3, 4].

Нами исследован влажностный режим в стенах зданий, построенных в географических условиях субрегиона Северо-Восточная Азия. Известно, что конденсат наиболее вреден для ограждений и оказывает наибольшее разрушающее воздействие при отрицательных температурах наружного воздуха. Поэтому учитывая, что наиболее суровые условия и самые холодные зимы в данном регионе наблюдаются на территории России и Китая, проводили исследования именно в этих странах.

В России исследованы теплозащитные качества и влажностный режим в стенах жилых зданий, расположенных в наиболее крупных городах данного субрегиона, – Владивостоке и Хабаровске.

При выборе китайских городов учитывали, что на территории этой страны представлены самые различные климатические условия. Согласно нормам GB 50176 территория Китая разделена на 5 климатических зон; деление основано на среднемесячной температуре января и июля (рис. 1).



Рис. 1. Климатическая карта районов Китая

В зоне «Суровые условия» среднемесячная температура января ниже -10°C , в зоне «Холодные условия» среднемесячная температура января от 0 до -10°C , в зонах «Жаркое лето – холодная зима», «Жаркое лето – теплая зима», «Теплые условия» среднемесячная температура января выше 0°C . Таким образом, зоны с температурой января ниже 0°C занимают более половины территории страны. Для данных зон проектировать ограждающие конструкции нужно с учетом не только требований по энергосбережению, но и с учетом влажностного режима внутри стен. Нами исследованы теплозащитные качества и влажностный режим в стенах жилых зданий, расположенных в климатических зонах Китая с суровыми (город Харбин) и холодными (город Пекин) условиями.

Климатические параметры для данных городов, использованные для выполнения теплотехнического расчета и анализа влажностного режима внутри ограждений, представлены в табл. 1.

Расчетные климатические параметры

Город	Средняя температура отопительного периода $t_{оп}$, °С	Условия эксплуатации	Продолжительность отопительного периода $Z_{оп}$, сут.	ГСОП, °С·сут.
Пекин	-1,6	Б	125	2450*
Харбин	-10	Б	176	4928
Владивосток	-4,2	Б	199	4418
Хабаровск	-9,5	Б	204	5610

*П р и м е ч а н и е : температура внутреннего воздуха принята равной 18 °С.

Выявлено, что значительная часть жилых домов на территории России и Китая строится с использованием газобетона. Широкое применения газобетона обусловлено его низкой теплопроводностью, высокой паропроницаемостью, сравнительно хорошими эксплуатационными свойствами, простотой кладки и высокой скоростью возведения зданий из него. Важно отметить, что при использовании газобетона плотностью 300-600 кг/м³ (марка D300-D600) возводят однослойные стены с хорошими показателями по теплозащите.

В ходе исследования сравнивали влажностный режим в стенах из газобетона попарно для Пекина и Владивостока, для Харбина и Хабаровска. Такое деление обусловлено тем, что для Пекина и Владивостока характерны достаточно теплые зимы. При этом климатические условия в Пекине более мягкие, средняя температура отопительного периода $t_{оп}$ выше на 2,6 °С, а продолжительность отопительного периода $Z_{оп}$ меньше на 74 дня. Для Харбина и Хабаровска характерны более холодные зимы, средняя температура отопительного периода $t_{оп}$ для Харбина – минус 10°С, для Хабаровска – минус 9,5°С.

Расчетная схема конструкции исследуемой стены представлена на рис. 2.

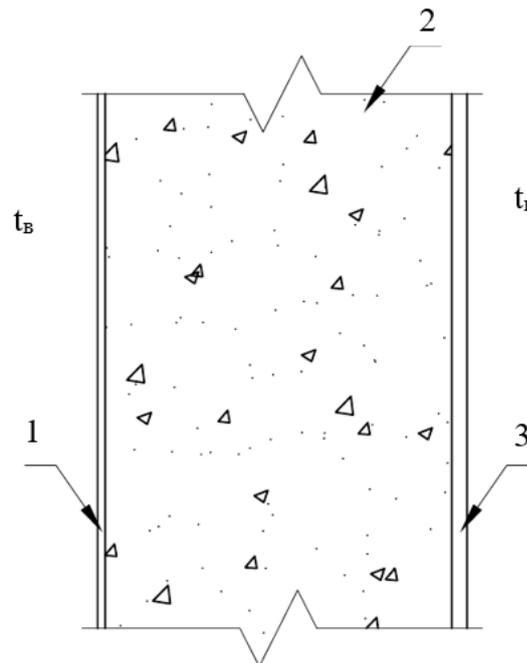


Рис. 2. Расчетная схема стены:

1 – внутреннее отделочное покрытие; 2 – газобетон; 3 – наружное отделочное покрытие

Для внутренней отделки стен из газобетона в рассматриваемой конструкции использована известково-песчаная штукатурка. В качестве основного материала стены

приняты газобетонные блоки плотностью 350 кг/м^3 и 500 кг/м^3 . Для наружной отделки стен из газобетона использовано три вида ССС: цементно-песчаная штукатурка; Кнауф GRUNBAND: известково-цементная ССС с наполнителем из зольных микросфер. Рецептура известково-цементной ССС с наполнителем из зольных микросфер разработана в ходе ранее проведенных исследований [5-7]. При использовании данных материалов можно получить однослойные стены, соответствующие действующим нормативным документам по тепловой защите России и Китая. Характеристики материалов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Характеристики используемых в рассматриваемых ограждающих конструкциях материалов

Номер слоя	Материал	Толщина слоя δ , м	Средняя плотность материала, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности λ_b , Вт/(м·К)	Коэффициент паропроницаемости μ , мг/(м·ч·Па)
1	Известково-песчаная штукатурка	0,01	1600	0,12	0,81
2	Газобетон D350	-*	350	0,14	0,25
	Газобетон D500	-	500	0,20	0,20
3	Разработанная ССС	0,02	650	0,169	0,15
	Кнауф GRUNBAND		1100	0,40	0,10
	Цементно-песчаная штукатурка		1800	0,93	0,09

*П р и м е ч а н и е . Толщина слоя из газобетона определяется расчетом в зависимости от города и марки газобетона

В ходе предварительных исследований определена минимально допустимая толщина блоков из газобетона в ограждающих конструкциях. Стены зданий для Харбина и Пекина запроектированы с учетом требований китайских нормативных документов по теплозащите [8]. Стены зданий для Владивостока и Хабаровска запроектированы с учетом требований российских нормативных документов по теплозащите. Всего нами исследовано 24 варианта ограждающих конструкций. Их конструкционные особенности и теплотехнические характеристики представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Конструкционные особенности и теплотехнические характеристики исследуемых ограждающих конструкций

Город	Марка газобетона	Наружное отделочное покрытие	Толщина слоя из газобетона δ , м	Нормируемое термическое сопротивление $R_o^{\text{норм}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	Фактическое термическое сопротивление $R_o^{\text{фп}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$
1	2	3	4	5	6
Пекин	D350	цементно-песчаная штукатурка	0,15	1,22	1,26
		Кнауф GRUNBAND	0,15		1,29
		разработанная ССС	0,15		1,36

1	2	3	4	5	6
	D500	цементно-песчаная штукатурка	0,25		1,44
		Кнауф GRUNBAND	0,2		1,22
		разработанная CCC	0,2		1,29
Харбин	D350	цементно-песчаная штукатурка	0,35	2,50	2,69
		Кнауф GRUNBAND	0,35		2,72
		разработанная CCC	0,35		2,79
	D500	цементно-песчаная штукатурка	0,5		2,69
		Кнауф GRUNBAND	0,5		2,72
		разработанная CCC	0,45		2,54
Владивосток	D350	цементно-песчаная штукатурка	0,4	2,95	3,05
		Кнауф GRUNBAND	0,4		3,08
		разработанная CCC	0,4		3,15
	D500	цементно-песчаная штукатурка	0,6		3,19
		Кнауф GRUNBAND	0,55		2,97
		разработанная CCC	0,55		3,04
Хабаровск	D350	цементно-песчаная штукатурка	0,45	3,36	3,41
		Кнауф GRUNBAND	0,45		3,44
		разработанная CCC	0,45		3,50
	D500	цементно-песчаная штукатурка	0,65		3,44
		Кнауф GRUNBAND	0,65		3,47
		разработанная CCC	0,65		3,54

Для оценки вероятности конденсации влаги в наружных ограждениях использовали методику, основанную на определении температуры начала конденсации $t_{н.к}$, при которой в ограждении начнет выпадать конденсат [9–11].

Результаты проведенных исследований по сравнению влажностного режима в стенах зданий для городов Владивостока и Пекина представлены на рис. 3.

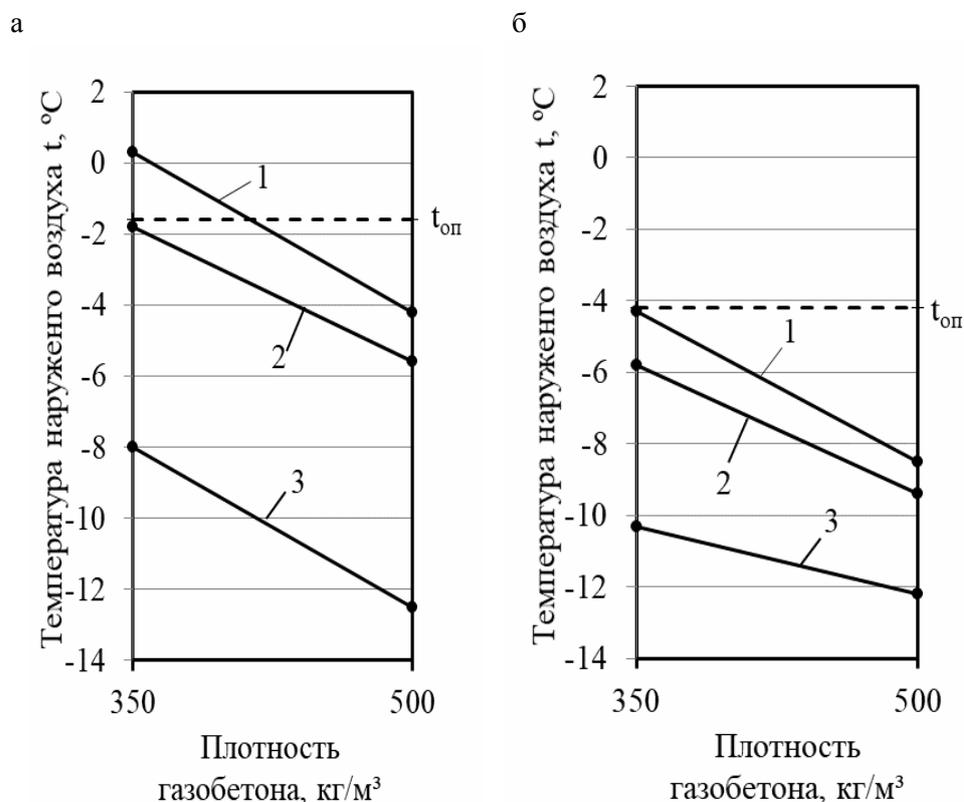


Рис. 3. Зависимость температуры начала конденсации $t_{н.к}$ от плотности газобетона:

а – Пекин; б – Владивосток;

1 – цементно-песчаная штукатурка; 2 – Кнауф GRUNBAND; 3 – разработанная ССС

Установлено, что несмотря на более теплую зиму влажностный режим в стенах зданий для Владивостока более благоприятный. Выявлена значительная разница между температурами начала конденсации $t_{н.к}$ в стенах зданий для Пекина и Владивостока. Так, при отделке стен из газобетона марки D350 цементно-песчаной штукатуркой температура начала конденсации $t_{н.к}$ для условий города Пекина выше температуры начала конденсации $t_{н.к}$ для условий города Владивостока на 4,5 °С. Значительная разница в температурах начала конденсации $t_{н.к}$ в стенах зданий для Владивостока и Пекина связана с тем, что нормируемое термическое сопротивление $R_o^{норм}$ для стен зданий Владивостока выше в 2,4 раза. Вследствие этого толщина слоя газобетона в стенах для условий города Владивостока выше на 0,25–0,35 м.

Установлено, что при использовании разработанной ССС для условий города Пекина температура начала конденсации $t_{н.к}$ на 8,3 °С ниже температуры начала конденсации $t_{н.к}$ в стенах с использованием цементно-песчаной штукатурки и на 6,4–6,9 °С ниже температуры начала конденсации $t_{н.к}$ в стенах с использованием ССС Кнауф GRUNBAND. Установлено, что при использовании разработанной ССС для условий города Владивостока температура начала конденсации $t_{н.к}$ на 3,7–6,1 °С ниже температуры начала конденсации $t_{н.к}$ в стенах с использованием цементно-песчаной штукатурки и на 2,8–4,5 °С ниже температуры начала конденсации $t_{н.к}$ в стенах с использованием ССС Кнауф GRUNBAND.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать вывод, что теплопроводность и паропроницаемость отделочного покрытия для условий города Пекина оказывает существенно большее влияние на температуру начала конденсации $t_{н.к.}$ в стенах зданий по сравнению с городом Владивостоком.

Результаты анализа влажностного режима в стенах зданий для городов Хабаровска и Харбина представлены на рис. 4.

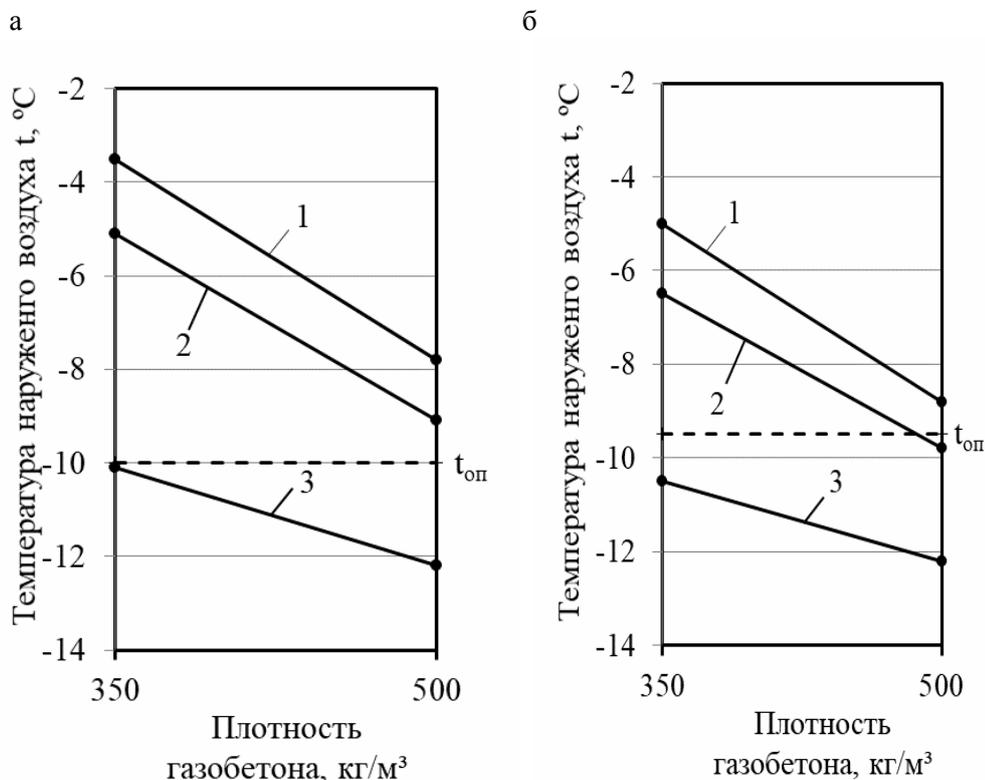


Рис. 4. Зависимость температуры начала конденсации $t_{н.к.}$ от плотности газобетона:
а – Харбин; б – Хабаровск;

1 – цементно-песчаная штукатурка; 2 – Кнауф GRUNBAND; 3 – разработанная CCC

Анализируя данные рис. 4, можно сделать вывод, что влажностный режим в стенах для условной города Хабаровска более благоприятный. Это связано с тем, что несмотря на более высокую температуру отопительного периода нормируемое термическое сопротивление $R_o^{норм}$ для стен зданий города Хабаровска выше на 34,4 % нормируемого термического сопротивления для города Харбина. Вследствие этого толщина слоя газобетона в стенах для условий города Харбина ниже на 0,05–0,1 м.

При этом важно отметить, что при использовании разработанной CCC температуры начала конденсации в стенах для условий данных городов практически не отличаются, разница составляет не более 0,5 °C. При средней температуре отопительного периода $t_{оп}$ в данных ограждения не будет выпадать конденсат. При использовании цементно-песчаной штукатурки температура начала конденсации $t_{н.к.}$ выше на 0,7–4,5 °C средней температуры отопительного периода $t_{оп}$ для условий города Хабаровска и на 2,2–6,5 °C – для условий города Харбина. При использовании CCC Кнауф GRUNBAND для условий города Хабаровска при отделке газобетона марки D350 температура начала конденсации $t_{н.к.}$ выше средней температуры отопительного периода $t_{оп}$ на 3,0 °C, при отделке газобетона марки D500 – ниже на 0,3 °C. При использовании CCC Кнауф GRUNBAND для условий города Харбина температура начала конденсации $t_{н.к.}$ выше средней температуры отопительного периода $t_{оп}$ на 0,9–4,9 °C.

Выводы:

1. Выявлено, что в однослойных стенах зданий из газобетона марок D350-D500 в городах Китая, расположенных в климатических районах с суровыми и холодными условиями, могут создаваться условия для образования конденсата в зимний период.

2. Установлено, что из-за менее жестких норм к тепловой защите для вновь возводимых зданий в Китае допустима меньшая толщина слоя газобетона, вследствие чего в стенах создаются более благоприятные условия для образования конденсата по сравнению с городами России, расположенными в схожих климатических условиях. Поэтому для наружной отделки стен из газобетона для городов Китая, расположенных в суровых и холодных условиях, очень важно выбирать ССС, отделочные покрытия на основе которых будут отличаться низкой теплопроводностью и высокой паропроницаемостью.

3. Показана высокая эффективность использования известково-цементной ССС с наполнителем из зольных микросфер. При применении данной ССС во всех рассматриваемых ограждениях температура начала конденсации $t_{н.к.}$ ниже средней температуры отопительного периода $t_{оп.}$

Список литературы

1. Choi, Y. hee. Analysis of the variable heat exchange efficiency of heat recovery ventilators and the associated heating energy demand / Y. hee Choi, D. Song, D. Seo, J. Kim // *Energy and Buildings*. – 2018. – № 172. – P. 152–158.

2. Harmati, N. Energy consumption modelling via heat balance method for energy performance of a building / N. Harmati, Ž Jakšić., N. Vatin // *Procedia Engineering*. – 2015. – № (117). – P. 791–799.

3. Корниенко, С.В. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2015. – №6. – С.19–33.

4. Ватин, В.И. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков / В.И. Ватин, А.С. Горшков, А.В. Глумов // *Инженерно-строительный журнал*. – 2011. – №1. – С.28–33.

5. Логанина, В.И. Исследование и оптимизация технологии синтеза модифицирующей добавки на основе смеси гидросиликатов и алюмосиликатов кальция / В.И. Логанина, М.В. Фролов // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 190–197.

6. Логанина, В.И. Влияние вида наполнителей на трещиностойкость теплоизоляционных покрытий для газобетона / В.И. Логанина, М.В. Фролов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – №1. – С.30–35.

7. Логанина, В.И. Эффективность применения теплоизоляционной штукатурки с применением микросфер для отделки газобетонной ограждающей конструкции / В.И. Логанина, М.В. Фролов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2016. – № 5 (689). – С. 55–62.

8. Лу Вэйцзе. Энергоэффективные жилые здания в климатических условиях северного Китая / Лу Вэйцзе, А.К. Соловьев // *Вестник МГСУ*. – 2010. – №3. – С.10–15.

9. Loganina, V.I. Humidity regime in aerated concrete wall with finishing coating / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2022. – № 1(109). – P. 10907.

10. Куприянов, В.Н. Влияние конструкции ограждения на конденсацию парообразной влаги / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, М.Р. Шамсутдинов // *Жилищное строительство*. – 2012. – №6. – С.29–31.

11. Куприянов, В.Н. Основные принципы конструирования наружных стен с ограничением конденсации в них парообразной влаги / В.Н. Куприянов // Строительство и реконструкция. – 2015. – №2(58). – С.120–126.

References

1. Choi, Y. hee. Analysis of the variable heat exchange efficiency of heat recovery ventilators and the associated heating energy demand / Y. hee Choi, D. Song, D. Seo, J. Kim // *Energy and Buildings*. – 2018. – № 172. – P. 152–158.
2. Harmati, N. Energy consumption modelling via heat balance method for energy performance of a building / N. Harmati, Ž Jakšič., N. Vatin // *Procedia Engineering*. – 2015. – № (117). – P. 791–799.
3. Kornienko, S.V. Evaluation humidity conditions multilayer wall structure in the annual cycle / S.V. Kornienko, N.I. Vatin, M.R. Petrychenko, A.S. Gorshkov // *Construction of unique buildings and structures*. – 2015. – №6. – P. 19–33.
4. Vatin, V.I. Effect of physical, technical and geometrical characteristics of plasters on the walls of homogeneous humidity conditions of concrete blocks / V.I. Vatin, A.S. Gorshkov, A.V. Glumov // *Civil Engineering Journal*. – 2011. – № 1. – P.28–33.
5. Loganina, V.I. Research and optimization of technology for the synthesis of a modifying additive based on a mixture of hydrosilicates and calcium aluminosilicates / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Nanotechnologies in construction: a scientific online journal*. – 2022. – Vol. 14, № 3. – P. 190–197.
6. Loganina, V.I. Influence of the type of fillers on the crack resistance of heat-insulating coatings for aerated concrete / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – № 1. – P. 30–35.
7. Loganina, V.I. The effectiveness of the use of heat-insulating plaster with the use of microspheres for finishing aerated concrete enclosing structures / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2016. – No. 5 (689). – P. 55–62.
8. Lu Weijie. Energy-efficient residential buildings in the climatic conditions of northern China / Lu Weijie, A.K. Soloviev // *Vestnik MGSU*. – 2010. – № 3. – P.10–15.
9. Loganina, V.I. Humidity regime in aerated concrete wall with finishing coating / V.I. Loganina, M.V. Frolov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2022. – № 1(109). – P. 10907.
10. Kupriyanov, V.N. The influence of the design of the fence on the condensation of vaporous moisture / V.N. Kupriyanov, I.Sh. Safin, M.R. Shamsutdinov // *Housing*. – 2012. – №6. – P. 29–31.
11. Kupriyanov, V.N. The basic principles of the design of external walls with limited condensation of vaporous moisture in them / V.N. Kupriyanov // *Construction and reconstruction*. – 2015. – №2(58). – P. 120–126.

УДК 691

DOI 10.54734/20722958_2023_1_46

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

АНАЛИТИКО-СИНТЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

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

Приведены базовые модельные представления композиционных материалов как неструктурированной среды и при использовании структурного подхода. Указаны содержательные части парадигм как набор концептуальных, методологических, теоретических и экспериментальных положений. Даны подходы к разработке композитов с позиций смены парадигм на различных этапах развития строительного материаловедения.

Ключевые слова: сложные системы, композиционные материалы, разработка, моделирование, аналитико-синтетический подход

ANALYTICAL-SYNTHETIC APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF MATERIALS

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

The basic model representations of composite materials as an unstructured medium and using the structural approach are given. The substantive parts of the paradigms are indicated as a set of conceptual, methodological, theoretical and experimental provisions. Some approaches to the development of composites are given from the standpoint of changing paradigms at various stages of the development of building materials science.

Keywords: complex systems, composite materials, development, modeling, analytic-synthetic approach

Для современного строительного материаловедения характерно смещение акцентов от эмпирического подхода к аналитико-синтетическому. Предполагается оптимальное сочетание экспериментальных и теоретических методов с математическим моделированием. Различаются два вида анализа: анализ элементов целого и анализ единиц. Первый вид анализа позволяет выявить в объекте познания определенные

относительно самостоятельные элементы. Его целью являются ответы на вопросы, из каких структурных элементов состоит целое, как эти элементы взаимосвязаны между собой. На основе анализа единиц объект рассматривается как система построения целостности; анализ любого целого – это анализ не только частей, элементов, свойств, но и их взаимосвязей и отношений (анализ приводит не к распаду целого, а к его преобразованию; завершается синтезом); задача анализа заключается в проникновении в сущность. Синтез предполагает установление характера взаимосвязей, а также зависимости от условий, которые не были учтены при анализе. Еще раз подчеркнем: анализ – расчленение объекта на составные части в их иерархии и взаимоотношениях, а синтез – объединение частей, не сводящихся к их сумме, с увеличением их общего смысла; они взаимосвязаны между собой. При этом анализ дает знание отдельных элементов, а синтез, опираясь на результаты анализа, объединяет эти элементы, обеспечивая тем самым знание системы в целом. Как видим, существенными признаками модели являются основные характеристики структуры (каким образом она взаимосвязана).

Постулат о композиционном материале лишь как о дисперсной системе с выраженными межфазными границами претерпевает трансформацию как о слабоструктурированном материале. Реализация концепции синтеза базируется на междисциплинарных исследованиях. В основе лежит системный подход; материал рассматривается как система с характерными признаками, иерархией структурных уровней, межэлементными взаимосвязями и взаимовлияниями. Процесс исследования материала как сложной системы представляет собой организованную в соответствии с технологией системного анализа последовательность многовариантных экспериментов (в том числе вычислительных), на каждом шаге которой для исследования и поиска приемлемых решений варьируются структура и значения параметров модели; производится оценка результатов и принимается решение о дальнейшем направлении исследования. С теоретической точки зрения необходимы автоматизированная интеллектуальная технология и системная среда машинного исследования материалов как систем. При этом польза системного подхода зависит от того, насколько успешно выделен системообразующий фактор и насколько полно установлено его значение для формирования системы: полезными будут лишь те математические выкладки, которые сформулированы с учетом важных системообразующих факторов. Сложность системы проявляется в нелинейности, значительном числе степеней свободы, наличии «памяти» и других свойств, приводящих к слабой предсказуемости поведения системы; свойства сложной системы определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между ними. Ее можно (не обязательно единственным образом) расчленить на конечное число частей (подсистем). Каждую подсистему (высшего уровня) можно, в свою очередь, расчленить на конечное число более мелких подсистем и т.д., вплоть до получения подсистем первого уровня (элементов; объективно не подлежат расчленению на части либо относительно их дальнейшей неделимости имеется соответствующая договорённость). Зависимости между критериями определяются методами факторного анализа и математической статистики. Отсутствие абсолютной уверенности в прогнозировании функционирования проектируемой системы приводит к необходимости предусмотреть возможность ее различных модификаций. Методологической основой построения математических моделей сложных систем является модульность структурных свойств (сложная система представляется в виде совокупности взаимодействующих элементов). Модульность является одной из центральных структурных свойств моделей, алгоритмов и методик их исследования для создания на концептуальном уровне сложных моделей, алгоритмов и методик на основе ограниченного множества относительно простых и независимо создаваемых стандартных блоков. При рассмотрении материалов как систем сложность подразумевается на модельном уровне; прежде всего составной характер математической модели. Это означает представление сложной модели в виде взаимодействующих подсистем, модулей, элементов и связей между ними. Важно указать наиболее часто используемые на практике алгоритмические модели, когда описывающие сложные

системы уравнений оформляются в виде множества взаимосвязанных процедур, а организованный на этой основе вычислительный процесс в определенном смысле позволяет описать поведение моделируемой системы. При компьютерном моделировании база алгоритмических знаний определяется как совокупность «модель – метод – методика».

Процесс проектирования представляет собой организованную в соответствии с технологией системного анализа последовательность многовариантных вычислительных экспериментов [1..5]. Здесь на каждом шаге в соответствии со стратегией исследования и поиска приемлемых решений варьируются структура и значения параметров модели, методов и методик, выполняются вычисления, оцениваются результаты и определяется направление дальнейших исследований. В основе проектирования находилось техническое задание с указанием организации и свойств материала как системы. Возможность создания композита и реализация технического задания первоначально определялись на этапе когнитивного моделирования (определялись иерархические структуры критериев качества, а в соответствии с выделенными критериями качества – соответствующие структурные схемы системы). Далее осуществлялась формализация критериев качества системы и разрабатывались математические модели в соответствии с каждым из критериев. Наконец, на основе решения задач однокритериальной оптимизации с использованием найденных оптимальных значений осуществлялась формализация многокритериальной задачи и ее решение; определялись оптимальная структура и свойства системы: поведение системы всегда определяется ее структурой [6, 7]. Изучение систем в естественных условиях ограничено их сложностью, а иногда бывает невозможным ввиду того, что нельзя провести натурный или иной эксперимент. В этих условиях порой единственно возможным методом исследования является моделирование (физическое, логическое, математическое). Любая гипотеза – это модель. Правильность гипотезы о будущем состоянии объекта зависит от того, насколько правильно определили параметры исследуемого объекта, взаимосвязи между ним и внешней средой. Научное описание никогда не охватывает всех деталей, оно всегда выделяет существенные элементы структур и связей. Описание многих процессов, наблюдающихся в системах, внешне не имеющих ничего общего друг с другом, возможно на основе методов синергетики с использованием одних и тех же математических моделей (число которых относительно невелико). Исходная концептуальная схема, модель постановки проблем и их решения определяется исходя из совокупности современных ценностей, методов, подходов, технических навыков и средств, принятых в научном сообществе в рамках устоявшейся научной традиции (парадигмы). В общую схему проектирования системы включались: структурный синтез на каждом этапе (уже начальный вариант структуры объекта проектирования оценивается с точки зрения удовлетворения требованиям технического задания); составление, анализ и оптимизация параметров математической модели, статистический анализ. Указанный подход использовался при проектировании композиционных материалов, различных организационных систем, в том числе и образовательной системы. Основные понятия и определения материаловедения легко интерпретируются в соответствующих терминах, принятых в теории систем управления, часть из которых приводится ниже. В частности, линейные объекты с непрерывным временем описываются векторно-матричным уравнением состояния

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{Y}(t);$$

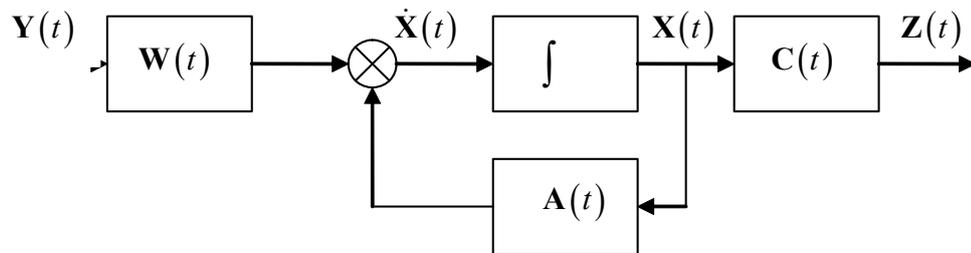
$\mathbf{X}(t)$ – вектор фазовых координат (состояние объекта); $\mathbf{Y}(t)$ – вход (управление объектом); $\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(t)$ – непрерывные матрицы, имеющие соответственно размерности $n \times n$, $m \times n$. Выход объекта $\mathbf{Z}(t) = (z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t))^T$ (t – символ транспонирования) в общем случае определяется в виде уравнения наблюдения

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t),$$

$\mathbf{C}(t)$ – непрерывная матрица размерности $p \times n$. В общем случае объект описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = f(t, \mathbf{X}, \mathbf{Y}).$$

Структурная схема объекта представлена на рисунке.



Часто синтез сводится к минимизации суммы линейной и квадратичной форм при ограничениях вида линейных неравенств при неотрицательности переменных. Так, при определении рецептурно-технологических параметров композита, при которых достигается максимальное значение прочности на сжатие $R_{\text{сж}}$ (эквивалентна минимизации $q(x_1, x_2) = -R_{\text{сж}}$), сначала методами математического планирования эксперимента определялась аппроксимационная модель

$$R_{\text{сж}} = 2x_1 + 4x_2 - x_1^2 - 2x_2^2;$$

в области факторного пространства

$$x_1 + 2x_2 - 8 \leq 0, \quad 2x_1 - x_2 - 12 \leq 0, \quad x_1, x_2 \geq 0;$$

$q(x_1, x_2)$ – выпуклая (сумма линейной функции $y = -2x_1 - 4x_2$ и положительно-определенной квадратичной формы $y = x_1^2 + 2x_2^2$); система ограничений задачи включает только линейные неравенства.

Функция Лагранжа имеет вид:

$$L(x_1, x_2, \lambda_1, \lambda_2) = -2x_1 - 4x_2 + x_1^2 + 2x_2^2 + \lambda_1(x_1 + 2x_2 - 8) + \lambda_2(2x_1 - x_2 - 12);$$

необходимые и достаточные условия существования седловой точки:

$$p_1 = \frac{\partial L}{\partial x_1} = -2 + 2x_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 \geq 0, \quad p_2 = \frac{\partial L}{\partial x_2} = -4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2 \geq 0;$$

$$-q_1 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = x_1 + 2x_2 - 8 \leq 0, \quad -q_2 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = 2x_1 - x_2 - 12 \leq 0.$$

$$x_1 p_1 = x_1(-2 + 2x_1 + \lambda_1 + \lambda_2) = 0, \quad x_2 p_2 = x_2(-4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2) = 0;$$

$$\lambda_1 q_1 = -\lambda_1(x_1 + 2x_2 - 8) = 0, \quad \lambda_2 q_2 = -\lambda_2(2x_1 - x_2 - 12) = 0.$$

Справедливо:

$$p_1 - v_1 = -2 + 2x_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 - v_1 = 0; \quad p_2 - v_2 = -4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2 - v_2 = 0;$$

$$-q_1 + w_1 = -8 + x_1 + 2x_2 + w_1 = 0, \quad -q_2 + w_2 = -12 + 2x_1 - x_2 + w_2 = 0;$$

$$x_1 = 1 - \frac{1}{2}\lambda_1 - \lambda_2 + \frac{1}{2}v_1, \quad x_2 = 1 - \frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{1}{4}\lambda_2 + \frac{1}{4}v_2;$$

$$w_1 = 5 + \frac{3}{2}\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}v_1 - \frac{1}{2}v_2, \quad w_2 = 11 + \frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{5}{4}\lambda_2 - v_1 + \frac{1}{4}v_2.$$

Базисное решение:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = v_1 = v_2 = 0, \quad x_1 = 1, x_2 = 1, w_1 = 5, w_2 = 11;$$

$$p_1 = v_1 = 0, p_2 = v_2 = 0; \quad q_1 = w_1 = 5, q_2 = w_2 = 11;$$

$$x_1 p_1 = 0, x_2 p_2 = 0; \quad \lambda_1 q_1 = 0, \lambda_2 q_2 = 0; \quad x_1, x_2 \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0, p_1, p_2 \geq 0, q_1, q_2 \geq 0.$$

Так что $(x_1^0, x_2^0, \lambda_1^0, \lambda_2^0) = (1, 1, 0, 0)$ – седловая точка функции Лагранжа для исходной задачи; $x^*(1, 1)$ – оптимальный план исходной задачи; $q_{\min} = -3$; $(R_{\text{сж}})_{\max} = 3$. Такой подход оказался эффективным и в ряде других случаев, связанных с синтезом композиционных материалов со специальными свойствами.

Выводы

Даны базовые модельные представления композиционных материалов. Указаны содержательные части парадигм и подходы к разработке композитов с позиций смены парадигм. Рассмотрены основы фундаментализации строительного материаловедения на основе использования аналитических методов. Приведены примеры реализации аналитико-синтетического подхода.

Список литературы

1. Опарин, Г.А. Инструментальная распределенная вычислительная САТУРН-среда / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов // Программные продукты и системы. – 2002. – № 2. – С.26–29.
2. Васильев, С.Н. Интеллектуальный подход к автоматизации проектных расчетов сложных управляемых систем / С.Н. Васильев, Г.А. Опарин // Оптимизация, управление, интеллект. – 2000. – №4. – С.111–126
3. 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.
4. Королев, Е.В. Композиционные материалы как полидисперсные системы. Эффективные модели / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3 (48). – С. 16–25.
5. Смирнов, В.А. Стохастическое моделирование наноразмерных систем / В.А. Смирнов, Е.В. Королев, С.С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 6–14.
6. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
7. 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. Oparin, G.A. Instrumental distributed computing SATURN-environment / G.A. Oparin, A.G. Feoktistov // Software products and systems. – 2002. – №2. – P.26–29.
2. Vasiliev, S.N. Intellectual approach to automation of design calculations of complex controlled systems / S.N. Vasiliev, G.A. Oparin // Optimization, control, intelligence. – Irkutsk: IDSTU SO RAN. – 2000. – № 4. – P.111–126.
3. 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.
4. Korolev, E.V. Composite materials as polydisperse systems. Effective models / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Regional architecture and engineering. – 2021. – №3 (48). – P.16–25.
5. 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.
6. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
7. 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_2023_1_52

Казанский государственный архитектурно-строительный университет
420043, Республика Татарстан, г. Казань,
ул. Зеленая, 1,
тел.: +7(843) 238-79-72

Бикаева Юлия Вячеславовна
E-mail: Uliyaevstigneeva@mail.ru

Ибрагимов Руслан Абdirашитович,
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Технологии строительного производства»
E-mail: rusmag007@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and
Engineering

420043, Republic of Tatarstan,
Kazan city, 1, St. Zelenaya,
tel.: +7(843) 238-79-72

Bikaeva Yuliya Vyacheslavovna
E-mail: Uliyaevstigneeva@mail.ru

Ibragimov Ruslan Abdirashitovich,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Technologies of construction
manufacture»
E-mail: rusmag007@yandex.ru

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ НИЗКОСОРТНОГО ДОЛОМИТОВОГО СЫРЬЯ

Ю.В. Бикаева, Р.А. Ибрагимов

Показаны теория и перспективы развития магнизиальных вяжущих на основе низкосортного доломитового сырья. Проанализированы основные месторождения в мире, основные способы получения каустического доломита, современные материалы на основе каустического доломита и способы повышения их физико-механических свойств.

Ключевые слова: магнизиальное вяжущее, каустический доломит, магнезит, кальцит, магнизиальный цемент

THE STATE AND TENDENCY OF DEVELOPMENT MAGNESIUM BINDERS ON LOW-GRADE DOLOMITE

Yu. V. Bikaeva, R.A. Ibragimov

The article discusses the theory and tendency of development magnesium binders on low-grade dolomite materials. The main world deposits, fundamental techniques for caustic dolomite production, advanced materials based on caustic dolomite and methods for increasing their physical and mechanical properties have been analyzed

Keywords: magnesium binder, caustic dolomite, magnesite, calcite, magnesium cement

Введение

Производство клинкера – энергообъемный и сложный процесс, включающий в себя: добычу сырьевых материалов, их дробление, помол, смешивание и обжиг. Заключительный этап обжига до спекания тонкодисперсной однородной сырьевой смеси из известняка и глины и других материалов сопровождается выделением достаточно большого объема углекислого газа в атмосферу. В связи с этим возникает проблема тщательного комплексного использования сырьевой базы с тем, чтобы минимизировать ущерб от производства для окружающей среды.

В настоящее время уделяется повышенное внимание вопросам разработки составов и технологий производства клинкера с меньшими энергозатратами [1], поиска альтернативных технологий, новых видов вяжущих. Подобным альтернативным сырьем является магнизиальное вяжущее. Известны следующие виды магнизиальных вяжущих: каустический магнезит и каустический доломит, получаемые из различных видов магнизиального сырья.

Под понятием «магнезиальное сырье» подразумеваются исходные природные магниесодержащие породы, преимущественно карбонаты и гидроксиды. К ним можно отнести наиболее распространенные минералы, такие, как магнезит $MgCO_3$, доломит $CaMg(CO_3)_2$ и брусит $Mg(OH)_2$, необходимые для получения магнезиальных вяжущих. Согласно разведанным данным [2,3], балансовые запасы месторождений породобразующих магниесодержащих минералов (MgO не менее 90 % от массы вещества) оцениваются в 8,5 млрд т. Объем разведанных мировых запасов составляет 3,6 млрд т. Ведущими добывающими странами являются Китай, Россия, КНДР и Турция, причем доля лидера – Китая – составляет около 65 % от мировой добычи. Анализ информации позволил выделить области как разведанных, так и прогнозируемых запасов по добыче магнезита (рис. 1).

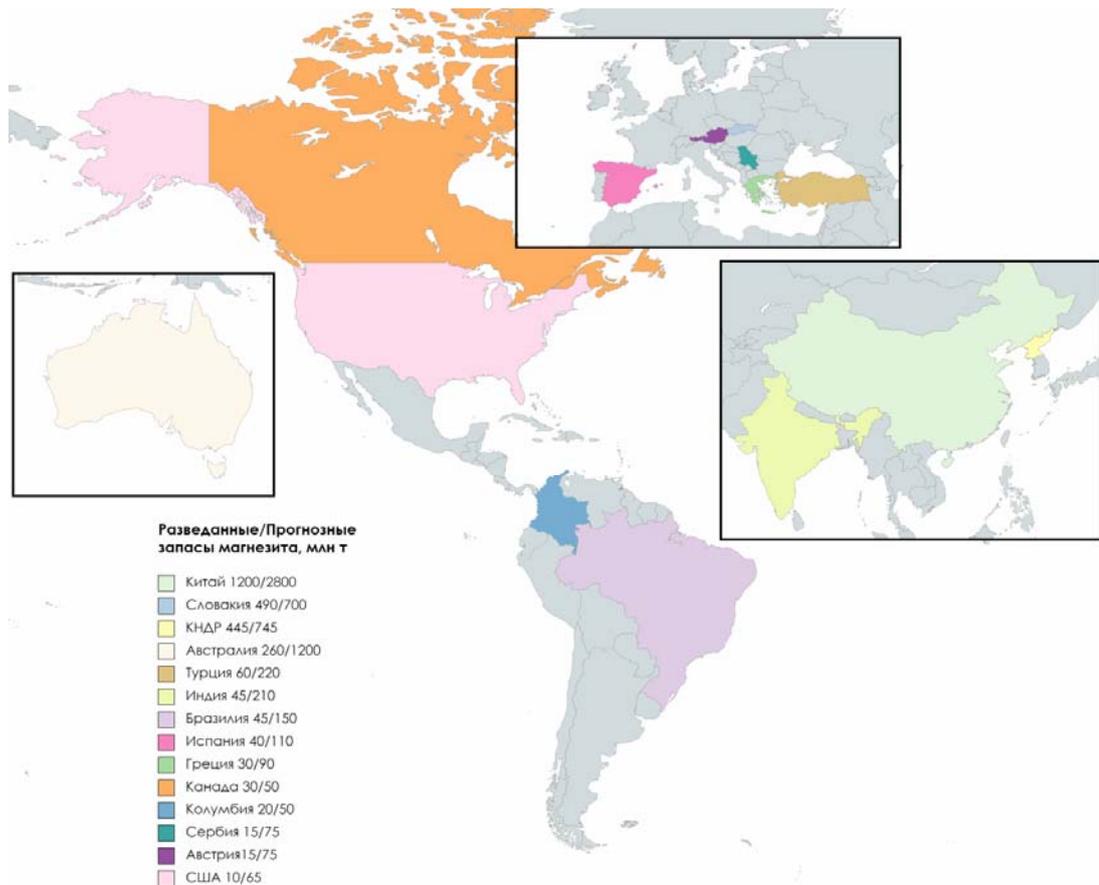


Рис. 1. Разведанные и прогнозные запасы магнезита по странам мира (без России), млн т, на основе источников [2, 3]

Анализ данных различных источников [4-6] показал, что мировые ресурсы и запасы доломита оцениваются по-разному, в большинстве случаев массы доломита встречаются совместно с осадочными карбонатными толщами. Крупнейшие промышленные месторождения находятся в России – Саткинское (Урал), Тальское (Енисейский край), Савинское (Восточные Саяны), а также в северо-восточной части Китая, в КНДР и Бразилии.

1. Классификация магнезиального сырья

Магнезиальное сырье не ограничивается только тремя широко распространенными минералами, а включает в себя смешанные горные породы осадочного и метаморфического происхождения. Шевелев А.И. при классификации магнезиального сырья выделил две группы: высокомагнезиальные и низкосортные (рис. 2).

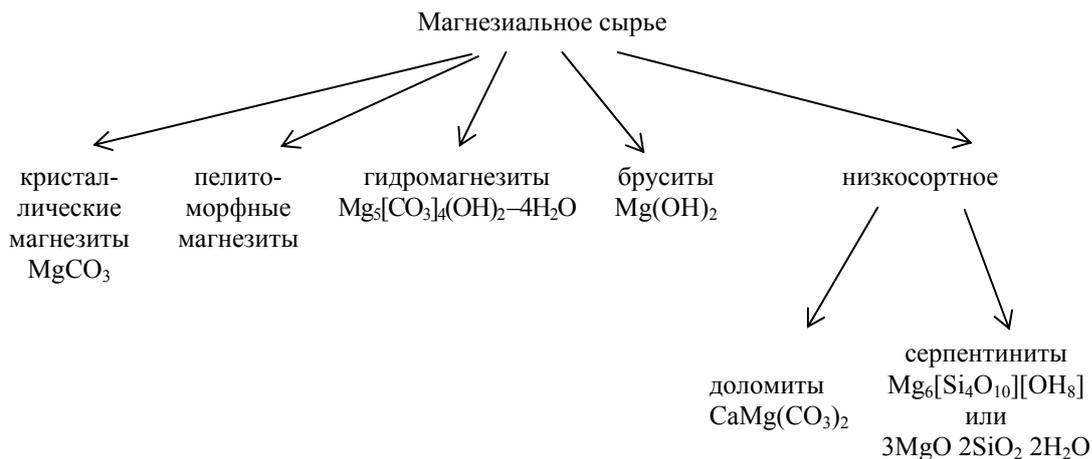


Рис. 2. Классификация магниального сырья, по Шевелеву А.И.

В первую группу входят осадочные породы с высоким содержанием MgO : кристаллические, пелитоморфные, гидромагнезиты и бруситы. Особый интерес представляет низкосортное магниальное сырье – доломит, т.к. запасы доломита на территории России количественно превосходят отложения брусита и магнезита. Доломиты известны в широком стратиграфическом диапазоне от докембрия до современных отложений [8,9]. Наиболее характерные – это допалеозойские и верхнепермские образования, девонско-каменноугольные отложения, залегающие на значительных глубинах. В мире известно немало разновидностей доломита в зависимости от содержания чистого кальцита и магнезита. С целью конкретизации смешанных известково-доломитовых пород и определения процентного содержания $CaCO_3$ исследуемого объекта была использована широко распространенная классификация Вишнякова С.Г. (рис. 3), в соответствии с которой породу следует относить к «чистой» при содержании примесей не более 5 %; в настоящее время Кузнецовым В.Г. и другими учеными допускается значение 10 % [10]. При первичном образовании известняка с примесью доломита его называют доломитистым или доломитовым, при явно вторичном возникновении доломитовой составляющей – известняком доломитизированным [10, с. 215].



Рис. 3. Классификационная диаграмма подряда известняк–доломит Вишнякова С.Г.

Содержание первичного кальцита в доломите характеризуется терминами «известковистый» или «известковый», вторичного – «кальцитовый» или «кальцитизированный».

Для наглядной оценки объемов и качественного состава доломитовых пород были проанализированы наиболее крупные месторождения доломита на территории РФ (табл.1).

Месторождения доломита в России

Наименование месторождения	Расположение	Объем запасов	Преобладающие породы	Добываемый материал
Данковское	Липецкая область	700,8 млн т	доломиты с прослойками доломитизированных известняков	флюсовый доломит, строительный щебень, мука для известкования кислых почв и облицовочная плитка
Саткинское	Челябинская область	394,3 млн т	доломитистый известняк, доломитовый известняк, известковый доломит, известковистый доломит	доломит для флюсов и огнеупоров, а также отделочного доломита
Мелехово-Федотовское	Владимирская область	81 млн т	доломитовый известняк, известковый доломит известковистый доломит	доломит для производства стекла
Боснинское	Северная Осетия	236,5 млн т	доломитовый известняк, известковый доломит известковистый доломит	доломит для огнеупоров, стекольный доломит, облицовочные плиты
Заиграево	Бурятия	130 тыс т в год	доломит	доломит для стройматериалов
Мекегинское	Дагестан	3500 тыс.т	доломитистый известняк	белый, серый и желтый облицовочный доломит

Разведанные месторождения позволяют добывать доломиты для производства строительных материалов, стекла, флюса, огнеупоров, строительных и облицовочных камней, для использования в качестве сырья для вяжущих материалов. Вследствие вариативности процентного содержания MgO, CaO, а также состава добываемого сырья усиливается необходимость в изучении физико-механических свойств доломитов каждого месторождения.

2. Физико-химические основы получения каустического доломита

В результате обжига доломит разлагается и претерпевает ряд изменений [11], обусловленных температурой обжига (табл. 2). Обжиг при температуре 650-750 °С (полуобжиг) приводит к удалению из доломита углекислоты, связанной с углекислым магнием. Продукт полуобжига – каустический доломит – состоит из MgO и CaCO₃:



Обжиг с целью получения каустического доломита нужно проводить таким образом, чтобы в конечном продукте было максимально возможное количество оксида магния и пониженное содержание оксида кальция. Плотность качественного каустического доломита находится в диапазоне 2,78-2,85 г/см³ [12]. Обжиг при 900-950 °С и удаляет из доломита углекислоту, связанную с углекислым кальцием, и позволяет получить доломитовую известь, состоящую из CaO и MgO:



Дальнейшее увеличение температуры обжига до 1400-1600 °С приводит к образованию спеченного, намертво обожженного, металлургического доломита, используемого для получения огнеупоров.

Химический состав доломита и продуктов его обжига

Наименование	t обжига, °C	Содержание в %				
		MgCO ₃	CaCO ₃	MgO	CaO	CO ₂
Доломит (порода)	-	45,7	54,3	21,9	30,4	47,7
Каустический доломит (полуобожженный)	650-750	-	71,3	28,7	39,9	31,44
Доломитовая известь (обожженный доломит)	900-950	-	-	41,8	58,2	
Доломит спеченный (намертво обожженный)	1400-1600	-	-	41,8	58,2	-

Каустический доломит относится к воздушным магниальным вяжущим. При затворении водным раствором хлористого магния каустический доломит, который иногда называют магниальным доломитовым цементом [13], образует камнеподобное вещество с прочностью на сжатие до 350-400 кг/см². В технологии производства магниальных вяжущих известно, что концентрация затворителей влияет на скорость схватывания. Повышенная концентрация обеспечивает высокую конечную прочность образца. Однако применение растворов, имеющих плотность более 1,30 г/см³, приводит к появлению трещин и образованию высолов.

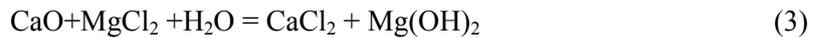
На основе анализа патентов РФ на изобретение и имеющихся публикаций составлена табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Сравнительный анализ способов получения каустического доломита

Авторы, источник	Размер фракций, мм	Затворитель		Температура обжига, °C	Время обжига, мин	Свободный CaO, %
		плотность, г/см ³	кол-во, %			
Бикбау М.Я.	5-20	MgCl ₂		1 стадия 450-550	1 стадия 20-100	<1,2
		1,2-1,3	0,5-3,0	2 стадия 600-720	2 стадия 5-25	
Хузиахметов Р.Х., Ибрагимов Р.А.	1	бишофит		600-700	20-25	<0,2
		1,2	23 (MgO)			
Крамар Л.Я., Черных Т.Н.	0,1-0,5	водный раствор шлама карналлитового хлоратора		550-700	90	параметр отсутствует
		параметр отсутствует	1-1,7 (сух.шлама)			
Маноха А.М., Сутула И. Г.	0,5-1,0	MgCl ₂		780	120	параметр отсутствует
Данилова Л.А., Егорова А.Д., Лиханов В.С.	10-13	MgSO ₄		700	параметр отсутствует	<6
		1,2	параметр отсутствует			
Бирюлева Д.К., Шелихов Н.С., Рахимов Р.З., Бирюлев Г.Н.	10-20	водный раствор бишофита		750	150	параметр отсутствует
		1,25	параметр отсутствует			
Кузьменков М.И., Марчик Е.В.	до удельной поверхности 200- 300 м ² /кг	кристаллический бишофит		1) 400-500	1) 10-60	параметр отсутствует
		параметр отсутствует	0,5-3,0	2) 550-680	2) 5-20	
Марчик Е.В.	5-20	1) хлорид магния или 2) сульфат магния		800-825	40-60	параметр отсутствует
		1) 1,2-1,25 2) 1,25-1,3	параметр отсутствует			

Выбор размера фракций, затворителя, температуры и времени обжига исходного материала влияет на качество конечного продукта. При размере частиц более 1 мм возникает градиент температур между верхним слоем CaCO_3 и внутренним – MgCO_3 , что влечет за собой неполное разложение MgCO_3 . Увеличение температуры получения каустического доломита выше 720-740°C и времени обжига может привести к началу разложения CaCO_3 . На основе анализа литературы [14, 15] отмечено, что лишь у немногих авторов регламентируется содержание свободного CaO в каустическом доломите. Однако даже небольшое содержание свободного CaO приводит к образованию CaCl_2 , способного адсорбировать влагу из атмосферы, что впоследствии негативно сказывается на готовых изделиях:



Вязущее на основе каустического доломита может применяться для изготовления разнообразных строительных материалов и изделий: кирпичей, листовых материалов, строительных смесей, цементов, бетонов, тампонажных растворов, грунтобетонов и т.д. (табл. 4). Материалы и изделия на основе каустического доломита, как и каустического магнезита, экологически чисты, технологичны, прочны, легки, долговечны.

Данные табл. 4 отображают сравнительно большой спектр применения магнезиального вяжущего на основе каустического доломита. Колонка показателя качества продукции иллюстрирует количественную характеристику одного или нескольких свойств продукции, рассматриваемую применительно к определенным условиям эксплуатации.

Перспективны направления повышения физико-химических свойств готовой продукции (табл. 5). Способы воздействия могут осуществляться подбором раствора затворителя, (плотности, процентного содержания); вида заполнителя (размера фракций, органического, неорганического происхождения, удельной поверхности); модифицирующих растворов.

Т а б л и ц а 4

Материалы на основе каустического доломита

Авторы, источник	Материал	Затворитель	Заполнитель	Добавки	Показатель качества продукции
1	2	3	4	5	6
Кирпич					
Маноха А.М., Сутула И. Г.	кирпич	17 % раствор MgCl_2 до влажности 7-8 %	песок, молотые горные породы	модифицирующие добавки	$R=28$ МПа
Листовые материалы					
Крамар Л.Я., Чашкин А.В., Чулков В.В., Чулкова Т.В.	СМЛ	10-30 % раствор MgCl_2	опилки древесных фракций 0,1-2,0 мм, перлит, песок, доломитовая мука, зола-унос	реактивы: zf-1, zf-2, ортофосфорная кислота, армирование стеклотканью	параметр отсутствует
Панибратов Ю.П., Хренов В.И., Козырев В.Б.	масса для производства облицовочного материала для внутренней и наружной отделки помещений	раствор MgCl_2 плотностью 1,12-1,14 г/см ³	кальциево- магниевый силикат	ПАВ, пигмент	$R=32$ МПа, $F=29$

1	2	3	4	5	6
Андреева К.А., Закревская Л.В., Юдин И.И.	конструкционно-теплоизоляционный материал	бишофит 6,5-13,5	глина, костра технической конопля	суперфосфат	$R=19$ МПа, $W=13,4$ %
Лукаш Е.В., Стародубенко Н.Г., Плышевский С.В.	СДЛ	20-30 % раствор $MgCl_2$	древесные опилки	вспученный перлит	$R=12,5$ МПа, $R_{изг}=6,4$ МПа
Соловьева Т.В., Кузьменков М.И., Снопкова Т.А., Тишин Ю.Д.	древесно-минеральный композиционный материал на основе доломитового вяжущего и древесных отходов	параметр отсутствует	древесные отходы различного происхождения	параметр отсутствует	параметр отсутствует
Строительные смеси					
Бирюлева Д.К., Шелихов Н.С., Рахимов Р.З., Бирюлев Г.Н.	сырьевая смесь для декоративного раствора	раствор $MgCl_2$ плотностью 1,25 г/см ³	параметр отсутствует	обожжённая молотая сапропель	$R=106$ МПа
Захаров С. А.	самовыравнивающаяся строительная смесь	солевой компонент в виде водного раствора 1,1-1,35кг/л одной из солей: хлористого магния, хлорного железа, сульфата магния	сыпучий инертный наполнитель (удельная поверхность 500-5000см ²)	пигмент, стабилизирующие водоудерживающие и модифицирующие добавки	$R=15$ МПа
Щепочкина Ю.А.	сырьевая смесь для производства облицовочной плитки	параметр отсутствует	лесс, бентонит, стеклобой, нефелиновый шлам	горелая формовочная земля	$R=100$ МПа, $F=100$
Цементы и бетоны					
Марчик Е.В.	магнезиальный цемент	Раствор $MgCl_2 \cdot 6H_2O$			
Марчик Е.В., Кузьменков М.И.	неавтоклавный пенобетон	раствор $MgSO_4$ плотностью 1,3 г/см ³	пенообразователь «Пеностром»	параметр отсутствует	$R=2,74$ МПа
Смирнов В.А., Вайнер А.Я., Башлыков Н.Ф.	Высококачественный магнезиальный бетон	раствор $MgCl_2$ плотностью 1,25 г/см ³	песок, промышленные отходы: древесная стружка, золошлаковые смеси, бумажные и пластиковые отходы	фосфатная, боратная добавки	$R=30-90$ МПа, $F=100$, $W=10$

1	2	3	4	5	6
Аблязова М.А., Дейниченко А.А., Фаликман В.Р., Сорокин Ю.В., Башлыков Н.Ф., Смирнов В.А.	ячеистые бетоны, бетоны для полов	соли электро- литов $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $FeSO_4 \cdot 5H_2O$	песок, промыш- ленные отхо- ды: древесная стружка, золо- шлаковые сме- си, бумажные и пластиковые отходы	алюмофос- фатная, фосфатная, боратная добавки	$R=0,9-$ $20,5$ МПа, $R_{зв}=41-$ 45 дБ/м ² , $\alpha=0,057-$ $0,83$
Тампонажные растворы и грунтобетоны					
Толкачев Г.М.	тампонажный раствор	раствор $MgCl_2$ плотностью 1,2 8-1,30 г/см ³	молотый кальцит или доломит	кислая зола-унос твердых топлив	$R=35$ МПа
Любин П.А., Закревская Л.В., Гавриленко А.А.	грунтобетон	$MgCl$ плотностью 1,2 г/см ³	глинистый грунт	трепел, дигидро- фосфат калия	$R=13$ МПа, $W=0,8$ %
Закревская Л.В., Козлов И.В.	состав укрепленного грунта	$MgCl$	глинистый грунт	одноза- мещенный фосфат калия	$R=6,11$ МПа

Пр и м е ч а н и е : R – прочность при сжатии; $R_{изг}$ – прочность на изгиб; F – морозостойкость (кол-во циклов); W – водостойкость; α – коэффициент звукопоглощения; $R_{зв}$ – звукоизолирующая способность.

Т а б л и ц а 5

Способы повышения физико-механических свойств составов на основе каустического доломита

Авторы, источник	Объект иссле- дования	Улучшение свойств материала	Применяемые добавки	Дополнительные технологические операции	Характери- стики улучшен- ных свойств
1	2	3	4	5	6
Прочность					
Копелян- ский Г.Д., Попов Н.А.	каусти- ческий доломит	повышение прочности состава, пониженное содержание активной окси кальция	добавка сернокислого кальция при малом содержании окси кальция или гидрата окси кальция	добавление гипса в процессе помола каустического доломита, обожженного при $t=600-650^\circ C$	параметр отсутствует
Вальдштей- нас И.З., Ласис А.И.	каусти- ческий доломит	исключение вредных примесей переклаза	размолотый каустический доломит	размолотый каустический доломит подвергают последовательно гидратации (гашению) и вторичному обжигу при $t=400-$ $550^\circ C$	параметр отсутствует

1	2	3	4	5	6
Данилова Л. А., Егорова А. Д., Лиханов В. С.	каустический доломит	повышение прочности гранулированием	раствор 2 % хлорида натрия	гранулирование осуществлялось добавлением раствора хлорида натрия в измельченное доломитовое сырье и последующим раскатыванием теста в гранулы <i>d</i> 10-13мм	$R=13,17$ МПа, 12,79 МПа, класс по прочности В10
Водостойкость					
Лукаш, Е.В., Кузьменков М.И.	магнезиальный цемент	повышение водостойкости	минеральные (железо-, кремнеземсодержащие, карбонатные) и органические добавки	синтез фталиевого ангидрита и гидроксида калия с последующим кипячением в среде изопропилового спирта в количестве 1,5 % от массы вяжущего	повышения W до 0,86
Aiken, Timothy & Russell, Mark & Mcpolin	магнезиальный цемент	повышение водостойкости	добавки отсутствуют	регулирование молярного соотношения $MgO/MgCl_2$ и $H_2O/MgCl_2$ и условий твердения (температура и время)	увеличение прочности на 16 % , $R=121-$ 140МПа
Митина Н.А., Ревва И.Б., Дитц А.А.	магнезиальное вяжущее	повышение водостойкости	раствор бикарбоната магния	насыщение углекислым газом 9 атм при температуре 25°C	$R=63,2$ МПа
Li, Ke & Wang, Yuansheng & Yao, Nina & Zhang, Aimin	оксихлоридный магнезиальный цемент	повышение водостойкости	добавки, содержащие фосфаты и полимерные материалы	параметр отсутствует	параметр отсутствует
Luo, Xueru & Fan, Wenqiang & Li, Chunqing & Wang, Yong & Yang	оксихлоридный магнезиальный цемент	повышение водостойкости	оксиуксусная кислота; гликолевая кислота	параметр отсутствует	параметр отсутствует
Chen, Xiaoyang & Zhang, Tingting & Bi, Wanli & Cheeseman	оксихлоридный магнезиальный цемент	увеличение пористости уменьшение термической стабильности	фосфорная и винная (тартаровая) кислота	параметр отсутствует	параметр отсутствует
He, Pingping & Poon, Chi Sun & Tsang, Dan	оксихлоридный магнезиальный цемент	улучшение водостойкости	добавка стеклянного порошка и золы	параметр отсутствует	параметр отсутствует

1	2	3	4	5	6
Звездина Е. В., Трескова Н. В.	каустический доломит	повышение водостойкости	комплексная добавка, включающая тринатрийфосфат и анионное ПАВ	замена части каустического доломита сырым доломитовым порошком	повышения <i>W</i> более 0,8
Долговечность					
Aiken, Timothy & Mcpolin, D.O. & Russell, Mark & Nanukuttan	листы MgO окисульфатные и оксихлоридные	влияние повышенной влажности и различных температур на долговечность	параметр отсутствует	исследование листов, доступных на рынке, содержащих перлит, опилки, стекловолоконную сетку	срок службы листов 33 года
Скорость и температура реакции					
Скрамтаев Б.Г.	магнезиальное вяжущее	повышение скорости схватывания, твердение в условиях низких температур	растворы соляной или серной кислоты 5-15 %-й концентрации, кислотосодержащие отходы химической промышленности	параметр отсутствует	параметр отсутствует
Гуюмджян П.П., Ветренко Т.Г., Чичилов М.Н.	магнезиальное вяжущее	увеличение скорости разложения доломита	фосфатов магния и алюминия	введение в необожженный доломит фосфатов перед термическим разложением приводит к увеличению количества активных центров, что позволяет увеличить скорость разложения карбоната магния	увеличение прочности до 40МПа
Черкасов А.В.	магнезиальное вяжущее	снижение температуры диссоциации доломита	добавка Na_2CO_3 в количестве 3 %	снижение температуры диссоциации доломита за счет разрыва связей в двойном карбонате с образованием $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$	снижение температуры диссоциации доломита на 130-150°
Комплексное повышение свойств					
Вольф А.В., Манюха А.М., Аладикова О.Е.	магнезиальное вяжущее	ускорение темпа набора прочности и увеличение 28-суточной прочности при отрицательных температурах твердения	поликарбоксилатный пластификатор РС и меламинсульфонат MS	дозировка добавок 0,3 % от массы каустического доломита	увеличение прочности на 60 % в случае РС, увеличение прочности на 58 % при MS

1	2	3	4	5	6
Гуюмджян П.П., Ветренко Т.Г., Цыбакин С., Чичилов М.Н	магнези- альное вяжущее	увеличение скорости разложения карбоната магния, повышение водостой- кости и прочности изделий	фосфаты алю- миния и магния, отходы произ- водства хлопка (очесы) и отхо- ды искусствен- ного меха	введение в необожженный доломит фосфа- тов перед термическим разложением	$R=50\text{МПа}$
Wang, Dongxing & Gao, Xiangyun & Liu, Xiqi & Zeng, Gang	оксихло- ридный магнези- альный цемент	повышение долговечно- сти, прочно- сти на сжатие	гранулирован- ный доменный шлак	параметр отсутствует	параметр отсутствует
Aiken, Timothy & Kwasny, Jacek & Russell, Mark & McPolin, Daniel & Bagnall, Leo	оксихло- ридный магнези- альный цемент	повышение водостой- кости и прочности	добавление одной из 4-х добавок: зольной пыли, шлака, метакео- лина, каолиновой глины с повышен- ным содержанием железа	добавки вводили после затворения при комнатной температуре при постоянном перемешивании в течение 4 мин	$R=100\text{МПа}$
Gong, Wei & Wang, Nan & Zhang, Na	оксисуль- фатный магнези- альный цемент	снижение се- бестоимости производства и улучшение свойств цемента	зольная пыль, метакеолин	применение двух добавок единовременно	параметр отсутствует
Chau, C.K. & Chan, James & Li, Zongjin	оксихло- ридный магнези- альный цемент	повышение водостой- кости, обраба- тываемости поверхности	зольной пыли	параметр отсутствует	параметр отсутствует
Liu, Tong & Li, Chunqing & Li, Li & Fan, Wenqiang & Dong, Yudong & Liang, Huihui & Yang, Hongjian	оксисуль- фатный магнези- альный цемент	повышение водостой- кости и прочности	зольная пыль, метакеолин	параметр отсутствует	$R=100\text{МПа}$, $W=0.8-0.91$
Ганина Е. А., Закревская Л. В.	магнези- альное вяжущее	повышение механиче- ской прочности	органическая и неорганическая фибра	добавление песка, пеностекла и неор- ганической фибры с затворением вод- ным раствором бишофита	$R=53-68\text{МПа}$
Yu, Kequan & Guo, Yingying & Zhang, Y.X. & Soe, Khin	оксихло- ридный магнези- альный цемент	повышение прочности на сжатие и изгиб	полиэтилен сверхвысокой молекулярной массы или СВМПЭ	добавление волок- на в две партии и смешивание со скоростью до 420 оборотов в мину- ту в течение 1 мин	$R_{\text{изг}}=29,8$ МПа, $W=1.2$

П р и м е ч а н и е : R – прочность при сжатии; $R_{\text{изг}}$ – прочность на изгиб; W – водостойкость.

Анализ данных табл. 5 позволил выделить ведущие направления повышения физико-химических свойств разрабатываемых составов из каустического доломита: добавление фибры (ограниченной/неорганической) в качестве упрочняющего компонента в тело матрицы из магнезиального цемента; введение поверхностно-активных веществ (ПАВ); прессование и формирование гранул; добавки кислот; использование техногенных отходов промышленности.

Выводы

Для решения проблем снижения больших энергозатрат, количества выбросов углекислого газа предложено использовать магнезиальное сырье.

Природные запасы магнийсодержащих минералов составляют не менее 8 % земной коры, прогнозные запасы в мире насчитывают 8454 млн т, из них 23 % приходится на РФ. Согласно классификации магнезиального сырья Вишнякова С.Г., большинство месторождений России сложены доломитистыми известняками с содержанием кальция 75-35 %. В связи с неоднородным минералогическим и химическим составом необходимо регулировать процесс декарбонизации, температуру обжига, содержание свободного оксида магния и кальция при получении магнезиальных цементов.

Магнезиальные цементы, являющиеся естественными, природными вяжущими, несомненно, имеют хорошие перспективы как значительно более экологичный и менее энергоемкий материал, чем портландцемент, а также в связи с большим спектром получения из него разнообразных изделий.

Список литературы

1. Рахимов, Р.З. Топливо-энергетический комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества / Р.З. Рахимов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 3(61). – С. 67–74. – DOI 10.52409/20731523_2022_3_67. – EDN НОАОТХ.
2. Drnek, Thomas & Moraes, Matheus. (2019). 56-Drnek-2018-Magnesite-overview-RHIM-bulletin-2018-1-181120-published.
3. Обзор рынка магнезиального сырья (магнезита и брусита) и магнезиальных порошков в СНГ. – М., 2011.
4. Крамар, Л.Я. Теоретические основы и технология магнезиальных вяжущих и материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Крамар Людмила Яковлевна. – Челябинск, 2007.
5. Walling, Sam & Provis, John. (2016). Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future? Chemical Reviews. 116. 10.1021/acs.chemrev.5b00463.
6. Freyer, Daniela. (2017). 10. Magnesia building material (Sorel cement) – from basics to application: Composition, Properties, Application. 10.1515/9783110473728-011.
7. Guo, Yingying & Zhang, Y.X. & Soe, Khin & Pulham, Mark. (2018). Recent development in magnesium oxychloride cement. Structural Concrete. 19. 1-11. 10.1002/suco.201800077.
8. Шелихов, Н.С. Особенности карбонатного сырья Татарстана и его применение для производства местных строительных материалов / Н.С. Шелихов, Р.З. Рахимова // Известия КГАСУ. – 2010. – №2(14). – С. 297–302.
9. Шишкин, А.В. Доломиты Татарстана для производства магнезиальных вяжущих / А.В. Шишкин, А.И. Шевелев, В.В. Устинов // Современные проблемы строительного материаловедения. Ч.3. – Казань, 1996.
10. Литология / О. В. Япаскурт. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 357 с.
11. Хузиахметов, Р.Х. Методика оценки «активности» MgO в магнезиальных вяжущих материалах / Р.Х. Хузиахметов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 21. – С. 58–64.
12. Хузиахметов, Р.Х. Технология магнезиальных вяжущих из доломитового порошка и оценка качества продуктов обжига / Р.Х. Хузиахметов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 7. – С. 101-107. – EDN QAIDST.

13. Бирюлева, Д.К. Доломитовый цемент повышенной прочности и водостойкости: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Бирюлева Диляра Камилловна. – Казань, 2000.

14. Пат. 2158241 Российская Федерация, МПК7 С 04 В 9/00. Способ получения каустического доломита / Открытое акционерное общество «Московский институт материаловедения и эффективных технологий». – № 98100788/03; заявл. 15.01.98; опубл. 27.10.00.

15. Патент № 2744365 С1 Российская Федерация, МПК С04В 40/00, С04В 9/20, С04В 2/10. Способ получения вяжущего на основе доломита для изготовления стеновых и отделочных изделий гражданского строительства : № 2020106858: заявл. 13.02.2020: опубл. 05.03.2021 / Р.Х. Хузиахметов, Р.А. Ибрагимов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Доломит». – EDN OFQIDT.

References

1. Rakhimov, R.Z. Fuel and energy complex, ecology and mineral binders / R.Z. Rakhimov // *Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2022. – № 3(61). – P. 67–74. – DOI 10.52409/20731523_2022_3_67. – EDN HOAOTX.

2. Drnek, Thomas & Moraes, Matheus. (2019). 56-Drnek-2018-Magnesite-overiew-RHIM-bulletin-2018-1-181120-published.

3. Review of the market of magnesia raw materials (magnesite and brucite) and magnesia powders in the CIS. – M., 2011.

4. Kramar, L.Ya. Theoretical foundations and technology of magnesia binders and materials: abstract. dis. ... Doctor of Sciences: 05.23.05 / Kramar Lyudmila Yakovlevna. – Chelyabinsk, 2007.

5. Walling, Sam & Provis, John. (2016). Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future? *Chemical Reviews*. 116. 10.1021/acs.chemrev.5b00463.

6. Freyer, Daniela. (2017). 10. Magnesia building material (Sorel cement) – from basics to application: Composition, Properties, Application. 10.1515/9783110473728-011.

7. Guo, Yingying & Zhang, Y.X. & Soe, Khin & Pulham, Mark. (2018). Recent development in magnesium oxychloride cement. *Structural Concrete*. 19. 1-11. 10.1002/suco.201800077.

8. Shelikhov, N.S. Features of carbonate raw materials of Tatarstan and its application for the production of local building materials / N.S. Shelikhov, R.Z. Rakhimova // *News of KGASU*. – 2010. – №2(14). – P. 297–302.

9. Shishkin, A.B., Dolomites of Tatarstan for the production of magnesia binders / A.B. Shishkin, A.I. Shevelev, V.V. Ustinov // *Modern problems of construction materials science*. Part 3. – Kazan, 1996.

10. *Lithology* / O.V. Yapaskurt. – 2nd ed., reprint. and additional – M.: INFRA-M, 2016. – 357 p.

11. Khuziakhmetov, R.H. Methodology for assessing the "activity" of MgO in magnesian binding materials / R.H. Khuziakhmetov // *Bulletin of Kazan Technological University*. – 2013. – Vol. 16, No. 21. – P. 58–64.

12. Khuziakhmetov, R.H. Technology of magnesia binders from dolomite powder and evaluation of the quality of firing products / R.H. Khuziakhmetov // *Bulletin of Kazan Technological University*. – 2013. – Vol. 16, No. 7. – P. 101–107. – EDN QAIDST.

13. Biryuleva, D.K. Dolomite cement of increased strength and water resistance: abstract. dis. ... Candidate of Sciences: 05.23.05 / Biryuleva Dilyara Kamilovna. – Kazan, 2000.

14. Пат. 2158241 Russian Federation, IPK7 From 04 To 9/00. Method of obtaining caustic dolomite / Open Joint Stock Company "Moscow Institute of Materials Science and Effective Technologies". – No. 98100788/03; application 15.01.98; publ. 27.10.00.

15. Patent No. 2744365 C1 Russian Federation, IPC C04B 40/00, C04B 9/20, C04B 2/10. Method of obtaining a binder based on dolomite for the manufacture of wall and finishing products of civil construction : No. 2020106858: application 13.02.2020: publ. 05.03.2021 / R.H. Khuziakhmetov, R.A. Ibragimov; applicant Limited Liability Company "Dolomite". – EDN OFQIDT.

УДК 691.327:539.4

DOI 10.54734/20722958_2023_1_65

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Макридин Николай Иванович,**
доктор технических наук, главный научный
сотрудник научно-исследовательского
сектора**Максимова Ирина Николаевна,** кандидат
технических наук, доцент кафедры
«Управление качеством и технология
строительного производства»
E-mail: maksimovain@mail.ru*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Makridin Nikolai Ivsnovich,**
Doctor of Sciences, Chief Researcher of the
research sector**Maksimova Irina Nikolaevna,**
Candidate of science, Associate Professor of
the department «Quality Management and
Construction Production Technology»
E-mail: maksimovain@mail.ru

ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПАРАМЕТРЫ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Рассмотрены основные типы механического разрушения твердых тел. Изучено трещинообразование в цементной дисперсной системе. Показано, что наиболее простую модель трещины дает краевой полуэллиптический вырез в тонкой пластине. Приведены значения коэффициента интенсивности напряжений для краевой и внутренней сквозных трещин в тонкой пластине. На примере определен критический размер трещины для цементного композита, а также стальной балки, позволяющий судить о безопасности дальнейшей эксплуатации материала и конструкции.

Ключевые слова: цементные системы; механика разрушения; структура; трещиностойкость; параметры; реализация

ELEMENTS OF STRUCTURAL MECHANICS OF MATERIALS DISTRUCTION AND PARAMETERS OF CRACK RESISTANCE OF CEMENT SYSTEMS

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

The main types of mechanical destruction of solids are considered. Formation of cracks in cement dispersed system has been studied. It is shown that the simplest crack model is provided by a semi-elliptical cut in a thin plate. The values of stress intensity factor for edge and internal through cracks in a thin plate are given. On the example, the critical size of a crack for a cement composite, as well as a steel beam, is determined, which makes it possible to judge about the safety of further operation of the material and structure.

Keywords: cement systems; destruction mechanics; structure; crack resistance; options; implementation

В работах [1–6] рассмотрены вопросы трещинообразования и разрушения цементных дисперсных систем при статическом нагружении стандартных образцов; выявлены силовые и энергетические критерии разрушения цементных дисперсных систем, определяющих сущность кинетических процессов, происходящих при деформировании и разрушении цементных композитов, – по амплитудно-энергетическому распределению импульсов сигнала акустической эмиссии на диаграмме нагружения.

В работах [7, 8, 9] на обширном экспериментальном материале показаны процессы деформирования и разрушения элементов структуры цементных гетерогенных систем с оценкой силовых, деформационных и энергетических критериев, определяющих

предельное состояние их структуры по трещиностойкости, деформативности и прочности, позволяющее точнее прогнозировать механическое поведение и работоспособность конструкционного материала под нагрузкой.

Реализация расчетного метода теории предельных состояний дает завышенные значения прочности, что прежде всего обусловлено тем, что в данной теории совершенно не учитывается негативное влияние на прочность начальных трещин. В этой связи возникла необходимость в детальном изучении трещинообразования. Установлено, что преимущественную часть времени трещина подрастает до своего критического размера, после чего происходит ее катастрофически быстрое распространение, доводящее до распада тела на части, причем такой характер ее развития практически не меняется и сохраняется для пластического и усталостного, а также для хрупкого разрушения. По виду трещины разделяются на поверхностные и внутренние, сквозные и закрытые. Наиболее простую модель трещины можно представить в виде краевого полуэллиптического выреза в тонкой пластине (рис. 1). Если пластина нагружена растягивающим напряжением σ , то у вершины полуэллиптической трещины возникает значительное повышение локального напряжения, а концентрация напряжений достигает максимума:

$$\sigma_{\max} = \sigma(1 + 2(a/b)).$$

Введем для эллипса $\rho = b^2/a$, получим:

$$\sigma_{\max} = \sigma(1 + 2(a/\rho)^{1/2}).$$

Из приведенного равенства следует, что максимальное напряжение у вершины трещины существенно зависит от радиуса ρ , который определяет остроту трещины. С уменьшением радиуса ρ величина σ_{\max} неограниченно возрастает. Здесь отношение $\sigma_{\max}/\sigma = \beta$ – коэффициент концентрации напряжений. Следовательно, коэффициент концентрации напряжений показывает, во сколько раз локальные напряжения превышают среднее номинальное напряжение:

$$\beta = 1 + 2(l/\rho)^{1/2} \approx (l/\rho)^{1/2},$$

где $l = a$ – начальная длина краевой трещины.

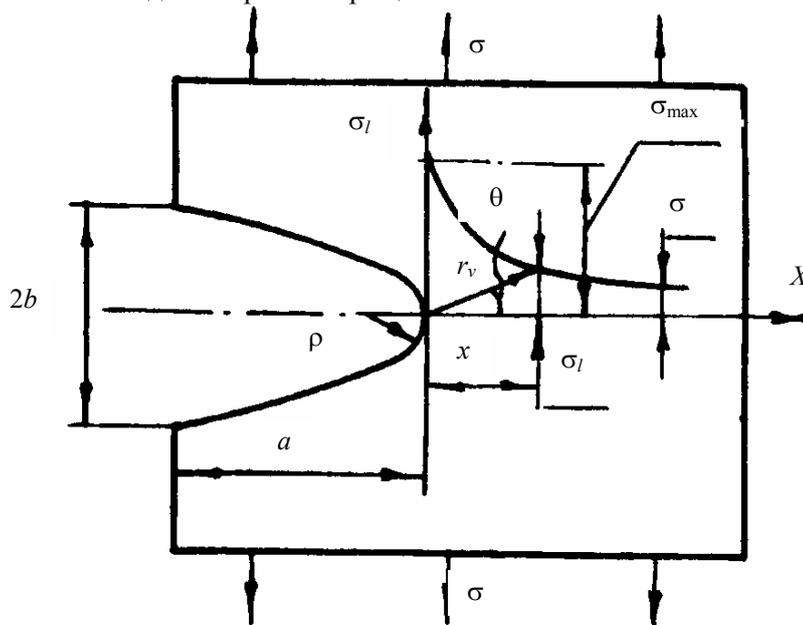


Рис. 1. Модель краевой трещины полуэллиптической формы:
 a, b – большая и малая полуось эллипса, соответственно; ρ – малый локальный радиус эллипса

Локальное напряжение σ_l меняется с расстоянием x от вершины трещины в соответствии с зависимостью

$$\sigma_l = \sigma(l/x). \quad (1)$$

Известны три основных типа разрушения твердых тел: I – нормальный отрыв при растяжении, II – скол при продольном сдвиге, III – раздир при поперечном сдвиге (рис. 2).

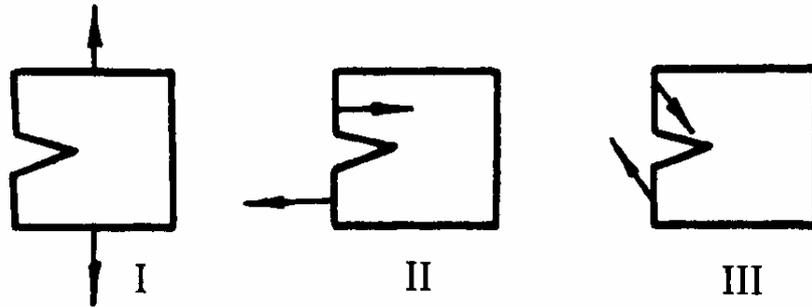


Рис. 2. Типы разрушения твердых тел

Наиболее распространенным типом разрушения является отрыв при растяжении. Из теории трещин известно, что для этого типа разрушения напряжение σ_l определяется равенством

$$\sigma_l = K_I / (\sqrt{2\pi r_v}) \cdot x \cdot \cos(\theta/2) \cdot x \cdot [1 + \sin(\theta/2) \cdot \sin^3(\theta/2)], \quad (2)$$

где r_v – модуль радиуса-вектора, проведенного из вершины трещины к произвольной точке на кривой $\sigma_l = f(x)$; θ – полярный угол между осью и радиусом-вектором r_v (см. рис. 1); K_I – коэффициент интенсивности напряжений, индекс I указывает на первый тип разрушения.

Коэффициент интенсивности напряжений K_I (K_{II} , K_{III} – для скола и раздира, соответственно) является важным параметром в механике разрушения. Справедливо:

$$K_I = c \cdot \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (3)$$

где c – поправочный коэффициент, зависящий от формы образца, схемы его нагружения и типа трещины (рис. 3). С учетом изложенного зависимость (2) принимает вид:

$$\sigma_l = (c/\sqrt{2}) \cdot \sigma \sqrt{l/x}.$$

Приведенная формула позволяет непосредственно рассчитывать локальное напряжение σ_l в зависимости от расстояния x от вершины трещины. Условие разрушения характеризуется неравенством

$$K_I \geq K_{lc}, \quad (4)$$

где K_{lc} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, характеризующее переход развития трещины в стадию катастрофически быстрого неконтролируемого роста. Численные ориентировочные значения коэффициента K_{lc} для некоторых материалов приведены в таблице.

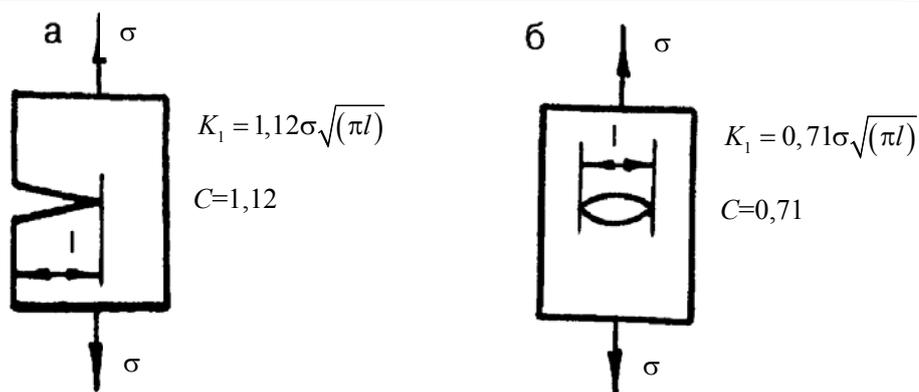


Рис. 3. К определению коэффициента интенсивности напряжений K_I для краевой (а) и внутренней (б) сквозных трещин в тонкой пластине

Значения коэффициента K_{Ic}

Материал	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}
Сталь	160
Алюминиевый сплав	25
Сталефибробетон	20
Стеклофибробетон	15
Дюралюминий	11,1
Чугун	3,2
Бетон рядовой	2,0
Бетон мелкозернистый	1,0
Древесина	0,85
Стекло	0,6
Цементный камень	0,5
Полистирол	0,41
Графит	0,13

Катастрофически быстрое развитие трещина приобретает после достижения некоторого критического l_c размера. Коэффициент K_{Ic} непосредственно связан с критическим размером трещины l_c согласно зависимости (3):

$$K_{Ic} = c\sigma\sqrt{\pi l_c}. \quad (5)$$

Пример 1. В бетонной панели перекрытия с длиной пролета $L = 6$ м, шириной $B = 1,8$ м и толщиной $H = 150$ мм обнаружена сквозная трещина длиной $l = 60$ мм. Панель нагружена в середине пролета усилием $F = 2,0$ тс и деформируется в условиях изгиба. Трещина ориентирована перпендикулярно направлению растяжения панели. Произвести критическую оценку безопасности дальнейшей эксплуатации панели перекрытия.

Решение. Определим напряжение изгиба, действующее в панели:

$$\sigma = 3(FL/2BH^2) = (3 \cdot 1,96 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot 6 \text{ м}) / (2 \cdot 1,8 \text{ м} \cdot 2,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2),$$

где $F = 2 \text{ тс} = 1,96 \cdot 10^4 \text{ Н}$.

Коэффициент интенсивности напряжений определим (рис. 3, б) по формуле $K_I = 0,71\sigma\sqrt{\pi l}$. Критерий разрушения отвечает равенству $K_I = K_{Ic}$, откуда находим критический размер трещины:

$$l_c = K_{Ic}^2 / (0,71^2 \cdot \sigma^2 \cdot \pi) = 4 \text{ МПа}^2 \cdot \text{м} / (0,5 \cdot 19 \text{ МПа}^2 \cdot 3,14) = 134 \text{ мм},$$

где для бетона приняли $K_{Ic} = 2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Таким образом, обнаруженная трещина ($l = 60 \text{ мм}$) при указанной нагрузке не является критической, поскольку $l < l_c$. Тем не менее прежде чем давать заключение, необходимо выяснить причины появления и роста трещины и при необходимости произвести их устранение.

Пример 2. В стальной балке, эксплуатирующейся под действием растягивающего напряжения, максимальное значение которого составляет $\sigma_{\max} = 200 \text{ МПа}$, обнаружена краевая трещина длиной $l = 50 \text{ мм}$. Дать характеристику безопасности дальнейшей эксплуатации балки.

Решение. Произведем расчет коэффициента интенсивности напряжений по следующей формуле (рис. 3, а):

$$K_I = 1,12 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi l} = 1,12 \cdot 200 \cdot \sqrt{3,14 \cdot 0,05} = 88,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}.$$

Критическая величина коэффициента интенсивности напряжений составляет $K_{Ic} = 160 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (см. таблицу). Поскольку соблюдается условие $K_{Ic} > K_I$, то дальнейшую эксплуатацию стальной балки можно считать безопасной.

Определим критическую длину трещины:

$$l_c = K_{Ic}^2 / (1,12^2 \cdot \sigma^2 \cdot \pi) = 160^2 / (1,12^2 \cdot 200^2 \cdot 3,14) = 162 \text{ мм}.$$

Соблюдено условие безопасности $l < l_c$. Следует отметить, что и в данном случае в результате обследования очага разрушения должны быть приняты необходимые меры по предотвращению дальнейшего распространения трещины.

Реализация данного методического подхода позволит контролировать с позиций структурной механики разрушения материала качественные показатели композитных систем при реальной оценке предельного состояния материала под нагрузкой с целью оптимизации его состава.

Список литературы

1. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова. – М.: МГСУ, 2013. – 152 с.
2. Структура и параметры трещиностойкости цементных композитов / Н.И. Макридин, А.Н. Бобрышев, В.И. Калашников [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Н.И. Макридина. – Пенза: ПГАСА, 2000. – 142 с.
3. Макридин, Н.И. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова // Строительные материалы. – 2007. – № 9. – С. 25–27.
4. Максимова, И.Н. Взаимосвязь кинетических зависимостей внутреннего трения, модуля упругости и параметров разрушения конструкционной прочности модифицированных суперпластификатором С-3 структур цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 36–46.
5. Максимова, И.Н. Регрессионные взаимосвязи между параметрами качества структуры и конструкционной прочности цементного камня / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 28–34.

6. Макридин, Н.И. Фазовый состав и прочность дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Полубарова // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 36–44.
7. Пирадов, К.А. Механика разрушения и теория железобетона / К.А. Пирадов, Н.В. Савицкий // Бетон и железобетон. – 2014. – № 4. – С. 23–25.
8. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. – 2014. – № 3. – С. 6–14.
9. Каприелов С.С. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Строительные материалы. – 2017. – № 11. – С. 4–10.

References

1. Structure formation and structural strength of cement composites / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova. – M.: MGSU, 2013. – 152 p.
2. Structure and parameters of crack resistance of cement composites / N.I. Makridin, A.N. Bobryshev, V.I. Kalashnikov and others; Under total ed. Dr. tech. sciences, prof. N.I. Makridin. – Penza: PGASA, 2000. – 142 p.
3. Makridin, N.I. Method of acoustic emission in building materials science / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova // Building materials. – 2007. – No. 9. – P. 25–27.
4. Maksimova, I.N. Interrelation of kinetic dependences of internal friction, modulus of elasticity and fracture parameters of structural strength of structures of cement composites modified with superplasticizer C-3 / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 4 (33). – P. 36–46.
5. Maksimova, I.N. Regression relationships between the parameters of the quality of the structure and structural strength of cement stone / I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1 (46). – P. 28–34.
6. Makridin, N.I. Phase composition and strength of the dispersed-crystallite structure of cement stone / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Yu.V. Polubarova // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1 (38). – P. 36–44.
7. Piradov, K.A. Fracture mechanics and the theory of reinforced concrete / K.A. Piradov, N.V. Savitsky // Concrete and reinforced concrete. – 2014. – No. 4. – P. 23–25.
8. Bazhenov, Yu.M. Structural design of modern concrete: defining principles and technological platforms / Yu.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh // Construction materials. – 2014. – No. 3. – P. 6–14.
9. Kapriyelov, S.S. Cements and additives for the production of high-strength concrete / S.S. Kapriyelov, A.V. Sheinfeld // Building materials. – 2017. – No. 11. – P. 4–10.

УДК 001.8:519.7:69

DOI 10.54734/20722958_2023_1_71

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

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРИ СИНТЕЗЕ КОМПОЗИТОВ

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

Рассматриваются проблемы создания сложных технических систем проектирования различных комплексов и различных направлений инженерной, научной и хозяйственной деятельности, требующие объединения специалистов разных научных профилей, унификаций и согласования информации, получаемой в результате исследований. Успешное развитие этих междисциплинарных системных комплексных исследований связано с возможностями обработки информации, использованием математических методов как инструмента и языка высокой степени универсальности. Результат системных исследований рассматривается как выбор вполне определенной альтернативы: план развития системы, определение ее параметров на основе анализа сложной информации различной физической природы. Истоки системного анализа, его методические концепции строятся в рамках дисциплин, связанных с принятием решений, теории исследований операций и общей теории управления. Для иллюстрации приводятся конкретные примеры ряда частных математических задач, связанных с проблемами анализа и синтеза композиционных материалов.

Ключевые слова: сложные системы, композиционные материалы, анализ, синтез, декомпозиция, управление

MATHEMATICAL PROBLEMS OF SYSTEM ANALYSIS IN THE SYNTHESIS OF COMPOSITES

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

The problems of creating complex technical systems for the design of various complexes and various areas of engineering, scientific and economic activity, which require the efforts of specialists of different scientific profiles, unification and coordination of information obtained as a result of research, are considered. Successful development of these interdisciplinary, systematic, complex studies is associated with the possibilities of information processing, the use of mathematical methods

as a tool and a language of a high degree of universality. The result of system research is considered as a choice of a well-defined alternative: a plan for the development of the system, the determination of its parameters based on the analysis of complex information of various physical nature. The origins of systems analysis, its methodological concepts are built within the framework of disciplines related to decision making, the theory of operations research and general management theory. To illustrate it specific examples of a number of particular mathematical problems related to the problems of analysis and synthesis of composite materials are given.

Keywords: complex systems, composite materials, analysis, synthesis, decomposition, control

Оценка свойств материалов: модели и декомпозиция

При решении практических и технологических задач возникает необходимость отдельного рассмотрения вопросов, связанных с понятиями «структура» и «свойства» [1, 2]. С точки зрения теории систем структура определяется как совокупность элементов системы и связей между ними. Поэтому управление качеством материала в итоге должно производиться на основе совокупности экспериментально определенных основных свойств. Требуемое число элементов этой совокупности должно устанавливаться исходя из дифференциального порога при выделении классов качества (с обеспечением необходимого уровня соотношения «сигнал/шум»). Естественно, лучше всего использовать независимые частные критерии качества. Частные критерии являются противоречивыми; оценка полноты множества критериев носит субъективный характер. Размерность задачи по оценке качества определяется числом частных критериев; чем оно меньше, тем лучше. При числе критериев меньше трех удовлетворительная оценка качества может быть получена с использованием графических методов (визуализации). Налицо актуальность поиска методов для снижения размерности задач по оценке качества материала с одновременным определением совокупности независимых частных критериев с использованием хемометрического подхода, основанного на применении проекционных математических методов, позволяющих выделять в больших массивах данных латентные переменные и анализировать связи в системе. К сожалению, несмотря на простоту и эффективность такого (часто и визуального) подхода к анализу экспериментальных данных, он практически не используется в строительном материаловедении.

С использованием метода главных компонент PCA (Principal Component Analysis) легко осуществляется ранжирование критериев качества $q_i, i = \overline{1, p}$ по полученным значениям для n экспериментальных образцов. Первая главная компонента определяется как направление наибольшего изменения (разброса вдоль некоторой центральной оси – новой переменной) данных $\mathbf{q} = \|q_{ij}\|, i = \overline{1, p}, j = \overline{1, n}$ в декартовой системе координат $Oq_1q_2\dots q_p$ (приблизительно – чисто геометрически; уточнение – на основе наилучшей линейной аппроксимации всех исходных точек q_{ij} методом наименьших квадратов). Вторая главная компонента принимается (*по определению!*) ортогональной направлению первой (вдоль нее происходит следующее по величине изменение значений q_{ij}), а третья компонента – перпендикулярной как первой, так и второй (лежит в направлении, в котором происходит третье по величине изменение данных). Аналогично определяются последующие главные направления. Полученная система главных компонент дает совокупность ортогональных осей, каждая из которых лежит в направлении максимального изменения данных *в порядке убывания* этих величин. В силу ортогональности главных компонент в полученном новом наборе переменные – *линейные комбинации исходных переменных* – уже не коррелируют друг с другом. Переход от исходной декартовой системы координат к новому набору ортогональных осей позволяет избавиться от зависимости между критериями. Верхний предел числа главных компонент не превышает $\max\{n-1, p\}$. Эффективная размерность пространства главных компонент определяется рангом матрицы $\mathbf{q} = \|q_{ij}\|$. Последняя главная

компонента лежит в направлении, в котором разница между образцами минимальна (фактически различие образцов здесь невозможно, так как все эти отличия есть лишь случайный шум). Главные компоненты с большими номерами рассматриваются как направления, в которых основная составляющая является шумом. Налицо аналогия между методами главных компонент и главных колебаний. Метод PCA позволил осуществить декомпозицию исходной матрицы данных на структурную часть (несколько главных первых компонент, лежащих в направлениях максимальных изменений) и на шум (направления, в которых разница между положением точек мала и ей можно пренебречь). Каждое из свойств (критериев качества) является интегральной характеристикой материала, зависящей от свойств компонентов, состава, условий приготовления, твердения и т.д. Так, оценка качества химически стойких и радиационно-защитных серных композитов производится по совокупности как зависимых, так и противоречивых критериев: химическая стойкость (стойкость в растворах кислот, щелочей и солей), водостойкость и водопоглощение, морозо-, термо-, атмосферо-, теплостойкость, сопротивление удару и истиранию, радиационно-защитные свойства, радиационный разогрев, адгезионные свойства, защитные свойства по отношению к стальной арматуре и др. Для рассматриваемых материалов в качестве приоритетных критериев принимались прочность, плотность и пористость. Область поиска при решении задачи оптимизации определялась методом последовательных уступок. В процессе выделения методом PCA совокупности линейных комбинаций исходных критериев первое главное направление практически совпало с направлением роста прочности. В последующем с использованием полученных результатов на основе многокритериальной оптимизации удалось разработать конкурентоспособные радиационно-защитные и коррозионно-стойкие материалы [2, 3].

Оценка качества эпоксидного композита

Обычно оценка качества материала осуществляется на основании сведений о его свойствах (единичных показателях). Комплексный показатель представляется в виде линейной или квадратичной функции единичных или частных критериев. В случае линейной функции $Y = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i$, $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ поиск весовых коэффициентов α_i продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто условие $|\alpha_i^{(h)} - \alpha_i^{(h-1)}| < \varepsilon$, $i = \overline{1, m}$ (ε – заданная малая величина). По данным табл. 1 определялись весовые коэффициенты для оценки качества эпоксидного композита. На первой итерации «степень доверия» ко всем экспертам принималась одинаковой ($k_j^{(0)} = 1$). На второй итерации весовые коэффициенты определялись с учётом разнородности экспертов и их различной компетентности (коэффициенты $k_j^{(1)}$ отличаются друг от друга). Поэтому на второй итерации весовые коэффициенты определялись в виде

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

Т а б л и ц а 1

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

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

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

Принималось:

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

При указанных условиях

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

с учетом

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

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

По значениям

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

были получены коэффициенты

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

Далее определялись весовые коэффициенты $\alpha_i^{(2)} = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r k_j^{(1)} \alpha_{ij}$:

$$\alpha_1^{(2)} = 0,2; \alpha_2^{(2)} = 0,3; \alpha_3^{(2)} = 0,5.$$

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

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

Как видим, наиболее значимым показателем является прочность.

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

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

Комплексный показатель $Y_i = \sum_{j=1}^m \alpha_i^{(0)} y_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}$ на первом этапе вычисляется по

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

Затем определяются коэффициенты корреляции оценок y_i с оценкой Y :

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

и уточнённое значение весовых коэффициентов $\alpha_i^{(1)} = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^m \rho_i}$, а по ним и уточнённое

значение оценки $Y_j = \sum_{i=1}^m \alpha_i^{(1)} y_{ij}$. Итерационная процедура поиска $\alpha_i^{(\ell)}$ повторяется до

выполнения условия $|\alpha_i^{(\ell)} - \alpha_i^{(\ell-1)}| < \varepsilon$. Предложенная методика позволяет получить аналитическую зависимость обобщенного критерия качества по полиномиальным зависимостям частных критериев в факторном пространстве, полученным с использованием методов планирования эксперимента

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

Достоинством метода является возможность произвольного выбора начальных значений весовых коэффициентов.

Приложения теории оптимального управления

Рассмотрим подход к синтезу материалов как к задаче управления и его приложения к оптимизации свойств и структуры материалов. Он состоит из указанных ниже этапов.

1. Техническая постановка задачи и выбор технического критерия оптимизации.
2. На основе технической постановки задачи строится математическая модель объекта управления в форме системы операторных уравнений (дифференциальных, интегральных, разностных, дифференциально-разностных, дифференциально-интегральных и т.д.). При этом математическая модель и пути ее построения зависят от степени изученности объекта, наличия опыта разработки аналогичных систем, полноты знания физических процессов, характеризующих поведение объекта, а модель строится на основе теоретических исследований по изучению физических процессов в системе, логического анализа, идентификации по данным нормальной эксплуатации и т.д. Далее делается оценка области применения математических моделей. Здесь же выбираются компоненты вектора управления, параметры системы и возмущения. Устанавливаются фазовые координаты, и строится пространство состояния объекта, указываются ограничения на компоненты вектора управления. Так, ограничения на фазовые координаты (например, установление допустимого угла атаки летательного аппарата) могут дать принадлежность вектора состояния некоторому замкнутому множеству точек w -мерного пространства. Они могут определять прочность, жесткость объекта и т.д. Здесь же указываются ограничения на вектор управления (например, энергопотребление). Определяются начальные или краевые условия, осуществляется выбор критерия для оценки качества управления.
3. В предположении *полной* формализации задачи выбирается метод оптимизации. Как правило, предполагается задание математической модели объекта применительно к выбранному методу на его языке. Однако не исключается вариант, когда модель подгоняется под выбранный метод оптимизации. Например, по системе дифференциальных уравнений линейного объекта может быть построен соответствующий функционал качества на основе корней характеристического полинома.
4. Выбор численных методов, реализующих метод оптимизации (методы решения систем дифференциальных уравнений, определения значений функционала качества и т.д.).
5. Разработка и отладка программно-алгоритмического обеспечения (в том числе корректировка численных методов для повышения точности и вычислительной эффективности алгоритма).
6. Анализ полученных результатов оптимизации с возможной корректировкой и упрощением как всей математической задачи, так и отдельных ее элементов. *Результаты решения математической задачи являются исходной информацией для уточне-*

ний формулировки технической задачи, и итерационный процесс может повторяться до достижения заданной точности.

Практически без оговорок указанная последовательность может использоваться при синтезе материалов из условий получения требуемых кинетических процессов формирования физико-механических характеристик материалов (прочность, твердость, параметры тепловыделения, химическая стойкость и т.д.). Основные понятия и определения материаловедения легко интерпретируются в соответствующих терминах, принятых в теории систем управления, часть из которых приводится ниже.

Линейные объекты с непрерывным временем описываются векторно-матричным уравнением состояния

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{Y}(t); \quad (1)$$

$\mathbf{X}(t)$ – вектор фазовых координат (состояние объекта); $\mathbf{Y}(t)$ – вход (управление объектом); $\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(t)$ – непрерывные матрицы, имеющие соответственно размерности $n \times n, m \times n$. Выход объекта $\mathbf{Z}(t) = (z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t))^T$ (T – символ транспонирования) в общем случае определяется в виде уравнения наблюдения

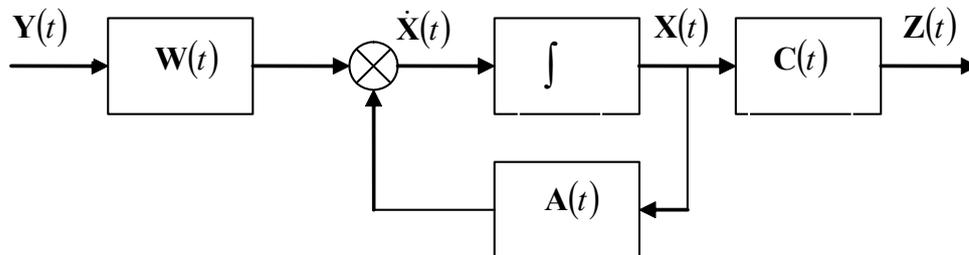
$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t), \quad (2)$$

$\mathbf{C}(t)$ – непрерывная матрица размерности $p \times n$.

В общем случае объект описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = f(t, \mathbf{X}, \mathbf{Y}). \quad (3)$$

После линеаризации получим систему (1) – (2) (структурная схема представлена на рисунке).



В материаловедении управление структурой и свойствами материала осуществляется изменением соответствующих рецептурно-технологических параметров [4]. Из этого с очевидностью следует, что оптимизация структуры и свойств материала (объекта) возможна из условий получения оптимальных параметров кинетических процессов (критерии качества) путем изменения рецептурно-технологических параметров (управляющее воздействие).

Материалы как многоцелевые сложные системы

Важнейшими свойствами многоцелевых систем (в том числе материалов) являются управляемость, наблюдаемость и идентифицируемость. Объект вполне управляем, если для любых его состояний $\mathbf{X}^0 = (x_1(t_0), x_2(t_0), \dots, x_n(t_0))^T$ и $\mathbf{X}^T = (x_1(T), x_2(T), \dots, x_n(T))^T$, значений аргумента t_0 и T существует управление

$\mathbf{Y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T$, переводящее объект из состояния \mathbf{X}^0 в состояние \mathbf{X}^T . Объект *полностью наблюдаем (частично наблюдаем)*, если определены все компоненты вектора $\mathbf{X}(t)$ (определены не все компоненты вектора наблюдения). Задача определения вектора $\mathbf{X}(t_0)$ (или отдельных компонент вектора) по вектору выхода $\mathbf{Z}(t)$, определяемому на промежутке $[t_0 - \theta, t_0]$, θ – фиксированное положительное число, является *задачей наблюдаемости*, а матрицы $\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(t)$ – наблюдаемыми, если задача наблюдаемости разрешима по известному вектору выхода $\mathbf{Z}(t)$. С помощью измерителей физически можно определить лишь вектор выхода, включающий отдельные компоненты вектора состояния или их комбинации. Текущие значения вектора состояния объекта можно восстановить с помощью наблюдающего вычислительного устройства. Для восстановления вектора $\mathbf{X}(t_0)$ используют результаты наблюдений за измеряемыми координатами на промежутке $[t_0, t_n]$. Если *система линейна, объект можно перевести из любого начального состояния \mathbf{X}^0 в любое конечное состояние \mathbf{X}^T с помощью некоторого входного сигнала $\mathbf{Y}(t)$ в течение конечного интервала времени $[0, T]$* . Под управлением (управляющим воздействием) понимается вход системы $\mathbf{Y}(t)$, подлежащий синтезу в результате решения задачи оптимизации; $\mathbf{Y}(t)$ принимает значение из множества допустимых значений управления $\mathbf{Y}^m \subset R^m$ (в общем случае \mathbf{Y}^m может совпадать с R^m или его замкнутым подмножеством).

При переводе объекта из некоторого начального в конечное состояние в простейшем случае левый конец закреплен, правый – свободен (если указан момент T перехода системы в конечное состояние, то получим задачу с фиксированным временем). Примером является материаловедческая задача управления кинетическими процессами (например, набора прочности). Налицо аналогия между допустимыми управлениями и критериями качества в теории управления и материаловедении. Для систем с неизвестным конечным состоянием невозможно построить систему программного управления. Возникает потребность в обратной связи. В задачах материаловедения такая связь либо предусматривается в технологическом оборудовании, либо ее осуществляет непосредственно оператор.

При компенсации случайных возмущений вектор-функция

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{Y}^*(t) + \Delta\mathbf{Y}(t),$$

$\mathbf{Y}^*(t)$ – программное управление, соответствующее оптимальной программе $\mathbf{X}^*(t)$; корректирующее управление $\Delta\mathbf{Y} = \Delta\mathbf{Y}(t, \Delta\mathbf{X})$ зависит от возмущения $\mathbf{n}(t)$.

Определение оптимального в заданном смысле корректирующего управления $\Delta\mathbf{Y}$ является *задачей проектирования оператора обратной связи*.

Получили схему двухэтапной оптимизации, разделяющую процесс управления на два последовательных этапа: построение программы и синтез механизма реализации этой программы. Применимость такой схемы в задачах материаловедения подтверждается управлением различными техническими и технологическими процессами.

Сделаем несколько замечаний о *проектировании многоцелевых сложных систем*, работа которых, как отмечалось, оценивается несколькими показателями качества. Не останавливаясь подробно на проблемах скаляризации и системном подходе к проектированию сложных систем, отметим, что 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.

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.

Примеры синтеза композиционных материалов как многоцелевых систем с позиций теории управления приведены в [5–7].

Эвристические модели

Установление эмпирической зависимости $y = \phi(x)$ сводится к проведению по данным экспериментальным точкам некоторой кривой (не ломаной), которая проходила бы как можно ближе к истинной функциональной зависимости $y = y_u(x)$.

Значению аргумента x_i соответствует истинное значение измеряемой величины $y_u(x_i)$, а в результате измерения вместо $y_u(x_i)$ получим случайную величину y_i . Так как ошибки измерения величины $y_u(x_i)$ распределены по нормальному закону с математическим ожиданием, равным $y_u(x_i)$, и со средним квадратическим отклонением σ_i (характеризует ошибку измерения), то случайная величина будет распределена по нормальному закону:

$$f_i(y_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[y_i - y_u(x_i)]^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (i = \overline{1, n}).$$

Таким образом, в результате ряда измерений произошло следующее событие B : случайные величины (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) приняли совокупность значений (y_1, y_2, \dots, y_n) . Тогда установление эмпирической зависимости $y = \gamma(x)$ сводится к подбору математических ожиданий случайных величин y_i , равных $y_u(x_i)$, чтобы вероятность события B была максимальна (принцип максимального правдоподобия). Оказывается, если точность измерения при всех x_i одинакова и равна σ , то для того чтобы совокупность наблюдаемых значений (y_1, y_2, \dots, y_n) была наивероятнейшей, нужно выбрать

функцию $\varphi(x)$ так, чтобы сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений y_i от $\varphi(x_i)$ была минимальной:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2 = \min.$$

Если $\varphi(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)$ линейна относительно параметров, то справедливо:

$$[\varphi_0, \varphi_0] a_0 + [\varphi_0, \varphi_1] a_1 + \dots + [\varphi_0, \varphi_m] a_m = [y, \varphi_0];$$

$$[\varphi_1, \varphi_0] a_0 + [\varphi_1, \varphi_1] a_1 + \dots + [\varphi_1, \varphi_m] a_m = [y, \varphi_1]$$

...

$$[\varphi_m, \varphi_0] a_0 + [\varphi_m, \varphi_1] a_1 + \dots + [\varphi_m, \varphi_m] a_m = [y, \varphi_m].$$

$$[y, \varphi_k] = \sum_{i=1}^n y_i \varphi_k(x_i); [\varphi_o, \varphi_k] = \sum_{i=1}^n \varphi_o(x_i) \varphi_k(x_i); \dots; [\varphi_m, \varphi_k] = \sum_{i=1}^n \varphi_m(x_i) \varphi_k(x_i).$$

В частном случае при сглаживании полиномом $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$ коэффициенты $x_i, a_0, a_1, \dots, a_m$ определяются из системы уравнений:

$$a_0 n + a_1 \sum_i x_i + a_2 \sum_i x_i^2 + \dots + a_m \sum_i x_i^m = \sum_i y_i;$$

$$a_0 \sum_i x_i + a_1 \sum_i x_i^2 + a_2 \sum_i x_i^3 + \dots + a_m \sum_i x_i^{m+1} = \sum_i x_i y_i;$$

...

$$a_0 \sum_i x_i^m + a_1 \sum_i x_i^{m+1} + a_2 \sum_i x_i^{m+2} + \dots + a_m \sum_i x_i^{2m} = \sum_i x_i^m y_i.$$

Рассмотренный подход использовался для установления связи между коэффициентами пластичности $k_{пл}$ и структуры $k_{стр}$ эпоксидных композитов по табл. 2. Из расположения экспериментальных точек на плоскости при определении аналитической зависимости ограничились линейной зависимостью

$$k_{стр} = a_0 + a_1 k_{пл}, \quad (x = k_{пл}, y = k_{стр}).$$

Т а б л и ц а 2

$k_{пл}$	0,08	0,43	0,47	0,51	0,52	0,6	0,7	0,9	0,93	1,4
$k_{стр}$	16,1	13,2	14,8	14,2	13,8	14,2	7,8	14,5	15	5,4

Искомая зависимость определилась в виде $y = -6,5088x + 17,157$; возможность ограничиться линейной корреляционной связью между $k_{стр}$ и $k_{пл}$ следует из $r_{xy} = -0,68$. Так же определялась зависимость влияния содержания водорода H [вес. ч.] в бетоне на толщину [см] защиты при расчёте, исходя из допустимой дозы излучений синхротрона X_d , допустимого потока $X_{п}$ при кратности ослабления 10^7 раз и плотности бетона 2350 кг/м^3 (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

H , вес. ч.	0,1	0,35	0,61	0,81	1,09
X_d , см	1005	991	983	980	975
$X_{п}$, см	1133	1095	1077	1069	1060

Здесь линейная интерпретация дает большую погрешность. Поэтому были определены параметры квадратичной зависимости X_d от H . В соответствии с предыдущим была получена аналитическая зависимость в виде

$$X_d = 28,308H^2 - 61,879H + 1010,3.$$

Для получения аналитических зависимостей часто используются и методы математического планирования эксперимента (полно- и дробно-факторные планы эксперимента, позволяющие получить интерполяционные полиномы во всем рассматриваемом факторном пространстве или его локальной области при существенном сокращении числа опытов в эксперименте).

Регрессионные методы идентификации

Рассмотрим линейную статическую систему, имеющую m входов X_1, \dots, X_m и один выход Z :

$$Z = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_mX_m.$$

Используя серию измерений величин Z, X_j в r моментов времени, можно определить параметры a_i . По r совокупностям измерений вычисляются \bar{Z} и \bar{X}_j , где \bar{Z}, \bar{X}_j – средние значения Z, X_j для указанных серий измерений. Введя $z = Z - \bar{Z}$, $x = X - \bar{X}$, получим:

$$z = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m, \quad \mathbf{z} = \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{a};$$

\mathbf{x}, \mathbf{a} – вектор-столбцы с элементами x_j, a_j соответственно. Количество r последовательных измерений удовлетворяют соотношениям

$$\mathbf{z}^{(1)} = \mathbf{x}^{(1)T} \mathbf{a},$$

$$\vdots$$

$$\mathbf{z}^{(\mu)} = \mathbf{x}^{(\mu)T} \mathbf{a},$$

$$\vdots$$

$$\mathbf{z}^{(r)} = \mathbf{x}^{(r)T} \mathbf{a},$$

μ обозначает момент измерений $z, x^T (\mu = \overline{1, r})$. Введя

$$\boldsymbol{\chi} = [z^{(1)} \dots z^{(\mu)} \dots z^{(r)}]^T;$$

$$\mathbf{U} \stackrel{\Delta}{=} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{(1)T} \\ \vdots \\ \mathbf{x}^{(\mu)T} \\ \vdots \\ \mathbf{x}^{(r)T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_j^{(1)} & \dots & x_m^{(1)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_1^{(\mu)} & \dots & x_j^{(\mu)} & \dots & x_m^{(\mu)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_1^{(r)} & \dots & x_j^{(r)} & \dots & x_m^{(r)} \end{bmatrix},$$

получим

$$\boldsymbol{\chi} = \mathbf{U}\mathbf{a}; \quad \hat{\boldsymbol{\chi}} = \mathbf{U}\hat{\mathbf{a}}.$$

Наилучшая (в смысле наименьших квадратов) оценка $\hat{\mathbf{a}}$ вектора \mathbf{a} удовлетворяет уравнению

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} \hat{\mathbf{a}} = \mathbf{U}^T \boldsymbol{\chi},$$

так что

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{U}^T \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T \boldsymbol{\chi} = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m]^T,$$

что и позволяет построить процедуру идентификации вектора \mathbf{a} на основе линейной регрессии и метода наименьших квадратов. Матрица $(\mathbf{U}^T \mathbf{U})^{-1}$ существует только тогда, когда матрица \mathbf{U} не является особенной. Число измерений r должно быть больше числа идентифицируемых параметров ($r \geq m$). Если $r = m$, то в оценке $\boldsymbol{\chi}$ шум измерений не будет сглажен. Поэтому для адекватной идентификации требуется по крайней мере $m+1$ измерений, причём в течение этого периода система предполагается стационарной.

Указанный подход использовался для определения зависимости предела прочности при сжатии $R_{\text{сж}}$ от твёрдости T и модуля деформации E эпоксидных композитов по данным эксперимента (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Z	117	100	120	57	99	102	79	64	74	87
X ₁	6,01	5,05	6,15	2,94	5,06	5,23	4,05	3,40	3,79	4,44
X ₂	3,62·10 ⁴	4,71·10 ⁴	3,51·10 ⁴	1,06·10 ⁴	4,71·10 ⁴	4,48·10 ⁴	6,57·10 ⁴	8,52·10 ⁴	7,25·10 ⁴	5,71·10 ⁴

Принято: $X_1 = T, X_2 = E, Z = R_{\text{сж}}$

Имеем: $\bar{X}_1 = 4,61; \bar{X}_2 = 5,01 \cdot 10^4; \bar{Z} = 89,9.$

Для центрированных значений переменных данные эксперимента приводятся в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Z	27,1	10,1	30,1	-32,9	9,1	12,1	-10,9	-25,9	-15,9	-2,9
X ₁	1,40	0,44	1,54	-1,67	0,45	0,62	-0,56	-1,21	-0,82	-0,17
X ₂	-1,39·10 ⁴	-0,3·10 ⁴	-1,5·10 ⁴	-3,95·10 ⁴	-0,3·10 ⁴	-0,53·10 ⁴	1,56·10 ⁴	3,51·10 ⁴	2,24·10 ⁴	0,7·10 ⁴

В соответствии с предыдущим значение $z^{(\mu)}$ при μ -измерении

$$z^{(\mu)} \approx a_1 x_1^{(\mu)} + a_2 x_2^{(\mu)},$$

и для параметров линейной модели будем иметь

$$\hat{\mathbf{a}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2) = (19,1; -1,26 \cdot 10^{-5}).$$

Окончательно получим

$$R_{\text{сж}} = 2,48 + 19,1 T - 1,26 \cdot 10^{-5} E.$$

Как видим, относительная ошибка вычисления по модели $R_{\text{сж}}$ не превышает 1 %; таблица измерений обладает избыточностью. При этом $R_{\text{сж}}$ и T практически от E не зависят.

Метод легко обобщается на случай систем со многими входами и выходами, а также на случай идентификации динамических процессов, описываемых нормальной системой обыкновенных дифференциальных уравнений [8].

Корреляционные методы

Часто бывает необходимо установить связь показателей качества между собой или взаимную связь производственных или иных факторов. Все эти и подобные им вопросы могут быть исследованы с помощью приёмов теории корреляции. Стоха-

стическая (корреляционная) зависимость проявляется в том, что при изменении одной из величин X изменяется условное математическое ожидание другой величины Y :

$$M[Y | X = x] = \sum_{j=1}^n y_j P(Y = y_j | X = x) = \sum_{j=1}^n y_j P(y_j | x).$$

Например, при $X = x_1$ условное математическое ожидание величины Y равно $M[Y | x_1] = M[Y | X = x_1]$. Если x будет изменяться, то, вообще говоря, будет изменяться и условное математическое ожидание $M[Y | x]$. Таким образом, условное математическое ожидание величины Y можно рассматривать как функцию от x ($M[Y | x] = \bar{y}(x)$). Функция $\bar{y}(x)$ называется регрессией Y по X ; уравнение $y = \bar{y}(x)$ – уравнением регрессии Y по X ; линия, определяемая этим уравнением в плоскости XOY , называется линией регрессии Y по X (для дискретных величин “линия” будет состоять из изолированных точек плоскости). Аналогично определяются регрессия $M[X | y] = \bar{x}(y)$, уравнение регрессии и линия регрессии величины X по Y . Наиболее простым случаем является тот, когда обе функции регрессии

$$M[Y | x] = \bar{y}(x), \quad M[X | y] = \bar{x}(y)$$

являются линейными и обе линии регрессии будут прямыми линиями.

Уравнения прямых регрессии, получаемые по эмпирическим данным, имеют вид

$$y - \bar{y}_0 = r^* \frac{S_y}{S_x} (x - \bar{x}_0); \quad x - \bar{x}_0 = r^* \frac{S_x}{S_y} (y - \bar{y}_0); \quad \bar{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i;$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_0)^2, \quad S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_0)^2;$$

$$r^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_0)(y_i - \bar{y}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_0)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_0)^2}}.$$

Коэффициент корреляции по абсолютной величине не превышает 1 ($|r_{xy}| \leq 1$), причём чем ближе r_{xy} к 1, тем больше корреляционная зависимость между X и Y приближается к линейной, а при $|r_{xy}| = 1$; случайные величины связаны линейной функциональной зависимостью. Если $r_{xy} = 0$, то X и Y не связаны линейной корреляционной зависимостью, но могут быть связаны нелинейной корреляционной или даже функциональной зависимостью.

Так, определялась зависимость коэффициента теплопроводности λ , Вт / (м² · °С) жаростойкого бетона с заполнителем из магнезита от средней температуры нагрева t °С по данным эксперимента (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

t °С	100	300	600	700	900	1100
λ	5,90	5,35	4,78	4,20	3,60	3,00
m	2	3	3	4	4	2

Оценки математических ожиданий x и y :

$$\bar{x}_0 = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} x_i = \frac{1}{18} 11500 = 638,9; \quad \bar{y}_0 = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} y_i = \frac{1}{18} 79,39 = 4,41.$$

Оценки дисперсий D_x и D_y :

$$\tilde{D}_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 = \frac{1}{17} \cdot 1642774 = 96633,7; \quad \tilde{D}_y = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n y_i^2 = \frac{1}{17} \cdot 14,5986 = 0,8574.$$

Оценки среднеквадратических отклонений:

$$\tilde{\sigma}_x = S_x = \sqrt{\tilde{D}_x} = 311, \quad \tilde{\sigma}_y = S_y = \sqrt{\tilde{D}_y} = 0,93.$$

Оценка корреляционного момента:

$$\tilde{K}_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i y_i = \frac{1}{17} (-4803) = -282,5.$$

Наконец, оценка коэффициента корреляции:

$$\tilde{r}_{xy} = r^* = \frac{K_{xy}}{\tilde{\sigma}_x \tilde{\sigma}_y} = \frac{-282,5}{311 \cdot 0,93} = -0,977$$

(корреляционная зависимость между X и Y близка к линейной).

Эмпирические прямые регрессии $y - \bar{y}_0 = \bar{r}_{xy} \frac{\tilde{\sigma}_y}{\tilde{\sigma}_x} (x - \bar{x}_0)$; $x - \bar{x}_0 = \bar{r}_{xy} \frac{\tilde{\sigma}_x}{\tilde{\sigma}_y} (y - \bar{y}_0)$:

$$y = -0,0028x + 6,2; \quad x = -326,7y + 2080.$$

Для качественного анализа при исследовании зависимостей могут использоваться и более простые методы, в частности, методы ранговой корреляции [2].

Выводы

Рассмотрены некоторые математические основы системного анализа в приложении к строительному материаловедению: экспериментальное, эвристическое и строгое математическое начала, необходимые для описания композиционных материалов как сложных систем. Приведены реализации системного подхода к оценке свойств материалов, разработке моделей и декомпозиции системы. Материалы рассматриваются как многоцелевые сложные системы. Даны приложения теории оптимального управления, регрессионных методов идентификации, а также корреляционных методов.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Архитектура и строительство России. – 2020. – № 3. – С. 14.
2. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М., 2012. – 432 с. (сер. Библиотека научных разработок и проектов МГСУ).
3. Королев, Е.В. Композиционные материалы как полидисперсные системы. Эффективные модели / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3 (48). – С. 16–25.
4. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
5. Будылина, Е.А. Моделирование с позиций управления в технических системах / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2. – С. 138.
6. 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.
7. Низина, Т.А. Количественный анализ кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов при растяжении / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Н.С. Канаева // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2 (88). – С. 77–89.

8. Данилов, А.М. Полиномиальные модели при синтезе композитов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 2 (31). – С. 37–44.

References

1. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Architecture and construction of Russia. – 2020. – №3. – P. 14.
2. Bazhenov, Yu.M. System analysis in building materials science / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M., 2012. – 432 p. (ser. Library of scientific developments and projects of MGSU).
3. Korolev, E.V. Composite materials as polydisperse systems. Effective models / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 3 (48). – P.16–25.
4. Garkina, I. Principles of optimal control in the synthesis of composite materials / I. Garkina, A. Danilov, V. Selyaev // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 723. – P. 32–36.
5. Budylnina, E.A. Modeling from the standpoint of management in technical systems / E.A. Budylnina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №2. – P. 138.
6. 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.
7. Nizina, T.A. Quantitative analysis of the kinetics of damage accumulation in the structure of polymeric materials under tension / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, Kanaeva N.S. // Construction and reconstruction. – 2020. – №2 (88). – P. 77–89.
8. Danilov, A.M. Polynomial models in the synthesis of composites / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2017. – №2 (31). – P. 37–44.

УДК 691.31

DOI 10.54734/20722958_2023_1_85

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Романенко Игорь Иванович,
кандидат технических наук заведующий
кафедрой «Механизация и автоматизация
производства»

E-mail: miap@pguas.ru

Фадин Алексей Ильич,
аспирант

E-mail: miap@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

Romanenko Igor Ivanovich,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Mechanization and Automation
of Production»

E-mail: miap@pguas.ru

Fadin Aleksey Ilyich,
Postgraduate

E-mail: miap@pguas.ru

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА

И.И. Романенко, А.И. Фадин

Рассматривается получение прочного шлакового камня из сталеплавильных шлаков за счет активации твердения углекислым газом с целью получения прочных стеновых камней и тротуарной плитки. Проводится активация сталеплавильного шлака в течение 24 часов в среде углекислого газа при повышенном давлении, что позволяет получить прочность камня на сжатие в пределах 20,0-33,0 МПа. Расход активатора твердения шлака составляет 6-8 % в пересчете на массу сталеплавильного шлака. Установлен электронно-микроскопическими исследованиями и рентгеноструктурным анализом фазово-минералогический состав новообразований. За счет образования гидратов силиката кальция и карбонатов кальция формируется высокая ранняя прочность камня. Широкое применение в производстве строительных материалов сталеплавильного шлака и выбрасываемого в атмосферу углекислого газа позволит решить экологические проблемы промышленных металлургических агломераций и выпускать дополнительные строительные материалы без использования портландцемента. Разработаны рекомендации по технологическому регламенту активации сталеплавильного шлака при производстве строительных материалов.

Ключевые слова: строительный материал, сталеплавильный шлак, углекислый газ, активация, карбонизация, рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, ранняя прочность

BUILDING MATERIALS BASED ON ACTIVATED STEEL-MAKING SLAG

I.I. Romanenko, A.I. Fadin

The article considers obtaining a durable slag stone from steel-making slags by activating hardening with carbon dioxide in order to obtain durable wall stones and paving slabs. Activation of steel-making slag is carried out for 24 hours in an environment of carbon dioxide at increased pressure, which makes possible to obtain compressive strength of the stone in the range of 20.0-33.0 MPa. The consumption of the slag hardening activator is 6-8 % in terms of the mass of steelmaking slag. The phase-mineralogical composition of neoplasms was established by electron-microscopic studies and X-ray diffraction analysis. Due to the formation of calcium silicate hydrates and calcium carbonates, a high early strength of the stone is formed. The widespread use of steel-making slag and carbon dioxide emitted into the atmosphere in the production of building materials will solve the environmental problems of industrial metallurgical agglomerations and produce additional building materials without the use of Portland cement. Recommendations have been

developed on the technological regulations for activation of steel-smelting slag in the production of building materials.

Keywords: building material, steelmaking slag, carbon dioxide, activation, carbonization, X-ray diffraction analysis, electron microscopy, early strength

Производство стали сопровождается получением шлака и выбросом в атмосферу углекислого газа. Так, при получении 1 т стали образуется 95-110 кг шлака и 1,80 т CO₂ [1–3]. Сталеплавильный шлак в результате медленного охлаждения образует кристаллическую структуру, которая практически не проявляет вяжущих свойств в отличие от доменного шлака, который охлаждается быстро и из-за этого у него формируется аморфное строение, что обеспечивает проявление цементирующей способности [4–6].

В строительной индустрии используются доменные шлаки, особенно при производстве вяжущих веществ [1, 3, 5]. Сталеплавильные шлаки не получили широкого распространения в производстве строительных материалов. Главные сдерживающие факторы: наличие свободных оксидов кальция и магния, вызывающих неравномерность изменения объема в процессах гидратации, малая прочность шлакового вяжущего без химических активаторов, необходимость повышения удельной поверхности, непостоянство химического и минералогического составов [7–9].

Сталеплавильные шлаки в основном применяли в Европе в качестве балластного слоя для укрепления грунта дорожного полотна в дорожном строительстве, заполнителя георешеток для фиксации откосов при строительстве линейных сооружений [1, 2, 10].

Были попытки активировать сталеплавильные шлаки цементом, известью, щелочью, механическим измельчением в шаровой мельнице [4]. Наилучшие результаты получены исследователями при обработке шлака углекислым газом. В результате активации образовывался CaCO₃. Однако камни не имели достаточной прочности, и постоянно процесс твердения сопровождался образованием трещин [5–6]. Сталеплавильный шлак после измельчения до удельной поверхности $S_{уд} = 3100-4000 \text{ см}^2/\text{г}$ модифицировали в барокамере с углекислым газом при повышенном давлении. Шлак проявлял скрытую гидравлическую активность, что позволяло получить камень с прочностью 3,6–11,3 МПа и множеством сетчатых трещин [6, 7]. Поэтому основные работы были направлены на модифицирование цементного камня молотым сталеплавильным шлаком при соотношении Ц : Ш = 1 : 3; 1 : 4 ; 1 : 6. Максимальная прочность составляла 13,6 МПа, однако по истечении 30–60 суток твердения при переменном увлажнении и высушивании образцы разрушались за счет образования трещин [3, 6].

Целью проведенных исследований являлось получение строительных материалов на основе сталеплавильного шлака, активированного углекислым газом, подтверждение образования ранней высокой прочности за счет формирования гидратов силиката кальция и карбонатов кальция.

Сталеплавильный шлак является побочным продуктом энергоемкого промышленного процесса при выплавке стали. Половина шлака состоит из CaO и SiO₂. Химический состав шлака, определенный рентгенофлуоресцентной спектрометрией, представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Химический и фазовый состав сталеплавильного шлака

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	CaO	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	R ₂ O	Zn	C
7,58	3,48	13,79	0,3	49,88	1,98	9,75	10,2	0,25	0,17	0,011	1,15
Фазы, %											
C ₂ S	C ₃ S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30,85	10,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Воздействие углекислого газа при активации твердения матрицы из сталеплавильного шлака на минералогию и микроструктуру исследовали с помощью рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии. С применением

энергодисперсионного анализатора Oxford instruments INCA x-act 51-ADD0007 в составе электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH (напыление углеродом) был исследован химический состав исходного шлака.

Контрольные образцы-цилиндры, бортовые камни и стеновые блоки были изготовлены с использованием увлажнения, температуры, давления и временного интервала воздействия углекислого газа на образцы в камере карбонизации.

Фазы силиката кальция оценивали полуколичественным рентгеноструктурным анализом с использованием 10 % TiO_2 в качестве внутреннего стандарта. Перед исследованием шлак предварительно измельчали в порошок в шаровой мельнице с керамическими шарами. Время измельчения шлака – 10 часов. Исходное сырье – сталеплавильный шлак фракции 0-3,5 мм. После измельчения шлака в шаровой мельнице удельная поверхность порошка составляла $3650 \text{ см}^2/\text{г}$.

Методика изготовления образцов. Образцы-цилиндры диаметром 60 мм и высотой 60 мм формовались на прессе с заданной величиной усилия и впоследствии использовались для оценки влияния уплотняющей нагрузки, влажности, времени карбонизации, прочности на сжатие.

Твердение образцов производилось на установке избыточного давления по следующей схеме: создание вакуума до 0,06 МПа – 15 мин; подача в камеру CO_2 со скоростью 0,1 МПа/мин до заданного значения (0,3; 0,6, 0,9 и 1,2 МПа); выдержка образцов – 24 часа; сброс давления со скоростью 0,1 МПа/мин.

Технологические параметры 4 партий сталеплавильного шлака по программе испытаний (время карбонизации, влажность, давление) приведены в табл. 2. После карбонизации образцы подвергались испытанию на разрушение при сжатии. Полученные результаты представлены в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Предел прочности образцов из активированного сталеплавильного шлака
в зависимости от давления углекислого газа в автоклаве

№п/п	Индекс образца	Давление CO_2 , МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя прочность на сжатие, МПа
1	1.1	0,3	16	12,73
2	1.2		15,5	
3	1.3		16,7	
4	2.1	0,6	21,2	21,93
5	2.2		20,7	
6	2.3		23,9	
7	3.1	0,9	31,9	29,80
8	3.2		29,3	
9	3.3		28,2	
10	4.1	1,2	30,2	32,56
11	4.2		33,9	
12	4.3		33,6	

Методика определения зависимости предела прочности при сжатии образцов от продолжительности (времени) процесса карбонизации

Формовка образцов-цилиндров идентична формовке образцов, представленных в табл.2. Твердение образцов производилось на установке избыточного давления по следующей схеме: создание вакуума до 0,06 МПа – 15 мин; подача CO_2 со скоростью 0,1 МПа/мин до заданного значения 1,2 МПа; время карбонизации образцов – 2, 5, 10, 24 и 48 часов; сброс давления со скоростью 0,1 МПа/мин.

После карбонизации образцы подвергались испытанию на разрушение при сжатии, результаты испытаний представлены в табл.3.

Предел прочности образцов из активированного сталеплавильного шлака
в зависимости от времени карбонизации в автоклаве

№ п/п	Индекс образца	Время карбонизации, ч	Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя прочность на сжатие, МПа
13	5.1	2	7,2	7,53
14	5.2		8,8	
15	5.3		6,6	
16	6.1	5	15,7	15,97
17	6.2		18,9	
18	6.3		13,3	
19	7.1	10	25,6	25,83
20	7.2		23,7	
21	7.3		28,2	
22	8.1	24	30,2	32,57
23	8.2		33,9	
24	8.3		33,6	
25	9.1	48	29,8	33,30
26	9.2		35,7	
27	9.3		34,4	

Анализируя полученные результаты (см. табл.2 и 3), можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальное давление газовой смеси в автоклаве при карбонизации образцов 0,9-1,2 МПа. Максимальная прочность на сжатие (32,57 МПа) у образцов, выдержанных в автоклаве при давлении углекислого газа 1,2 МПа, что в 2 раза больше, чем у аналогичных образцов (12,73 МПа), карбонизированных при давлении в автоклаве 0,3 МПа.

2. Оптимальная продолжительность карбонизации 24 часа. Увеличение продолжительности карбонизации до 48 часов не дает существенного прироста прочности.

3. Карбонизация протяженностью в 24 часа способствует объемной карбонизации, что наблюдается при расколе образца вдоль и обработке поверхности раскола раствором фенолфталеина.

4. Получение прочных образцов-цилиндров диаметром 60 мм позволяет перейти к дальнейшему масштабированию и производству стенового блока и тротуарной плитки по методике ускоренной карбонизации.

Оптимальный состав образцов по прочностным показателям из сталеплавильного шлака (см. табл. 3) был использован в электронно-микроскопических исследованиях и рентгеноструктурном анализе с целью выявления фазово-минералогического состава новообразований.

Предоставленные для анализа образцы: 1) молотый сталеплавильный шлак (СШ), 2) образец измельченного в порошок изделия из СШ после карбонизации. Анализ образцов был выполнен с использованием следующего оборудования:

- фазово-минералогический состав образцов 1 и 2: рентгеновский дифрактометр Rigaku SmartLab 3, $Cu_{K\alpha}$, 40 кВ, скорость съемки 0,5 °2 θ /мин;
- электронно-микроскопические снимки поверхности фрагментов из образца 2: электронный микроскоп TESCAN VEGA 3 SBH (напыление углеродом).

Образцы 1 и 2 исследованы без предварительной подготовки. Из внутренней и периферийной частей образца 2 путем раскалывания были изъяты фрагменты размерами порядка 5×5×5 мм, которые затем были высушены при 110 °С до постоянной массы. Качественный фазово-минералогический состав образцов приведен на рис. 1.

Согласно результатам рентгенодифракционного анализа (рис. 1), в составе исходного шлака (образец 1) присутствуют силикаты кальция-магния, двухкальциевый

феррит, периклаз. Присутствует свободный CaO, но значительная его часть уже успела прогидратироваться и частично карбонизироваться (рефлексы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CaCO_3).

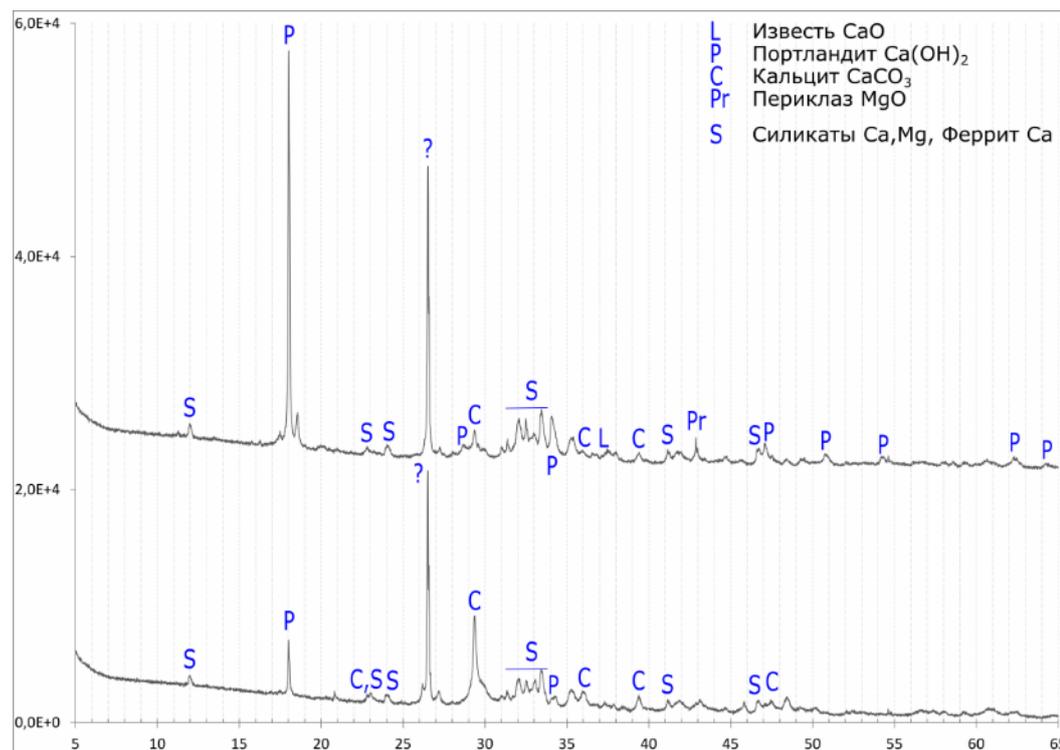


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов 1 (верхн.) и 2 (нижн.)

В дифрактограмме образца 2 интенсивность рефлекса $\text{Ca}(\text{OH})_2$ существенно снижается одновременно с увеличением интенсивности CaCO_3 . Рефлексы свободного CaO и периклаза пропадают полностью. Это свидетельствует о карбонизации шлака в процессе технологической обработки изделия.

Интенсивный рефлекс в области $26.5^\circ 2\theta$, присутствующий в дифрактограммах образцов 1 и 2, не удалось отнести к чему-либо, учитывая, что материал представляет собой чистый шлак. Присутствие C-S-H незаметно и наблюдается только как широкий сигнал выше базовой линии в карбонизированном шлаке. Назначенный пик к CaCO_3 может также включать магнезиальный кальцит (или магнезит MgCO_3), полученный реакцией гидратированного MgO с CO_2 . Относительное содержание MgO, по-видимому, уменьшилось при карбонизации шлака. Относительное содержание карбоната кальция было явно намного больше в карбонизированном шлаке, чем в гидратированном. Большая часть карбонизированного шлака образовалась в результате реакции карбонизации гидроксида кальция. Гидроксид кальция обнаружен в момент образования гидратированного шлака, но его уровень был ниже предела обнаружения в карбонизированном шлаке.

Пока ясно одно: рефлекс принадлежит инертной фазе. В опубликованных исследованиях аналогичный рефлекс иногда приписывают кварцу [11], однако в дифрактограмме отсутствуют другие, относимые к нему рефлексы.

Электронно-микроскопические исследования проводились с использованием TESCAN VEGA. TESCAN VEGA – сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) четвертого поколения с термоэмиссионным вольфрамовым катодом, позволяющий получать СЭМ-изображения и проводить анализ элементного состава в реальном времени в одном окне программного обеспечения TESCAN Essence™, что значительно упрощает получение данных о морфологии поверхности исследуемого образца.

Электронно-микроскопические изображения поверхности фрагментов изделия после карбонизации, изъятых из его внутренней и периферийной частей путем раскалывания образца, приедены на рис. 2.

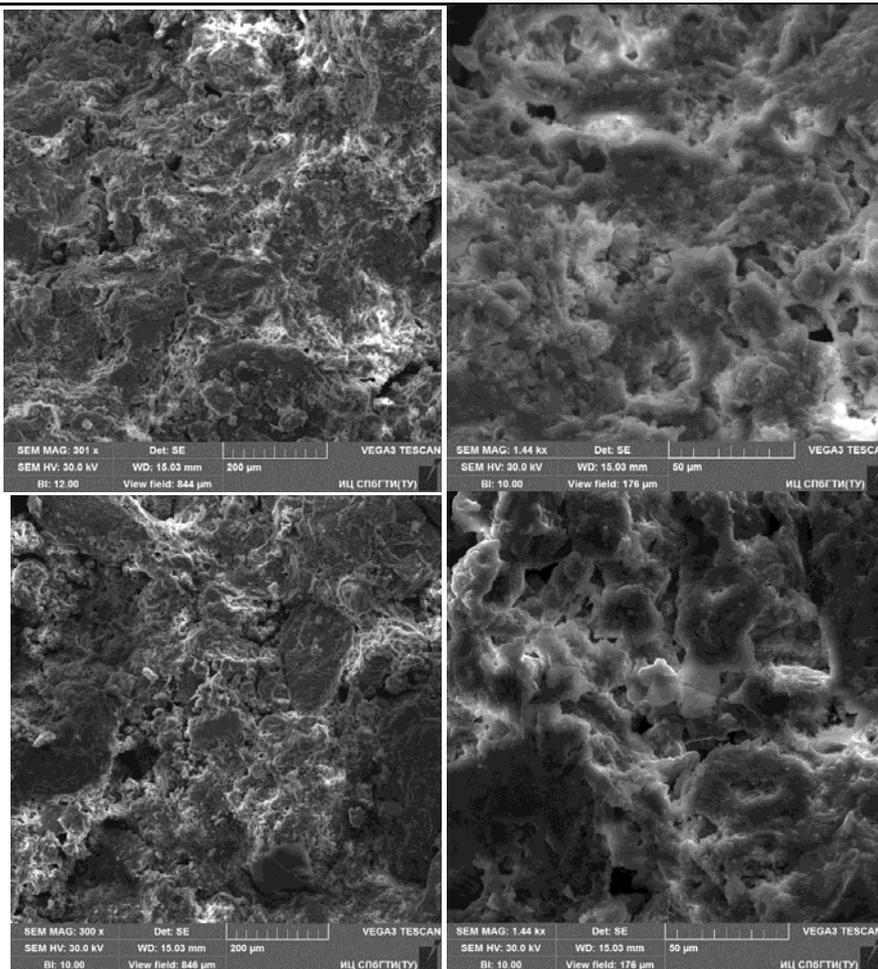


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки поверхностей внутреннего (*верхний ряд*) и периферийного (*нижний ряд*) фрагментов изделия после карбонизации. Увеличение $\times 300$ (*левая колонка*) и $\times 1400$ (*правая колонка*)

Из анализа данных, представленных на рис. 2, видно, что в результате карбонизации и термовлажностной обработки формируется однородный, хорошо сцементированный материал, состоящий из зерен шлака и продуктов его гидратации и карбонизации. При увеличении в 300 раз (см. рис.2) гидратированный шлак более пористый и грубый, чем карбонизированный шлак. Кристаллов карбоната кальция не обнаружено в карбонизированном шлаке при таком увеличении, но были хорошо видны как сложенные друг на друга наноразмерные ромбоэдрические кристаллы при большем увеличении ($1400\times$).

Более высокая прочность на сжатие карбонизированного шлака, вероятно, образуется за счет большего образования продуктов гидратации, карбонизации и осаждения наночастиц карбоната кальция на зернах шлака, что увеличивает плотность упаковки и уменьшает пористость карбонатной матрицы.

Выводы

1. Использование шлака и углекислого газа в качестве цементирующего материала при производстве дорожной плитки и стеновых камней позволит отказаться от портландцемента, что уменьшит выбросы в атмосферу CO_2 , связанного с производством портландцемента.

2. Активация углекислым газом нейтрализует свободную известь в стальном шлаке, превращая ее в карбонат кальция, что позволяет получать строительные материалы со стабильными физико-механическими свойствами.

3. Создание паровоздушной смеси с CO_2 значительно ускорит реакцию карбонизации шлака. Механизм каталитического эффекта взаимодействия сталеплавильного

шлака, воды и углекислого газа, возможно, определяется образованием промежуточного геля гидрата кальция на поверхности твердых частиц, который включает в себя активное взаимодействие трех фаз (вода – шлак – CO_2), при этом проявляется более высокая скорость реакции карбонизации по сравнению с процессом (шлак – CO_2).

4. Время карбонизации шлака может быть сокращено с 48 до 24 часов. Поскольку активация шлака методом карбонизации не требует начального измельчения компонентов шлака и гидратации, производственный цикл намного короче, чем у обычного отверждения цементного камня. Вместо чистого CO_2 целесообразно использовать двуокись углерода дымовых газов напрямую без разделения.

Список литературы

1. Chang, J. Influence of magnesium hydroxide content and fineness on the carbonation of calcium hydroxide / J. Chang, Y. Li, M. Cao, Y. Fang // *Constr. Build. Mater.* – 2014. – №55. – P. 82–88.
2. Любомирский, Н.В. Влияние гидрокарбоната кальция на структурообразование и свойства материалов на основе извести карбонатного твердения / Н.В. Любомирский, А.С. Бахтин, Т.А. Бахтина, Е.Ю. Николаенко, В.В. Николаенко // *Международный научно-исследовательский журнал.* – Екатеринбург, 2016. – Вып.11(53), часть 4. – С. 86–93.
3. Mahmoud, A. Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates / A. Mahmoud, B. Ali // *Constr. Build. Mater.* – 2012. – №26. – P. 475–480.
4. Бахтина, Т.А. Разработка материала на основе известково-карбонатно-кальциевых композиций для аддитивных технологий / Т.А. Бахтина, Н.В. Любомирский, А.С. Бахтин, Е.Ю. Николаенко // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* – Белгород, 2019. – Вып. 4. – С. 86–93.
5. Romanenko, I. Optimization of compositions and hardening conditions of vibropress concretes based on steel-making slag / I. Romanenko, A. Fadin // *Materials Science Forum.* – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 715–720.
6. Любомирский, Н.В. Влияние давления углекислого газа на кинетику принудительной карбонизации известкового камня полусухого прессования и формирование его прочности / Н.В. Любомирский, С.И. Федоркин // *Строительство и техногенная безопасность.* – Симферополь, 2016. – №3 (55). – С. 86–93.
7. Рузавин, А.А. Утилизация сталеплавильных шлаков путем ускоренной карбонизации / А.А. Рузавин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура».* – Челябинск. – 2018. – Т. 18, №3. – С. 68–72.
8. Romanenko, I. Steelmaking slag-a complex material for the production of small-size materials using hyper-press technology / I. Romanenko, A. Fadin // *Materials Science Forum.* – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P.737–742.
9. Романенко, И.И. Влияние модификаторов структуры шлакощелочного вяжущего на трещинообразование / И.И. Романенко, А.И. Фадин, И.Н. Петровнина, М.И. Романенко // *Инженерный вестник Дона.* – 2021. – № 7 (79). – С. 347–365.
10. Roslan, N.H. Performance of steel slag and steel sludge in concrete / N.H. Roslan, M. Ismail, Z. Abdul-Majid, S. Ghoreishiamiri, B. Muhammad // *Constr. Build. Mater.* – 2016. – №104. – P. 16–24.
11. Mo, L. Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO_2 curing / L. Mo, F. Zhang, M. Deng // *Cem. Concr. Res.* – 2016. – №88. – P. 217–226.

References

1. Chang, J. Influence of magnesium hydroxide content and fineness on the carbonation of calcium hydroxide / J. Chang, Y. Li, M. Cao, Y. Fang // *Constr. Build. Mater.* – 2014. – №55. – P. 82–88.
2. Lyubomirsky, N.V. The influence of calcium bicarbonate on the structure formation and properties of materials based on carbonate hardening lime / N.V. Lyubomirsky, A.S. Bakhtin, T.A. Bakhtina, E.Y. Nikolaenko, V.V. Nikolaenko // *International Research Journal.* – Yekaterinburg, 2016. – Issue 11(53), part 4. – P. 86–93.
3. Mahmoud, A. Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates / A. Mahmoud, B. Ali // *Constr. Build. Mater.* – 2012. – №26. – P. 475–480.
4. Bakhtina, T.A. Development of a material based on lime-carbonate-calcium compositions for additive technologies / T.A. Bakhtina, N.V. Lyubomirsky, A.S. Bakhtin, E.Y. Nikolaenko // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* – Belgorod, 2019. – Issue 4. – P. 86–93.
5. Romanenko, I. Optimization of compositions and hardening conditions of vibropress concretes based on steel-making slag / I. Romanenko, A. Fadin // *Materials Science Forum.* – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 715–720.
6. Lyubomirsky, N.V. Influence of carbon dioxide pressure on the kinetics of forced carbonization of lime stone of semi-dry pressing and the formation of its strength / N.V. Lyubomirsky, S.I. Fedorkin // *Construction and technogenic safety.* – Simferopol, 2016. – №3 (55). – P. 86–93.
7. Ruzavin, A.A. Utilization of steelmaking slags by accelerated carbonation / A.A. Ruzavin // *Bulletin of SUSU. The series «Construction and Architecture».* – Chelyabinsk. – 2018. – Vol. 18, No.3. – P. 68–72.
8. Romanenko, I. Steelmaking slag-a complex material for the production of small-size materials using hyper-press technology / I. Romanenko, A. Fadin // *Materials Science Forum.* – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P.737–742.
9. Romanenko, I.I. Influence of modifiers of the structure of slag-alkali binder on cracking / I.I. Romanenko, A.I. Fadin, I.N. Petrovnina, M.I. Romanenko // *Engineering Bulletin of the Don.* – 2021. – № 7 (79). – P. 347–365.
10. Roslan, N.H. Performance of steel slag and steel sludge in concrete / N.H. Roslan, M. Ismail, Z. Abdul-Majid, S. Ghoreishiamiri, B. Muhammad // *Constr. Build. Mater.* – 2016. – №104. – P. 16–24.
11. Mo, L. Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing / L. Mo, F. Zhang, M. Deng // *Cem. Concr. Res.* – 2016. – №88. – P. 217–226.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2023_1_93

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ОТСЛАИВАНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

В.И. Логанина

Установлены закономерности изменения прочности сцепления защитно-декоративных покрытий цементных бетонов в зависимости от пористости подложек при воздействии климатических факторов. Рассчитана вероятность отслаивания покрытия в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: лакокрасочные покрытия, вероятность отслаивания, адгезия, когезия

STATISTICAL ANALYSIS OF THE PROBABILITY OF PEELING OF PAINT COATINGS OF CEMENT CONCRETE

V.I. Loganina

The patterns of change in the adhesion strength of protective and decorative coatings of cement concretes under the influence of climatic factors, depending on the porosity of the substrates, have been established. The probability of coating peeling during operation is calculated.

Keywords: paint coatings, peeling probability, adhesion, cohesion

Для отделки фасадов зданий широко применяются лакокрасочные материалы, декоративные сухие строительные смеси [1–4]. В процессе эксплуатации под воздействием внешней среды происходит частичное разрушение отделочного покрытия, проявляющееся в виде отслоений или трещин. Нами были проведены обследования состояния поверхности фасадов зданий в г. Пензе по ул. Циолковского, ул. Калинина, ул. Можайского. Установлено, что основными дефектами, возникающими в процессе эксплуатации, являются трещины в покрытии, а также их отслаивание [5].

Условия адгезионного разрушения можно записать в виде [6]

$$R_a < R_k, \quad (1)$$

где R_a и R_k – соответственно адгезионная и когезионная прочность покрытий.

Зная законы распределения (плотности вероятностей) $f(R_a)$ и $f(R_k)$, можно определить зависимость вероятности адгезионного отказа P_a от наблюдаемого значения R_k [7–10]:

$$P_a(R_k) = \int_{-\infty}^{R_k} f(R_a) dR_a. \quad (2)$$

Функция распределения имеет вид

$$f(R_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{R_a}} e^{-\frac{1(R_a - \bar{R}_a)^2}{2\sigma_{R_a}^2}}. \quad (3)$$

Управление качеством процессов создания защитных лакокрасочных покрытий цементных бетонов включает в себя необходимость исследований изменения характеристик покрытий при воздействии различных климатических факторов (повышенная температура, влажность и др.). Следовательно, какую-либо характеристику покрытия можно представить как

$$R_i = f(a_1^i, a_2^i, \dots, a_n^i, t), \quad (4)$$

где R_i – характеристика покрытия; $a_1^i, a_2^i, \dots, a_n^i$ – показатели, определяющие характеристику покрытия; t – время (продолжительность термостарения, УФ-облучения, количество циклов увлажнения и др.).

Рассмотрим пример определения статистической оценки вероятности адгезионного разрушения покрытий на примере поливинилацетатцементной ПВАЦ краски, сформированных на цементных подложках с различной пористостью, в процессе проведения циклов «увлажнение–высушивание». Величину прочности сцепления R_a в рассматриваемом примере можно записать как

$$R_a = f(\Pi, t), \quad (5)$$

где Π – пористость подложки.

Когезионная прочность R_k не зависит от пористости подложки, и в рассматриваемой задаче этой зависимостью можно пренебречь, а значит примем $R_k = f(t)$.

В любой момент времени величины R_a и R_k будут являться случайными, распределёнными по нормальному закону, и будут определяться следующими математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями: $M_{R_a}(\Pi, t)$, $\sigma_{R_a}(\Pi, t)$, $M_{R_k}(t)$, $\sigma_{R_k}(t)$.

Зная законы распределения (плотности вероятности) $f(R_a)$ и $f(R_k)$, можно определить зависимость вероятности нарушения сцепления P_a от наблюдаемого значения R_k . Вероятность адгезионного разрушения покрытия будет определяться как значение функции распределения двумерной случайной величины $F(R_a, R_k)$, определяемое как

$$P(R_a < R_k) = \int_0^{\infty} \int_{R_a}^{\infty} f(R_k) \cdot f(R_a) dR_k dR_a, \quad (6)$$

где

$$f(R_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{R_k}^2(t)}} e^{-\frac{(R_k - M_{R_k}(t))^2}{2\sigma_{R_k}^2(t)}}; \quad (7)$$

$$f(R_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{R_a}^2(\Pi, t)}} e^{-\frac{(R_a - M_{R_a}(\Pi, t))^2}{2\sigma_{R_a}^2(\Pi, t)}}. \quad (8)$$

Таким образом, вероятность $P(R_a < R_k)$ будет являться функцией, зависящей от временного показателя и пористости подложки.

Для установления наличия причинно-следственной связи между физико-механическими характеристиками покрытий и вероятностью их разрушения в виде отслаивания был проведен следующий эксперимент. Красочные составы наносились кистью на растворные подложки в два слоя с промежуточной сушкой в течение 24 часов. В качестве красочного состава применяли поливинилацетатцементную ПВАЦ краску. Были проведены испытания окрашенных образцов с различной пористостью подложки при последовательном увлажнении и высушивании покрытий.

Определение предела прочности при растяжении (когезионная прочность) проводилось по ГОСТ 18299-72* [11] на разрывной машине ИР 5057-50. Метод основан на растяжении испытуемого образца до разрыва при скорости деформирования 1мм/мин. Образцы составов размерами 10×10×50 мм закрепляли в зажимах разрывной машины так, чтобы его продольная ось была расположена в направлении растяжения, а приложенные силы действовали равномерно по всему сечению образца. Испытания проводили при температуре воздуха $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 60 %. Образцы, которые в процессе испытания разрушались за пределами рабочей части (20 мм) или перед зажимами, в расчёт не принимались.

Расчёт предела прочности при растяжении (когезия) проводили по результатам испытания не менее пяти образцов. Предел прочности при растяжении R_p , МПа ($\text{H}/\text{мм}^2$), для каждого образца вычисляли по формуле

$$R_k = \frac{F_{Pi}}{S_{oi}}, \quad (9)$$

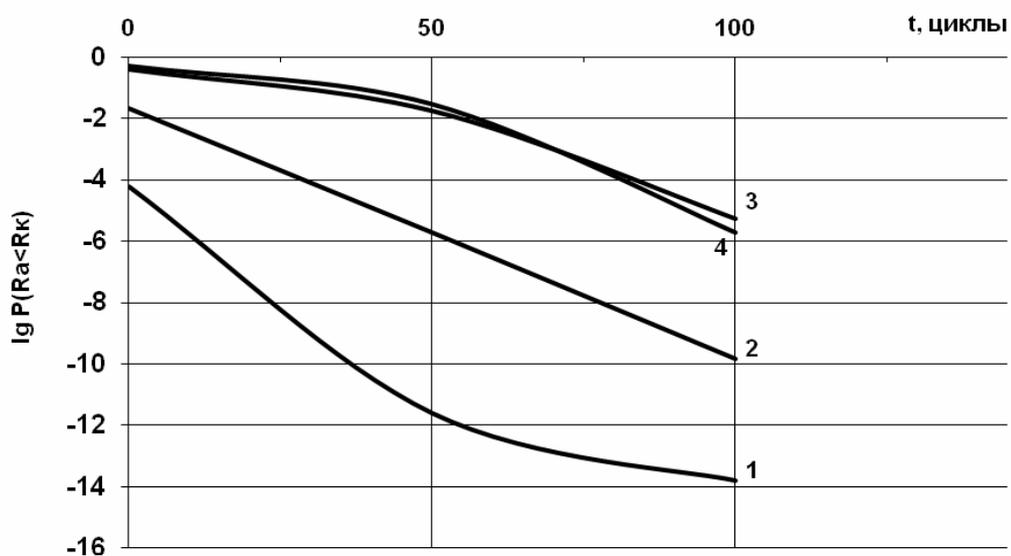
где F_{Pi} – растягивающая нагрузка в момент разрыва, Н; S_{oi} – начальная площадь поперечного сечения образца, мм^2 .

Для оценки адгезионной прочности применяли метод отрыва штампа (нормальный отрыв) [12]. Метод основан на определении силы отслаивания штампа от поверхности отрывом. Использовали штампы цилиндрической формы диаметром 18 мм, наклеенные эпоксидным клеем (ЭДП-ТУ 0751-018-48284381-00) на отделанную поверхность. Устанавливали образец горизонтально, прикрепляя к штампу динамометр, и фиксировали силу, необходимую для отрыва штампа от испытуемого образца. Прочность сцепления отделочного состава с подложкой определяли по формуле

$$R_a = \frac{P}{F}, \quad (10)$$

где P – сила отрыва, Н; F – площадь контакта штампа с покрытием, м^2 .

Результаты исследований и расчетов приведены на рисунке и в таблице.



Изменение вероятности адгезионного отказа

в зависимости от количества циклов увлажнения-высушивания:

- 1 – подложка с пористостью $\Pi=1,9\%$; 2 – подложка с пористостью $\Pi=2,7\%$;
3 – подложка с пористостью $\Pi=3,4\%$; 4 – подложка с пористостью $\Pi=5,9\%$

Значения адгезионной и когезионной прочности покрытий
в процессе увлажнения-высушивания

№ п/п	Адгезионная прочность R_a , МПа				R_k , МПа
	Пористость подложки P , %				
	1,9	2,7	3,4	5,9	
0 циклов					
Средние значения, $M_{R_a}(P, t)$, $M_{R_k}(t)$	3,8	2,9	2,2	2,1	2,1
СКО, $\sigma_{R_a}(P, t)$, $\sigma_{R_k}(t)$	0,304	0,239	0,184	0,167	0,310
50 циклов					
Средние значения, $M_{R_a}(P, t)$, $M_{R_k}(t)$	3,8	2,8	2,0	1,84	1,4
СКО, $\sigma_{R_a}(P, t)$, $\sigma_{R_k}(t)$	0,311	0,252	0,228	0,160	0,167
100 циклов					
Средние значения, $M_{R_a}(P, t)$, $M_{R_k}(t)$	2,9	2,5	1,9	1,79	0,9
СКО, $\sigma_{R_a}(P, t)$, $\sigma_{R_k}(t)$	0,239	0,228	0,201	0,160	0,109

Анализ данных, приведенных на рисунке, свидетельствует, что в начальный момент времени снижение пористости подложки с 3,4 % до 1,9 % ведёт к резкому снижению (на 4 порядка) вероятности адгезионного отказа, увеличение пористости с 3,4 % до 5,9 % величину вероятности практически не меняет.

Для покрытий на всех подложках наблюдается уменьшение вероятности адгезионного отказа при увеличении количества циклов, что говорит о более сильном влиянии увлажнения на снижение когезионной прочности покрытий, однако необходимо отметить, что на подложках с пористостью 1,9 % и 2,7 % скорость снижения вероятности адгезионного отказа выше, чем на подложках с пористостью 3,4 % и 5,9 %.

Процессы изменения прочностных характеристик покрытий на подложках с пористостью 3,4 % и 5,9 % можно считать идентичными, что позволяет выдвинуть гипотезу о существовании такого значения пористости подложки для ПВАЦ покрытий (например, 3,4 %), которое можно считать граничным, разделяющим области высокой и слабой чувствительности их свойств к воздействию увлажнения.

Приведённая методика и результаты исследований могут быть использованы при разработке требований к защитным свойствам лакокрасочных покрытий для различных поверхностей и конкретных условий эксплуатации, а также для решения вопросов прогнозирования защитных свойств покрытий.

Список литературы

1. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.
2. 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.
3. Логанина, В.И. Оценка декоративных свойств лакокрасочных покрытий / В.И. Логанина, В.А. Смирнов, С.Н. Кислицына, О.А. Захаров, В.Г. Христюбов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2004. – № 8. – С. 10–12.
4. 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.
5. Логанина, В.И. Повышение качества лакокрасочных покрытий строительных изделий и конструкций / В.И. Логанина, Л.П. Орентлихер. – М.: АСВ, 2007.
6. Зимон, А.Д. Адгезия пленок и покрытий / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1977. – 352 с.
7. Павлов, И.В. Статистические методы оценки надёжности сложных систем по результатам испытаний / И.В. Павлов. – М.: Радио и связь, 1982 – 168 с.
8. Саката Сиро. Практическое руководство по управлению качеством / Саката Сиро; пер с 4-го японского издания С.И. Мышкиной; под ред. В.И. Гостяева. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
9. Статистические методы повышения качества: пер. с англ./ под ред. Х.Кумэ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 304 с.
10. Шиндовский, Э. Статистические методы управления качеством / Э. Шиндовский, О. Шюрц. – М.: Мир, 1976.
11. ГОСТ 18299-72 Материалы лакокрасочные. Метод определения предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и модуля упругости. – М.: Издательство стандартов, 1989.
12. Карякина, М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Карякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.

References

1. Loganina, V.I. To the question of regulation of technological processes of concrete production / V.I. Loganina // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 3–4 (603–604). – P. 42–45
2. 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.
3. Loganina, V.I. Evaluation of the decorative properties of paint and varnish coatings / V.I. Loganina, V.A. Smirnov, S.N. Kislitsyna, O.A. Zakharov, V.G. Khristolyubov // Paints and varnishes and their application. – 2004. – No. 8. – P. 10–12.
4. 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.
5. Loganina, V.I. Improving the quality of paint coatings for building products and structures / V.I. Loganina, L.P. Orentlicher. – M.: DIA, 2007.
6. Zimon, A.D. Adhesion of films and coatings / A.D. Zimon. – M.: Chemistry, 1977. – 352 p.
7. Pavlov, I.V. Statistical methods for assessing the reliability of complex systems based on test results / I.V. Pavlov. – M.: Radio and communication, 1982. – 168 p.

8. Sakata Shiro. A Practical Guide to Quality Management / Sakata Shiro; Translated from the 4th Japanese edition by S.I. Myshkina; Ed. IN AND. Gostyaev. – М.: Engineering, 1980. – 215 p.
9. Statistical methods of quality improvement: Translated from English / ed. H.Kume. – М.: Finance and statistics, 1990. – 304 p.
10. Shindovskiy, E. Statistical methods of quality management / E. Shindovskiy, O. Schurts. – М.: Mir, 1976.
11. GOST 18299-72. Paintwork materials. Method for determining ultimate tensile strength, elongation at break and modulus of elasticity. – М.: Standards Publishing House, 1989.
12. Karyakina, M.I. Testing of paint and varnish materials and coatings / M.I. Karyakina. – М.: Chemistry, 1988. – 272 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.078.416

DOI 10.54734/20722958_2023_1_99

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

Артюшин Дмитрий Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
декан Инженерно-строительного института
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Коновалов Павел Владимирович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: konovalow58@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

Artyushin Dmitriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Dean of the Civil Engineering Institute
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Konovalov Pavel Vladimirovich,
Postgraduate student of the Department of
«Building Structures»
E-mail: konovalow58@yandex.ru

СОПРОТИВЛЕНИЕ МОНОЛИТНЫХ УЗЛОВ СОПРЯЖЕНИЯ КОЛОНН И БАЛОК МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ

Д.В. Артюшин, П.В. Коновалов

Анализируется физическая работа монолитных узлов сопряжения колонн с балками многоэтажных каркасов зданий. Предлагаются расчетные модели и аналитические зависимости сопротивления исследуемых узлов, а также принцип их наиболее эффективного армирования.

Ключевые слова: монолитные каркасы зданий, узлы сопряжения колонн с балками, расчетные модели, армирование, реализация

RESISTANCE OF MONOLITHIC KNOTS OF INTERFACE OF COLUMNS AND BEAMS OF MULTI-STOREY BUILDINGS FRAMES

D.V. Artyushin, P.V. Konovalov

The physical work of monolithic knots of columns with beams of multi-storey buildings is analyzed. Calculation models and analytical dependences of the studied knots resistance are offered, as well as the principle of their most effective reinforcement.

Keywords: monolithic frames of buildings, knots of columns with beams, calculation models, reinforcement, implementation

Современная практика строительства многоэтажных железобетонных каркасных зданий требует постоянного совершенствования существующих методов расчета и конструирования несущих конструкций и особенно обеспечивающих их совместную работу узлов сопряжений. При проектировании узлов монолитных каркасов зданий, как правило, до 80 % арматуры принимается по конструктивным требованиям, а узлы в целом оказываются переармированными. Однако имеющиеся немногочисленные испытания фрагментов узлов показывают, что их разрушение наиболее часто происходит по центральной части, что подтверждается большим числом разрушений железобетонных каркасов при действии сейсмических воздействий.

Ниже приводятся результаты исследований физической работы центральной зоны монолитных железобетонных узлов сопряжения колонн крайнего ряда с балками (ригелями); конструкция узлов сопряжения колонн с балками и армирование их центральной части принимаются в соответствии с разработанной [1] программой исследований (в трех вариантах; рис. 1).

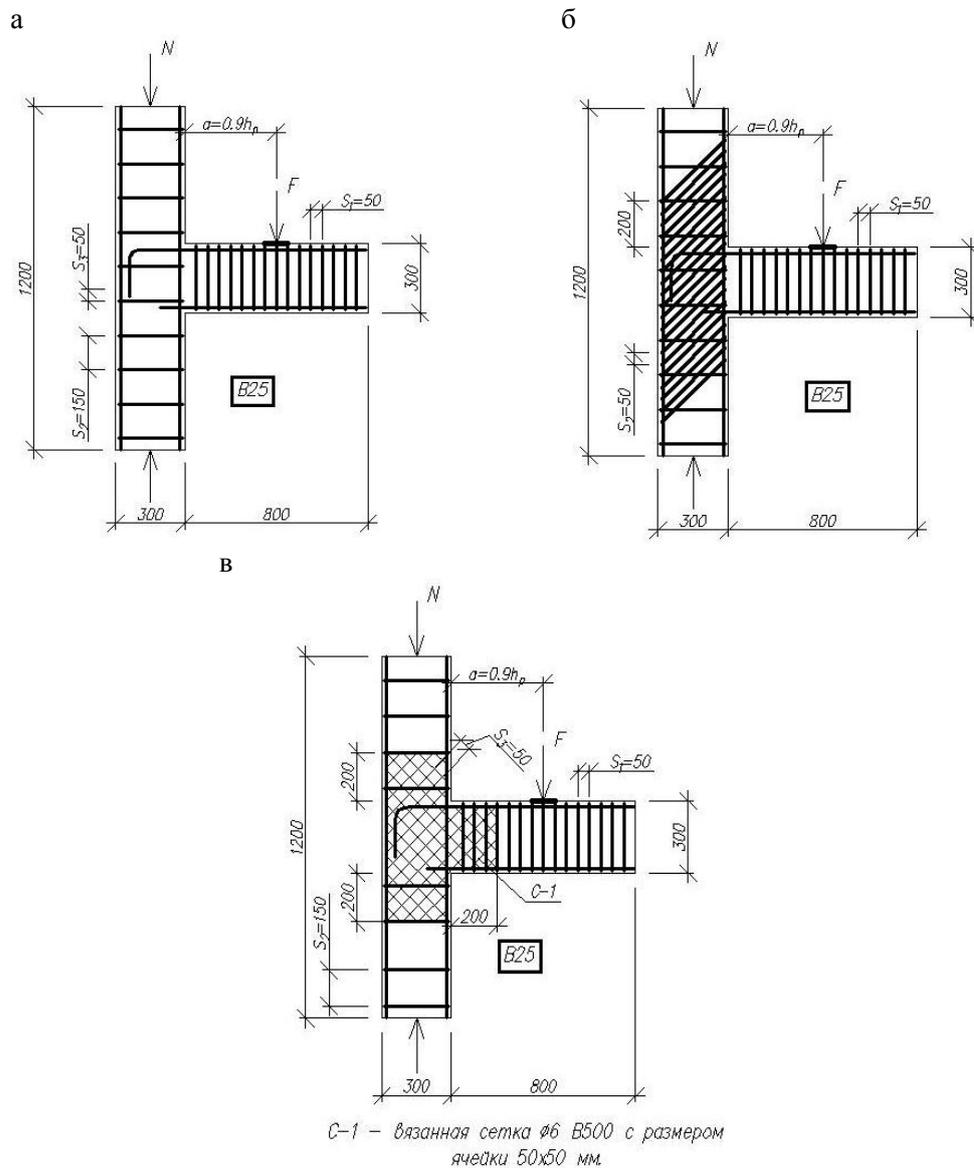


Рис. 1. Схемы армирования:

а – продольная арматура и поперечные стержни, перпендикулярные к оси колонны (вариант №1); б – продольная арматура и наклонные поперечные стержни (вариант №2); в – продольная арматура и сетки (вариант №3)

Определялись и получены величины нормальных и касательных напряжений (использовались программные комплексы «Ли́ра» и «Ansys» [2, 3]), выявлен характер распределения внутренних усилий в узле, а также характер разрушения исследуемых образцов (рис. 2-4). Оказалось, что центральная часть узла испытывает сложный характер напряженного состояния при действии возникающих внутренних усилий – изгибающих моментов и поперечных сил. Распределение главных напряжений σ характеризуется наличием в зоне исследуемого узла двух зон – сжатой и растянутой, наибольшая концентрация растягивающих усилий наблюдается в верхней части узлов, а сжимающих – в нижней.

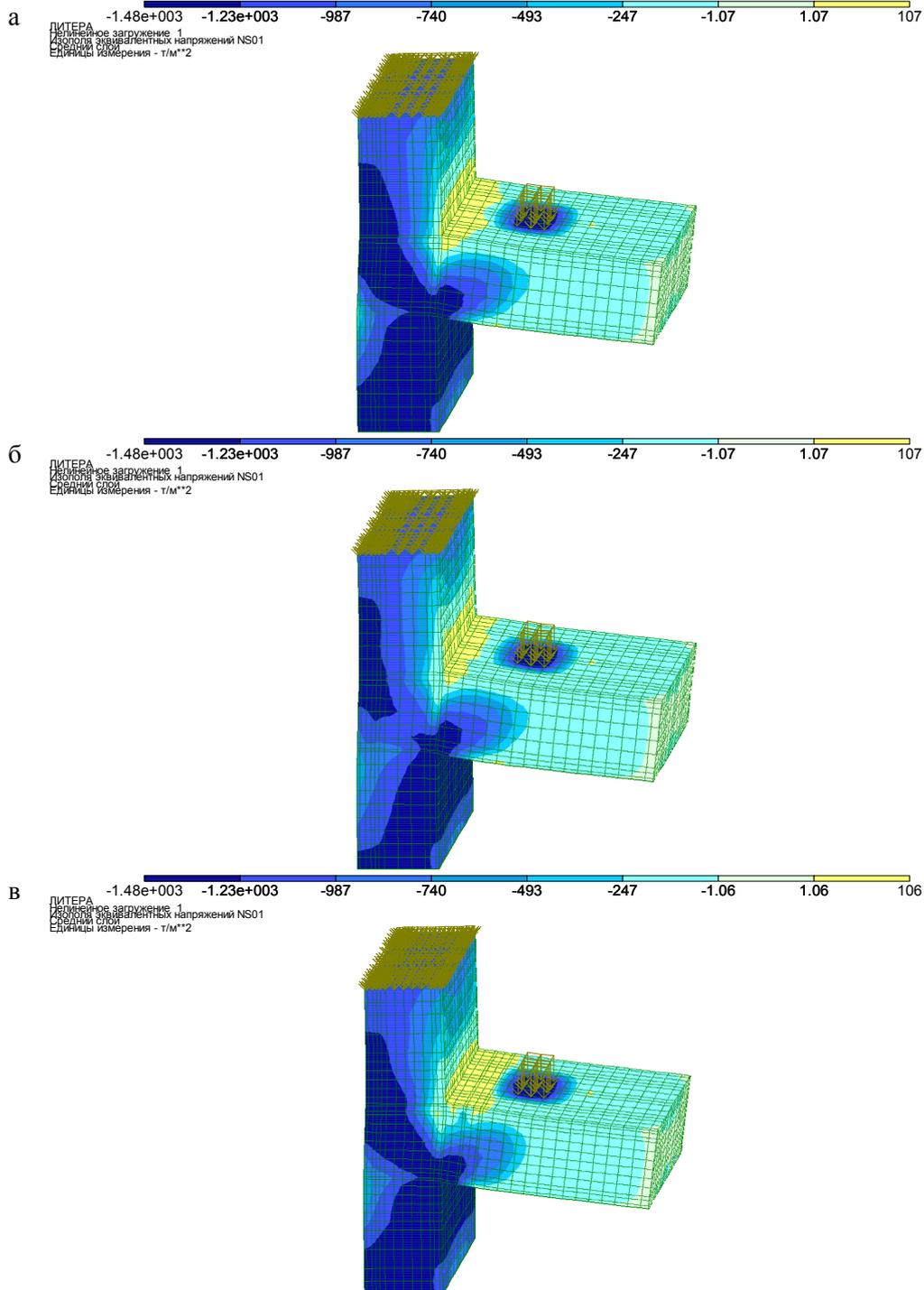


Рис. 2. Изополя распределения главных напряжений σ при расчете в ПК «Ли́ра» при вариантах армирования:
 а – №1; б – №2; в – №3

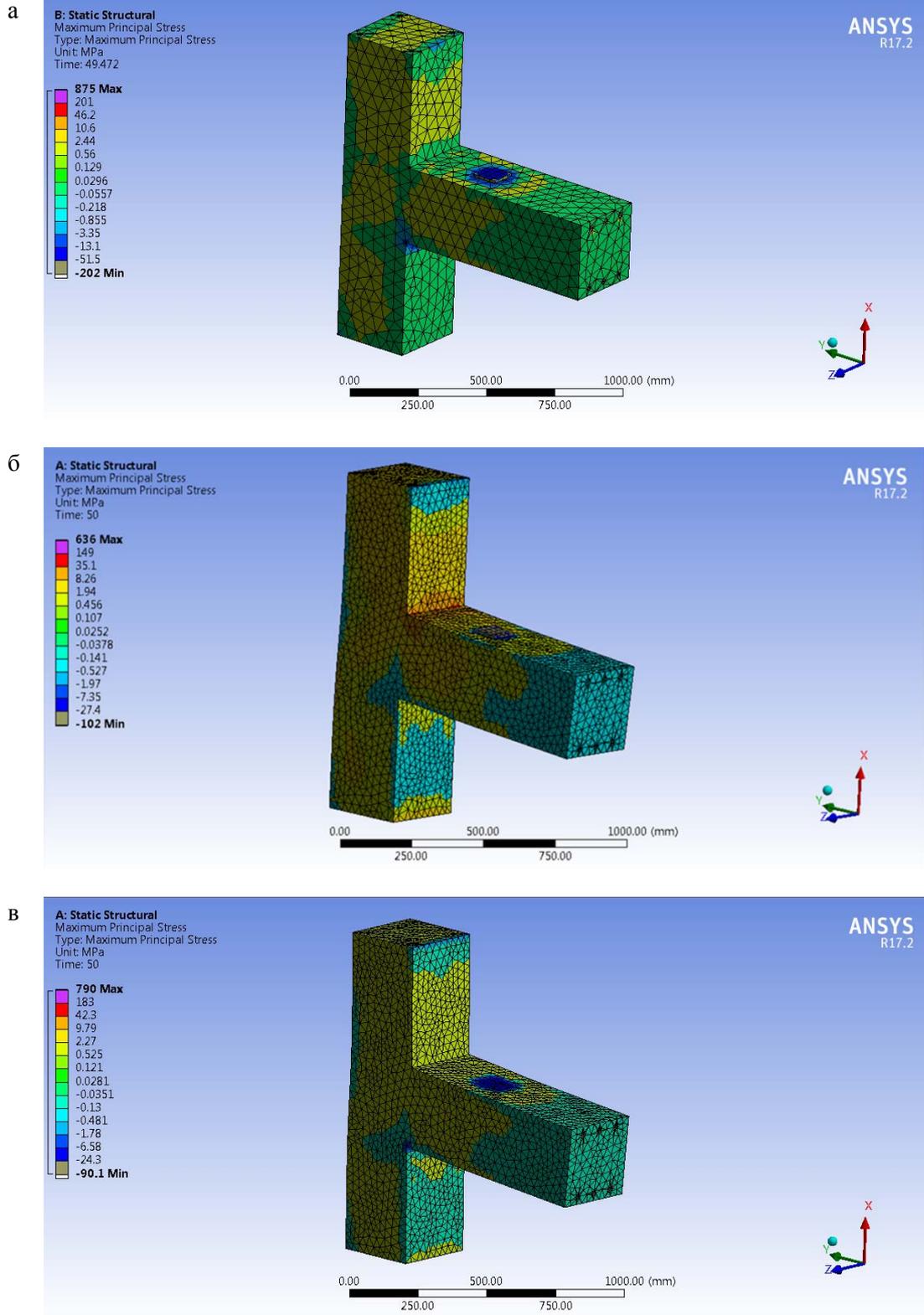


Рис. 3. Изополя распределения главных напряжений σ при расчете в ПК «Ansys» при вариантах армирования:
 а – №1; б – №2; в – №3

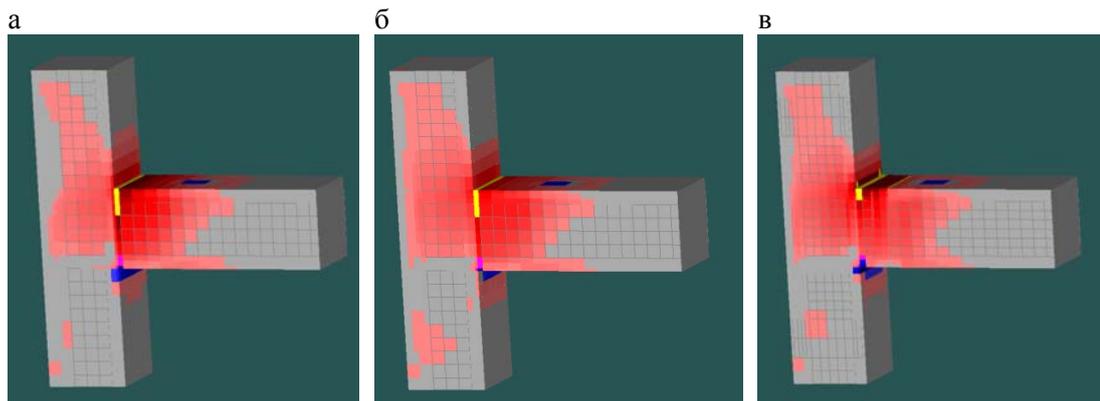


Рис. 4. Характер разрушения исследуемых образцов при вариантах армирования:
а – №1; б – №2; в – №3

Результаты численного эксперимента с оценкой характера разрушений образцов оказались качественно сопоставимыми с данными физического эксперимента, который проводился Пензенским ИСИ совместно с НИИЖБ (рис. 5).

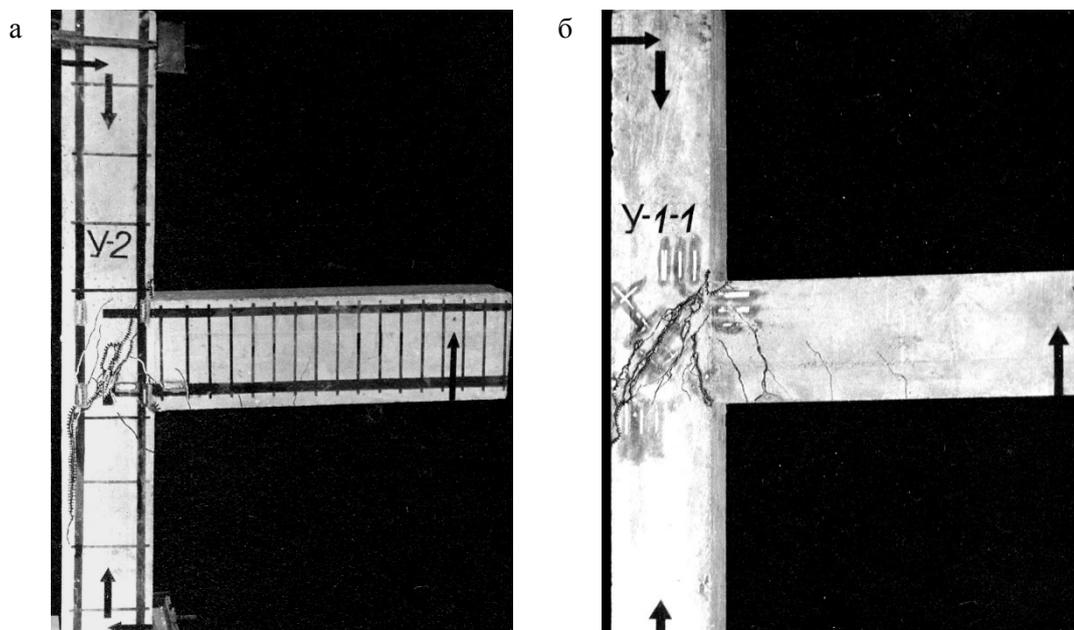


Рис. 5. Схемы разрушения центральной зоны узлов колонн и балок монолитных каркасов [4]

Центральная часть узла испытывает сложный характер напряженного состояния при действии изгибающих моментов и поперечных сил при центральном и внецентренном приложении продольной силы колонны; определяющую роль играют главные напряжения. Прочность узлов повышается при армировании центральной части арматурными сетками (либо замкнутыми, часто расположенными хомутами, установленными перпендикулярно к оси колонны). Узлы сопряжения колонн и балок монолитных каркасов можно отнести к классу коротких элементов (их сопротивление хорошо описывается аналоговыми стержневыми и каркасными моделями [4, 5]).

Построение аналоговых моделей базируется на схемах разрушения узлов (рис. 6).

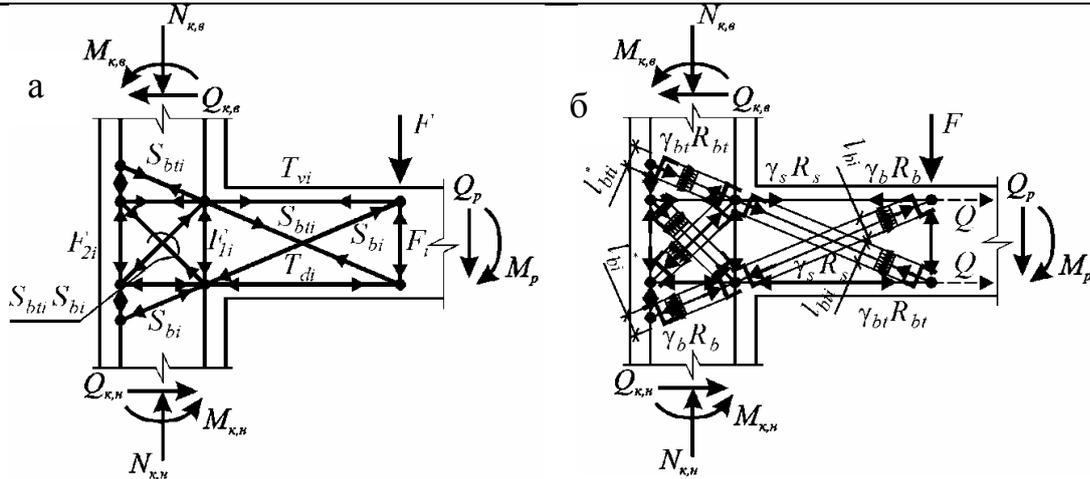


Рис. 6. Стержневые и каркасно-стержневые модели узлов сопряжения колонн с балками монолитных каркасов:

а – стержневая модель; б – каркасно-стержневая модель

Стержневые модели применялись для определения усилий в элементах модели для имитации участков концентрации максимальных сжимающих и растягивающих напряжений в бетоне и арматурных поясах (при условии использования гипотезы шарнирного соединения стержней в узлах). Использовались известные правила для условий шарнирных соединений стержней модели. Обобщенные расчетные зависимости для моделей узлов сопряжения колонн и балок для бетона (S_i) и арматуры (T_i) конструкций принимались в следующем виде:

$$S_i = \frac{F}{\sin \theta_i}; \quad T_i = \frac{F}{\operatorname{tg} \theta_i},$$

где F – нагрузка на ригель исследуемого узла; θ_i – соответствующие углы наклона сжатых или растянутых стержней (рис. 6, а).

Каркасно-стержневая модель выделяет наиболее нагруженные участки (полосы бетона и арматурные пояса, образующие несущую систему узла). С помощью каркасно-стержневой модели определялись размеры и предельные состояния сечений расчетных элементов (при различных схемах разрушения).

Предельные состояния расчетного сечения определялись по появлению в бетоне и арматуре сечения предельных усилий $\gamma_b R_b$ и $\gamma_s R_s$, соответственно.

В каркасно-стержневой модели узлов сопряжений колонн и балок в качестве расчетных принимались центрально-сжатые наклонные полосы размерами $l_{b,\sigma} \times b_{b,\sigma}$ и $l_{b,\kappa} \times b_{b,\kappa}$, где $l_{b,\sigma}$ и $l_{b,\kappa}$ – расчетная ширина наклонных сжатых полос соответственно балки и колонны; $b_{b,\sigma}$ и $b_{b,\kappa}$ – ширина сечения соответственно ригеля и колонны (рис. 6, б).

Условие прочности при разрушении узлов по сжатым полосам имеет вид:

$$S_i \leq \gamma_b R_b l_{bi} b_i,$$

где S_i – усилие сжатия в наклонной полосе бетона, расположенной в колонне ($S_{b,\kappa}$) или балке ($S_{b,\sigma}$); γ_b – коэффициент, корректирующий расчетную величину R_b в зависимости от напряженно-деформированного состояния бетона расчетного сечения и определяемый с помощью критерия прочности бетона.

Условие прочности при разрушении в результате среза сжатых полос бетона:

$$S_{i\tau} \leq \gamma_b \gamma_\tau R_{bt} b l_\tau,$$

где $S_{i\tau}$ – усилие среза в наклонной полосе бетона, расположенной в колонне ($S_{\tau,\kappa}$) или балке ($S_{\tau,\sigma}$); γ_τ – коэффициент, корректирующий прочность бетона при сопротивлении растяжению.

Условие прочности при разрушении по растянутым арматурным поясам:

$$T_i \leq \gamma_s R_s A_s,$$

где T_i – растягивающее усилие продольной арматуры ригеля, расположенной вдоль верхней и нижней граней балки ($T_{s,v}$ и $T_{s,d}$, соответственно), или продольной арматуры колонны ($T_{s,k}$).

Элементы моделей описывают зоны концентраций напряжений. Можно утверждать, что расчетная модель, по сути, является несущим каркасом рассматриваемых узловых соединений. Принцип эффективного армирования монолитных узлов сопряжения колонн и балок заключается в том, чтобы размещать рабочую арматуру вдоль расчетных элементов аналоговых моделей. В сжатых элементах модели используется арматура, расположенная в поперечном направлении относительно осей этих элементов. Рабочие стержни в первом случае будут препятствовать развитию продольных деформаций укорочения и удлинения в бетоне рассчитываемых элементов; во втором – рабочие стержни, расположенные в поперечном направлении сжатых бетонных полос, будут препятствовать развитию поперечных деформаций; армирование будет идеальным с точки зрения эффективности расположения рабочей арматуры, позволяющим в полной мере соответствовать характеру сопротивления узловых соединений; оси стержневых и каркасно-стержневых моделей определяют эффективное расположение арматуры.

Сложный характер напряженного состояния узловых соединений приводит к технологическим осложнениям армирования. Однако при возведении монолитных каркасов в узлах сопряжения колонн и балок возникает необходимость анкеровки продольных стержней арматуры в центральной зоне узла при концентрации большого количества арматурных стержней. Не исключается использование арматурных сеток в качестве поперечной арматуры центральной части узла. Наиболее рациональным видом арматурных сеток являются сетки с наклонными стержнями (см. рис. 1, в).

Обнаружилась хорошая сходимость результатов расчета узлов по каркасно-стержневой модели (рис. 7) с результатами расчета численным методом в двух программных комплексах (см. таблицу).

Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния узлов сопряжения колонн и ригелей при расчете в двух программных комплексах и с помощью каркасно-стержневой модели

	Метод расчета	Максимальные главные напряжения в бетонном сечении, т/м ²	Максимальные касательные напряжения в бетонном сечении, т/м ²	Максимальные усилия в растянутой арматуре, т
Вариант армирования №1	ПК «Лира»	$-1,48 \times 10^3$	-771	12,3
	<u>Каркасно-стержневая модель</u>	$-1,41 \times 10^3$	-806	<u>12,57</u>
	ПК «Ansys»	$-1,41 \times 10^3$	-810	12,77
Вариант армирования №2	ПК «Лира»	$-1,48 \times 10^3$	-762	12,6
	<u>Каркасно-стержневая модель</u>	$-1,406 \times 10^3$	-785	<u>12,5</u>
	ПК «Ansys»	$-1,38 \times 10^3$	-798	12,45
Вариант армирования №3	ПК «Лира»	$-1,48 \times 10^3$	-753	11,8
	<u>Каркасно-стержневая модель</u>	$-1,41 \times 10^3$	-764	<u>11,7</u>
	ПК «Ansys»	$-1,39 \times 10^3$	-780	11,37

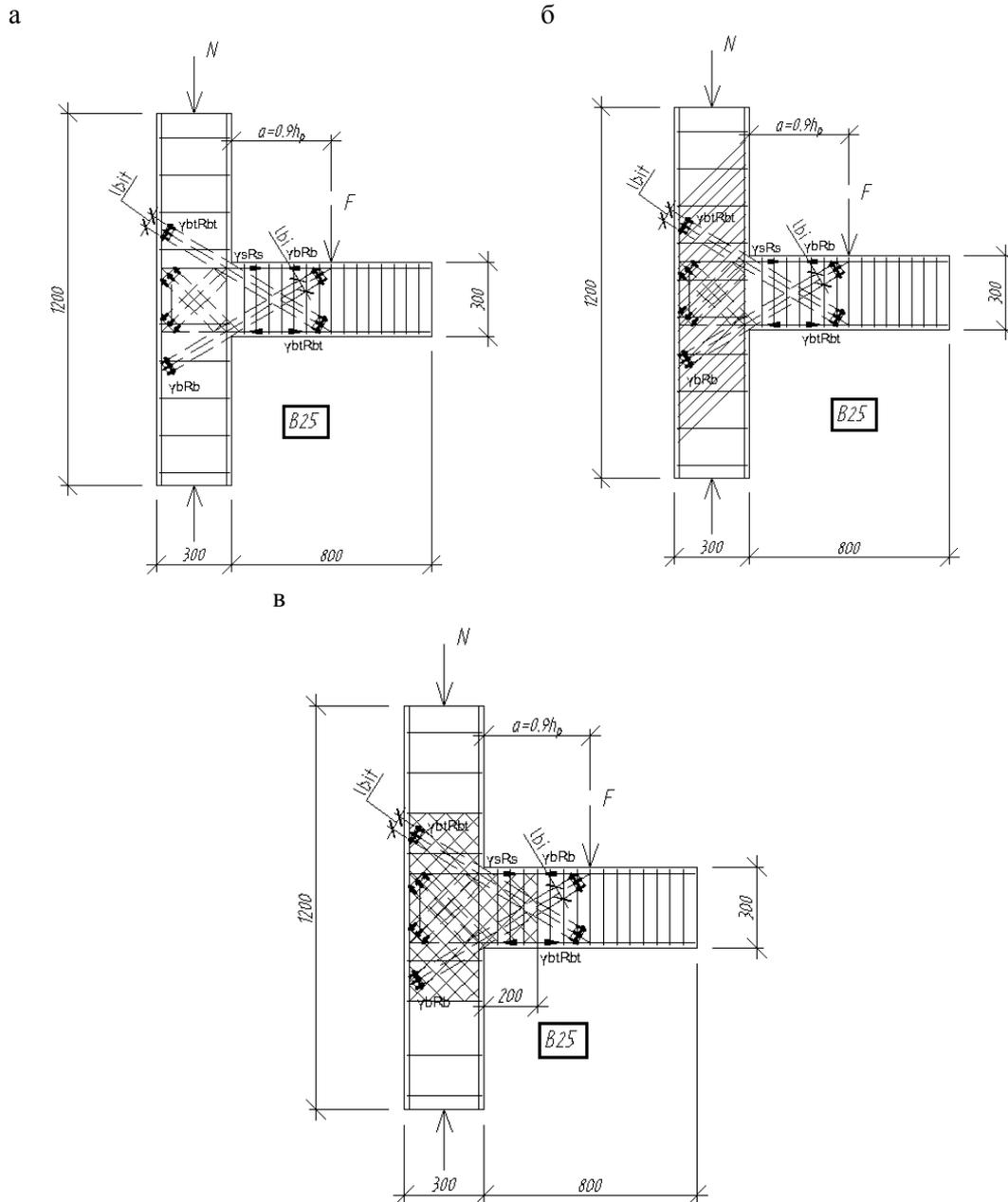


Рис. 7. Армирование центральной части узла с элементами каркасно-стержневой модели:
 а – продольной арматурой и поперечными стержнями, перпендикулярными к оси колонны;
 б – продольной арматурой и наклонными поперечными стержнями;
 в – продольной арматурой и сетками

В ы в о д ы :

1. Использование арматурных сеток с наклонными стержнями в качестве поперечной арматуры центральной части узла является эффективным видом армирования узлов.
2. Расчет узлов по каркасно-стержневой модели отражает действительную физическую работу монолитных узлов; погрешность не превышает 5 % от полученных результатов расчета в программных комплексах «Лира» и «Ansys».

Список литературы

1. Артюшин, Д.В. Программа экспериментальных исследований монолитных узлов сопряжения колонн крайнего ряда с балками / Д.В. Артюшин, П.В. Коновалов // Моделирование и механика конструкций. – 2019. – №10. – С. 185–192.
2. Артюшин, Д.В. Оценка напряженно-деформированного состояния центральной зоны узловых сопряжений колонн с балками монолитных каркасных зданий / Д.В. Артюшин, П.В. Коновалов // Моделирование и механика конструкций. – 2021. – №13. – С. 85–96.
3. Артюшин, Д.В. Моделирование физической работы узлов сопряжения колонн и балок монолитных каркасов многоэтажных зданий / Д.В. Артюшин, П.В. Коновалов // Моделирование и механика конструкций. – 2022. – №16.
4. Баранова, Т.И. Развитие экспериментальной базы аналоговых моделей узлов сопряжения колонн и балок монолитных каркасов / Т.И. Баранова, В.А. Новиков, Д.В. Артюшин // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2005. – №9. – С. 67.
5. Баранова, Т.И. Совершенствование метода расчета монолитных узлов сопряжения железобетонных балок на основе аналоговых расчетных стержневых моделей / Т.И. Баранова, Д.В. Артюшин, А.И. Агуреев // Academia. Архитектура и строительство. – 2007. – №1. – С. 74–78.

References

1. Artyushin, D.V. The program of experimental studies of monolithic connections for the column of the extreme row with beams / D.V. Artyushin, P.V. Konovalov // Modeling and mechanics of structures. – 2019. – №10. – P. 185–192.
2. Artyushin, D.V. Evaluation of the acutely deformed state in the zone of focal lesions of columns with beams of monolithic frame buildings / D.V. Artyushin, P.V. Konovalov // Modeling and mechanics of structures. – 2021. – №13. – P. 85–96.
3. Artyushin, D.V. Modeling of work on the physical detection of columns and beams of monolithic frames of multi-storey buildings / D.V. Artyushin, P.V. Konovalov // Modeling and mechanics of structures. – 2022. – №16.
4. Baranova, T.I. Development of the experimental base of analog models of junctions of columns and beams of monolithic frames / T.I. Baranova, V.A. Novikov, D.V. Artyushin // Bulletin of the Department of Building Sciences of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. – 2005. – №9. – P. 67.
5. Baranova, T.I. Improvement of the method for calculating monolithic junctions of reinforced concrete beams based on analog calculation rod models / T.I. Baranova, D.V. Artyushin, A.I. Agureev // Academia. Architecture and construction. – 2007. – №1. – P. 74–78.

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

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

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

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

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

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВКЛЕЕННЫМИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫМИ ШАЙБАМИ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Д.О. Мартышкин, М.В. Арискин

Представлена методика определения несущей способности соединений деревянных конструкций, выполненных с применением клеенных стеклопластиковых шайб. Представлены результаты испытаний образцов. Установлен критерий разрушения соединений на клеенных стеклопластиковых шайбах. Установлено влияние толщины шайбы на несущую способность соединений деревянных конструкций.

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

BEARING CAPACITY OF WOODEN STRUCTURES CONNECTIONS WITH DIFFERENT THICKNESS OF GLUED FIBERGLASS WASHERS

D.O. Martyshkin, M.V. Ariskin

The method of determination bearing capacity of wooden structures connections using of glued fiberglass washers is presented. The results of samples tests are presented. The criterion of connections destruction on glued fiberglass washers is established. The effect of the washer thickness on the bearing capacity of wooden structures connections is established.

Keywords: wooden structures, connection, washer, fiberglass, bearing capacity, criterion of destruction

Введение

Узловые соединения деревянных конструкций чаще всего выполняются с применением металлических связей (клеенные плоские стержни, кольцевые шпонки, стальные шайбы [1-5] и др.).

На основе достоинств клеенных стальных шайб [4] предлагается коррозионно-стойкое, немагнитное и вместе с тем достаточно прочное соединение с применением клеенных шайб из стеклотекстолита КАСТ-В [6].

В [6, 7] представлены результаты испытаний трехсоставных и односоставных образцов с клеенными стеклопластиковыми шайбами диаметром $D_{ш}=60$ мм и толщиной $t_{ш}=10$ мм. Установлена высокая несущая способность образцов на клеенных

стеклопластиковых шайбах в сравнении с клееными стальными шайбами с аналогичными параметрами.

В ходе дальнейших исследований требуется установить влияние толщины шайбы на несущую способность соединений и установить критерии разрушения образцов на клеенных стеклопластиковых шайбах.

На основе соединений с клеестальными шайбами [4] представлена методика определения несущей способности соединений деревянных конструкций с клееными стеклопластиковыми шайбами. Рассмотрены результаты испытаний образцов. Выполнено сравнение разрушающей нагрузки образцов с клееными стеклопластиковыми шайбами различной толщины.

Методика определения несущей способности

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

Образцы на клеенных стеклопластиковых шайбах изготавливались по технологии, описанной в [6]. Все образцы маркировались по каждой серии в соответствии с маркировкой, представленной в [7].

Форма и размер образцов приняты с соблюдением шага расстановки шайб S_1 и S_3 . В качестве основного образца принят дощатый элемент с размерами (a , b , c).

Размеры деревянного элемента и параметры расстановки шайб приняты по аналогии с образцами серий ВШ-60-10 и ВШ-60-10-РМ [6, 7]. Основные параметры испытываемых образцов показаны на рис. 1.

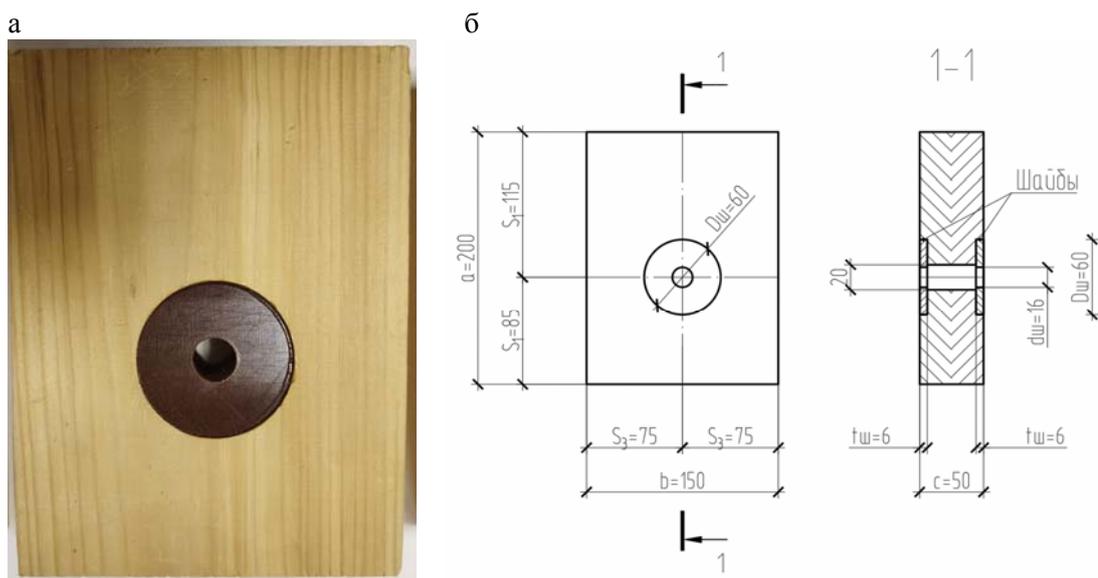


Рис. 1. Образец на клеенных стеклопластиковых шайбах:
а – общий вид образца; б – размеры образца

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-60-6-МН-1	200	150	50	60	6	5	Передача нагрузки через металлические накладки
ВШ-60-6-МН-2							
ВШ-60-6-МН-3							
ВШ-60-6-МН-4							
ВШ-60-6-МН-5							

Образцы испытывались по схеме, при которой нагружение образца производилось через металлические накладки, передающие усилия на шайбы (рис. 2), и которая аналогична схеме, при которой нагружение образцов осуществлялось через раму металлическую (PM) [7].

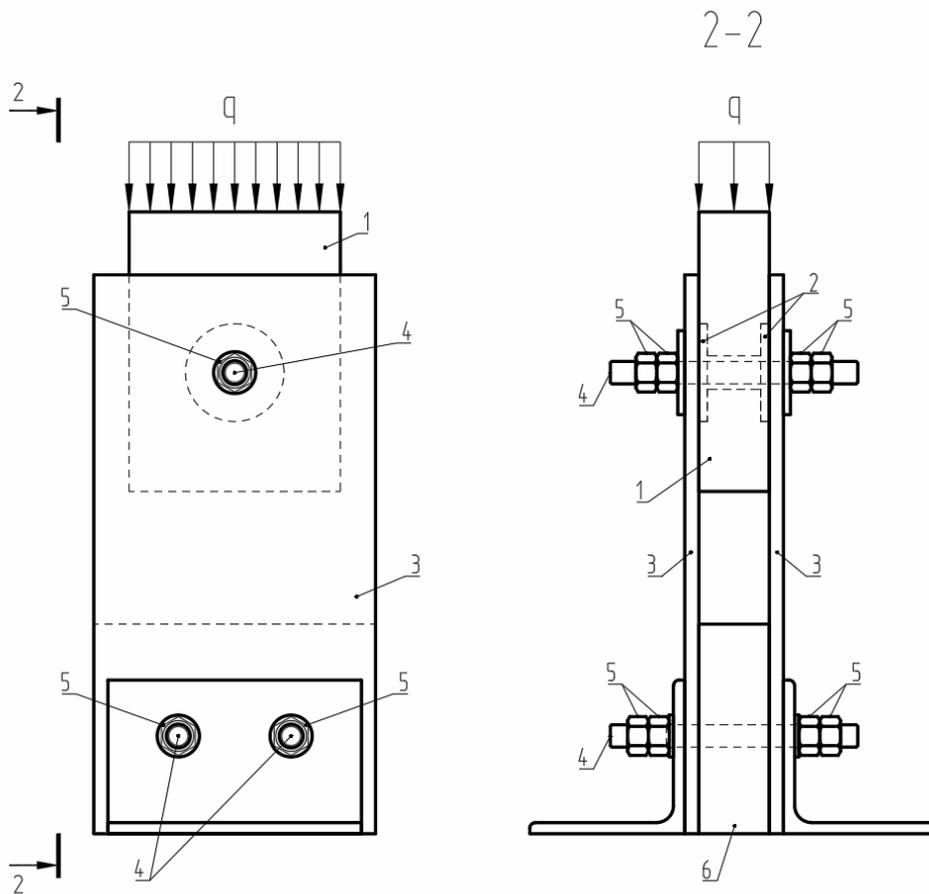


Рис. 2. Схема нагружения образца через металлические накладки:
 1 – деревянный элемент; 2 – вклеенные шайбы; 3 – металлическая накладка;
 4 – металлическая шпилька; 5 – металлическая гайка;
 6 – деревянная вставка

Испытания образцов

Образцы испытывались на сжатие при нормальных температурно-влажностных условиях, т.е. при температуре 18-20°C и относительной влажности воздуха $W=60-65\%$. Испытания проводились на гидравлическом прессе П-500 с максимальной нагрузкой 500 кН.

На основе ранее испытанных образцов с вклеенными стеклопластиковыми шайбами [6, 7] передача нагрузки на образцы осуществлялась непрерывно со скоростью нагружения 2 кН/мин. Скорость нагружения принималась непрерывной и равномерной с фиксацией начального и конечного времени. В процессе испытаний осуществлялся осмотр образцов. Результаты заносились в журнал испытаний.

Общий вид образца в испытательной установке показан на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид образца в испытательной установке

Результаты испытаний

На начальном этапе производилось нагружение образца до 15 кН для обжатия шайб и исключения появления рыхлых деформаций. После чего образцы нагружались до полного разрушения. Результаты испытаний образцов при действии кратковременной нагрузки приведены в табл. 2, графики нарастания деформаций сдвига – на рис. 4.

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-60-6-МН-1	60	6	44,76
ВШ-60-6-МН-2			43,22
ВШ-60-6-МН-3			44,26
ВШ-60-6-МН-4			41,44
ВШ-60-6-МН-5			56,00

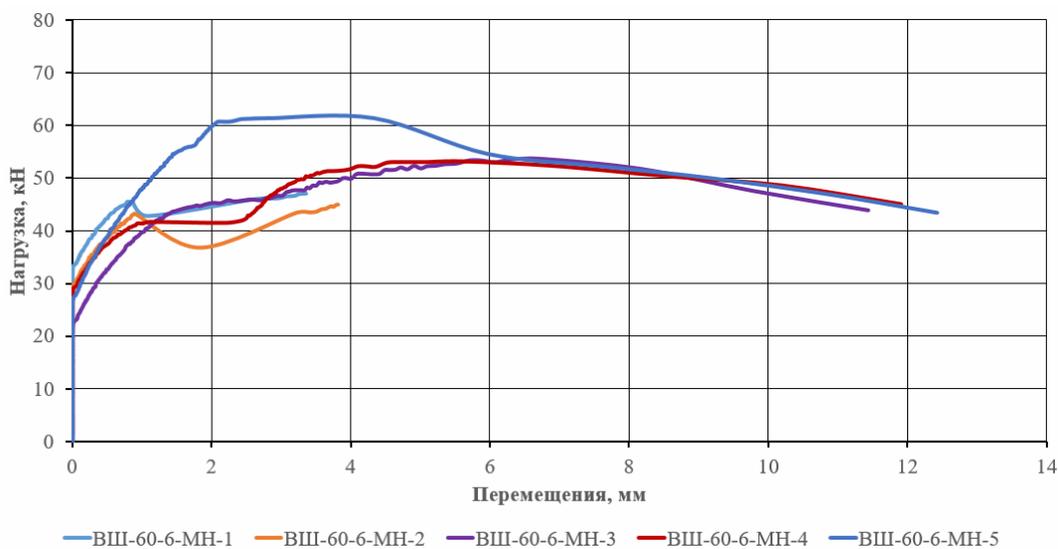


Рис. 4. Деформации сдвига в серии ВШ-60-6-МН

График имеет выраженную упругую работу, что показывает монолитность соединения. Из графика видно, что разрушение шайб происходит в пределах деформаций, не превышающих 2 мм. Общий вид разрушения образцов представлен на рис. 5.

В процессе нагружения образцов происходило смятие шайбы под металлической шпилькой, после чего в работу включался деревянный элемент, и нагружение образца продолжалось до полного разрушения. Как и в серии ВШ-60-10-РМ [7], в первую очередь разрушается стеклопластиковая шайба, после чего происходит разрушение деревянного элемента. Таким образом, критерием разрушения соединения является разрушение стеклопластиковой шайбы, и в табл. 2 приведена разрушающая нагрузка согласно данному критерию.

Общее разрушение образца сопровождалось интенсивным ростом деформаций сдвига без заметного увеличения нагрузки на сравнительно большом промежутке времени. Эти деформации носили пластический характер, поскольку рост их был плавным, без скачков.



Рис. 5. Общий вид разрушения образцов

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

Разрушающая нагрузка образцов с клееными стеклопластиковыми шайбами различной толщины

Рассмотрим влияние толщины клеенных стеклопластиковых шайб на разрушающую нагрузку образцов. Величины разрушающей нагрузки образцов серии ВШ-60-6-МН, ВШ-60-10-РМ и ВШ-60-10 при действии кратковременной нагрузки приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Разрушающая нагрузка образцов серий ВШ-60-6-МН, ВШ-60-10-РМ и ВШ-60-10 при действии кратковременной нагрузки

Марка образца	Диаметр шайбы $D_{ш}$, мм	Толщина шайбы $t_{ш}$, мм	Средняя разрушающая нагрузка $P_{разр}$, кН
ВШ-60-6-МН-1	60	6	45,94
ВШ-60-6-МН-2			
ВШ-60-6-МН-3			
ВШ-60-6-МН-4			
ВШ-60-6-МН-5			
ВШ-60-10-РМ-1		10	66,47
ВШ-60-10-РМ-2			
ВШ-60-10-РМ-3			
ВШ-60-10-РМ-4			
ВШ-60-10-РМ-5			
ВШ-60-10-1		10	72,50
ВШ-60-10-2			

По данным табл. 3 можно сделать вывод, что при увеличении толщины шайбы $t_{ш}$ от 6 до 10 мм возрастает разрушающая нагрузка образцов. С увеличением толщины шайба воспринимает большие усилия, передаваемые с центрального болта, и увеличивается несущая способность соединения деревянных конструкций.

Выводы

1. Выполнены испытания образцов на клеенных стеклопластиковых шайбах при действии кратковременной нагрузки.
2. Установлено, что критерием разрушения соединений является разрушение стеклопластиковой шайбы.
3. Установлено, что при увеличении толщины клеенных стеклопластиковых шайб возрастает несущая способность соединений деревянных конструкций.

Список литературы

1. Руднев, И.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2014. – №4. – С. 5–12.
2. Лисицкий, И.И. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – №4. – С. 9–15.
3. Вдовин, В.М. Клеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, М.С. Галахов. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 171 с.
4. Вдовин, В.М. Клеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Аriskин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
5. Ишмаева, Д.Д. Жесткие узлы клеенных деревянных балочных элементов на клеенных стальных шайбах / Д.Д. Ишмаева, В.М. Вдовин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – №1. – С. 189–195.

6. 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.

7. Арискин, М.В. Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2(51). – С. 96–103.

References

1. Rudnev, I.V. Connections of wooden constructions elements with the use of the pasted steel plates / I.V. Rudnev, V.I. Zhadanov, S.V. Lisov // News of higher educational institutions. Construction. – Novosibirsk, 2014. – No4. – P. 5–12.

2. Lisitsky, I.I. Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods / I.I. Lisitsky, V.I. Zhadanov // Industrial and civil engineering. – 2020. – No4. – P. 9–15.

3. Vdovin, V.M. Ring dowel glued in timber structures joints / V.M. Vdovin, V.N. Karpov, M.S. Halachov. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2011. – 171 p.

4. 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.

5. Ishmaeva, D.D. Rigid connections of glued wooden beam elements on glued steel washers / D.D. Ishmaeva, V.M. Vdovin // Bulletin of Orenburg State University. – 2014. – No1. – P. 189–195.

6. Vdovin, V.M. Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures / V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and construction. – 2019. – No4(41). – P. 103–108.

7. Ariskin, M.V. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and construction. – 2022. – No2(51). – P. 96–103.

УДК 624.156

DOI 10.54734/20722958_2023_1_115

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Кочеткова Майя Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством и
технология строительного производства»
E- mail: M.V.Kochetkova@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

Kochetkova Maya Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Quality Management and
Technology of Building Production»
E- mail: M.V.Kochetkova@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОСТВЕРКОВ ПОД КОЛОННУ НА ОСНОВЕ КАРКАСНО-СТЕРЖНЕВОЙ МОДЕЛИ

М.В. Кочеткова

Приведены результаты сравнения приближенных нормативных методов расчёта с новым методом, основанным на применении каркасно-стержневых моделей. Предлагаемый метод расчета базируется на анализе напряжённо-деформированного состояния ростверков под колонну, позволяет совершенствовать методы расчёта и конструирования ростверков, эффективно использовать бетон и арматуру.

Ключевые слова: каркасно-стержневые модели, ростверки под колонну, напряжённо-деформированное состояние, оценка прочности

EFFICIENCY OF DESIGNING GRILLINGS FOR A COLUMN BASED ON A FRAME-ROD MODEL

M.V. Kochetkova

The comparison of approximate normative calculation methods with a new method based on the use of frame-rod models is given. The proposed calculation method is based on the analysis of the stress-strain state of the grillings under the column, it allows improving the methods of calculation and construction of grillings, effectively using concrete and reinforcement.

Keywords: frame-core model, grillage under the column, stress-strain state, assessment of strength

Ростверк является важной частью свайного фундамента. Ранее был проведён анализ нормативных методов расчёта, основанных на балочных аналогиях. Выявлено, что они не учитывают изменение многочисленных факторов: пролёт среза, характер приложения нагрузки, схему расположения свай, расположение и количество арматуры и др. [1].

Были проведены исследования ростверков под колонну при многорядном расположении свай, которые опираются на скальный грунт: физический эксперимент с применением силовых установок для разрушения образцов и численный эксперимент с применением метода конечных элементов – программы «Лира» [2].

Получена информация о напряженно-деформированном состоянии ростверков путём проведения физических экспериментов. Исследуемые конструкции проектировались с различным количеством опор, процентом армирования, с армированием сеткой или с концентрацией стержней над опорами. Проанализированы характер образования трещин в ростверках, показания тензодатчиков, расположенных на бетоне и арматуре исследуемых конструкций, и показания индикаторов часового типа и тензодатчиков, измеряющих деформации сжатия над опорами-сваями. Выявлено неравномерное распределение нагрузки между опорами [3, 4].

В ростверках выделено три вида трещин: вертикальные трещины в бетоне растянутой зоны, наклонные трещины по границам сжатых зон и трещины, расположенные в пределах наклонных сжатых полосах бетона, характеризующие их разрушение. Граничные трещины криволинейного очертания выделяют участки ростверка над сваями, близко расположенными к колонне, то есть над наиболее нагруженными сваями. Они подчеркивают пространственный характер работы ростверков [5]. Разрушающая сила в ростверках изменяется не пропорционально количеству свай и зависит от схемы расположения свай. Наиболее эффективными являются схемы, в которых горизонтальные оси колонны совпадают с поперечными либо продольными осями свай. В зависимости от процента армирования получены три схемы разрушения ростверков – по сжатой зоне бетона, по растянутому арматурному поясу, совместное разрушение по бетону и арматуре. Увеличение процента продольного армирования повышает разрушающую силу. Увеличение количества опор с двух до четырёх и с шести до восьми не повышает прочности ростверка. Причина заключается в снижении эффективности схемы расположения свай [6].

На основе численного эксперимента получена более полная информация о качественной картине напряженно-деформированного состояния ростверков. По характеру распределения вертикальных напряжений σ_z можно судить о степени участия свай в работе фундамента. Выявлено, что она резко неравномерна, что наиболее нагруженными являются участки фундамента над сваями, близко расположенными к колонне. Растягивающие напряжения имеют наибольшие значения в нижнем слое в центральной части ростверка [7].

Анализ напряженно-деформированного состояния на основе численного и физического экспериментов показал, что основную роль в работе свайных ростверков под колонну играют главные сжимающие и растягивающие напряжения, которые концентрируются в наклонных сжатых бетонных полосах, расположенных над опорами-сваями и в горизонтальных растянутых арматурных поясах. Сжатые и растянутые зоны, образованные концентрацией главных напряжений, можно имитировать стержневыми элементами.

В работе [8] показана возможность применения пространственных каркасно-стержневых моделей для расчёта прочности ростверков под колонны, которые хорошо описывают физическую работу ростверков. Предлагается два варианта построения пространственных каркасно-стержневых моделей ПКСМ-А и ПКСМ-Ф [9]. Модель ПКСМ-А хорошо описывает физическую работу ростверков с количеством опор до шести. Модель ПКСМ-Ф лучше учитывает работу ростверков под колонну при увеличении количества свай.

Разработаны расчетные условия для определения прочности наклонных сжатых полос бетона и растянутых арматурных поясов ростверка; они базируются на схемах предельных усилий в расчётных сечениях [10]. Расчетное сечение сжатой полосы принимается в средней части этой полосы в связи с тем, что влияние местных напряжений на сопротивление бетона сжатию в этом сечении является наименьшим. Предельным состоянием сжатой полосы является достижение главными сжимающими напряжениями предела прочности на сжатие $\gamma_b R_b$. Предельным состоянием растянутого пояса является достижение главными растягивающими напряжениями в арматуре предельных значений $\gamma_s R_s$ (γ_b и γ_s – корректирующие коэффициенты, определяемые на основе обратного метода моделирования).

Предлагаемые модели и расчетные зависимости хорошо описывают закономерности изменения опытной разрушающей силы при изменении исследуемых факторов: количество и схема расположения свай, схема нагружения, количество продольной арматуры и схема её расположения, неравномерная осадка свай-опор.

На графике (рис.1) представлены расчетные и опытные величины разрушающей нагрузки для всех изученных видов перемещений и выключения свай из работы ростверка. На его основе можно судить о снижении прочности ростверков в зависимости от количества опор, изменении схем разрушения, а также о величине остаточной прочности ростверков в опасных случаях совместной работы ростверка и основания.

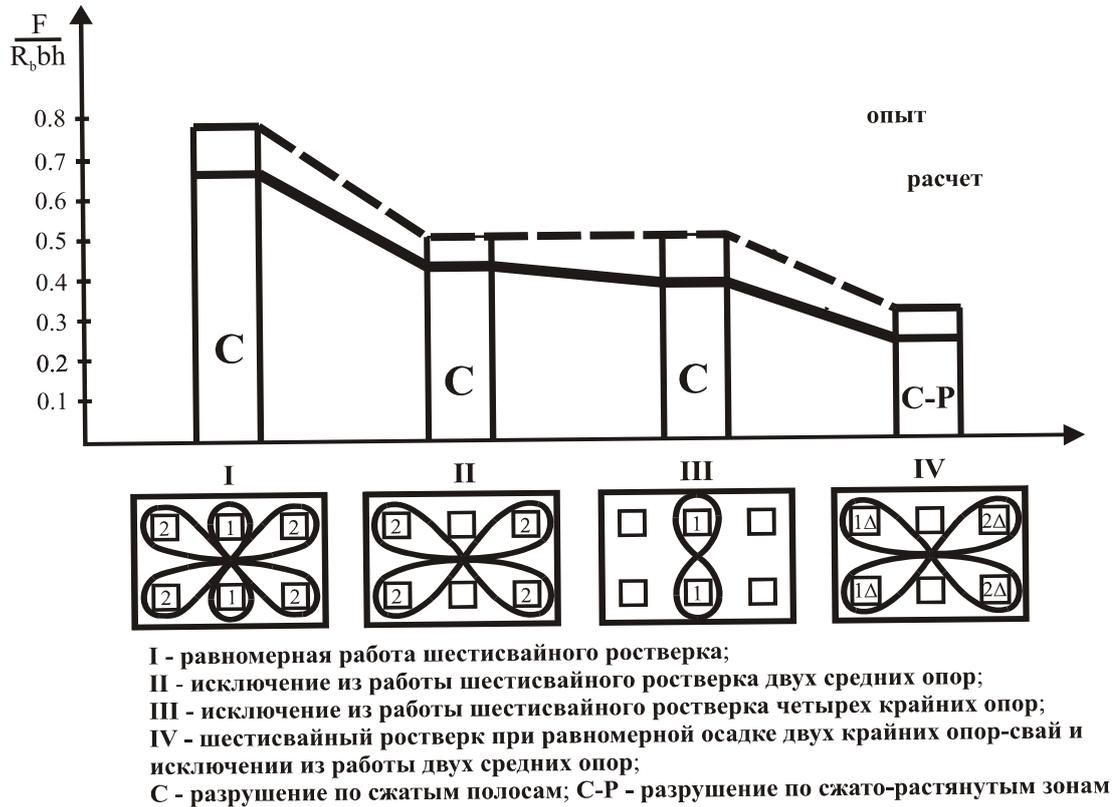


Рис. 1. Сопоставление расчетных и опытных усилий при работе ростверков по схемам I, II, III, IV

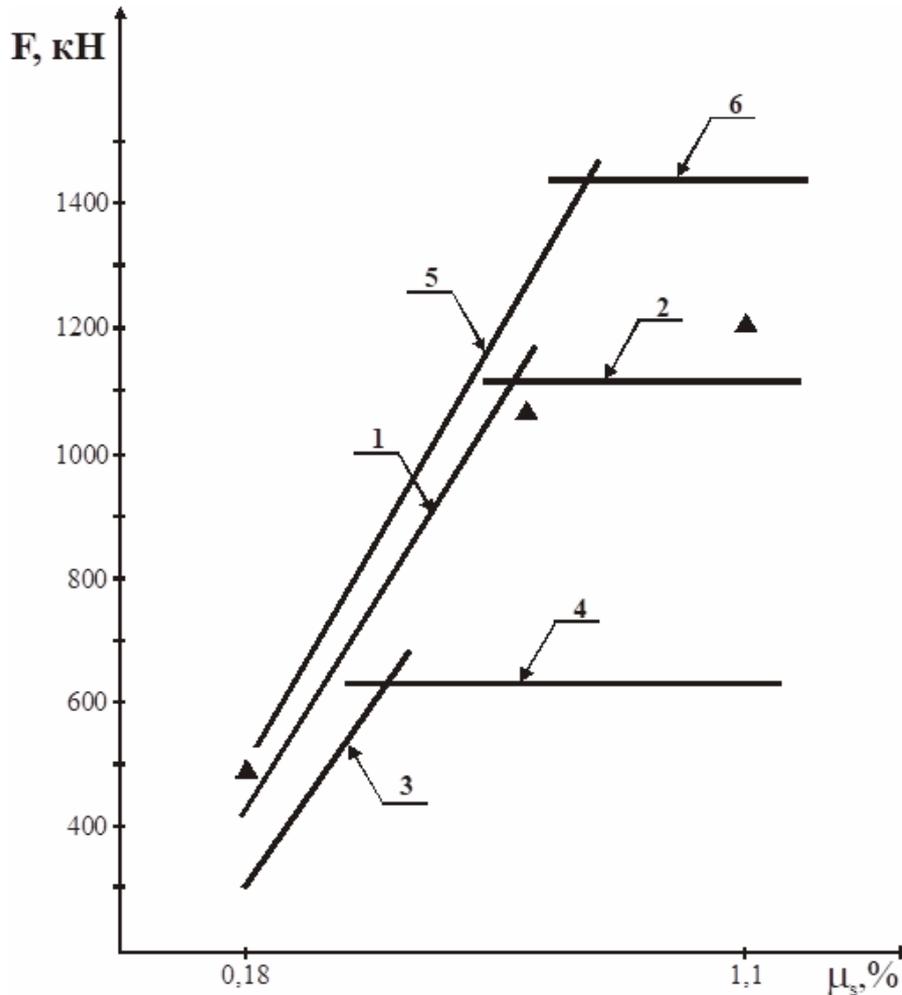
Расчетные зависимости предлагаемого метода расчета хорошо описывают закономерность изменения разрушающих усилий образования трещин при изменении основных факторов.

Метод расчета, базирующийся на пространственных каркасно-стержневых моделях, позволяет получить расчетные величины, которые хорошо согласуются с опытными данными (см. таблицу).

№	Марка образца	Бетон		Арматура класс	$F_{\text{СНиП}}, \text{Т}$			$F_{\text{ПКСМ}}, \text{Т}$		Сопоставление результатов и опыта			
		$R_b, \text{кгс/см}^2$	$R_{br}, \text{кгс/см}^2$		F_{test} T	F по прод. кол.	F по Q	F на изгиб. момент	$F_{\text{ПКСМ-А}}$	$F_{\text{ПКСМ-Ф}}$	F_{tes} $F_{\text{СНиП}}$	F_{test} $F_{\text{ПКСМ-А}}$	F_{test} $F_{\text{ПКСМ-Ф}}$
1	РК-1	108.2	8.77	А-3	120.6	60	61	115	98	102.8	2	1.23	1.17
2	РК-1В	124.2	9.58	А-3	104	54.8	54.4	86	93.4	90.2	1.91	1.11	1.15
3	РК-2	124.2	9.58	Вр-1	48	65.5	66.8	30	40	38	1.6	1.2	1.26
4	РК-5	124.2	9.58	Вр-1	51	65.5	66.8	30	46	45.6	1.7	1.1	1.12
5	РК-3	124.2	9.58	А-3	125	65.3	94.8	172	106	115	1.9	1.18	1.08
6	РК-6	104	8.46	Вр-1	40	-	-	-	33.6	30	1.11	1.2	1.33
7	РК-4	104	8.46	Вр-1	37	-	-	-	29	-	-	1.27	-
8	РК-7	104	8.46	А-3	71	-	74.6	-	70.3	-	0.95	1.01	-

В результате использования обратного метода моделирования и разработанных корректирующих коэффициентов соотношение опытных и расчетных разрушающих усилий изменяется в пределах 15 %.

Можно сопоставить предлагаемые методы расчета с приближенными методами, используемыми при проектировании ростверков в настоящее время. На рис. 2 приведены графики расчетных зависимостей указанных методов расчета.



- ▲ – опыт
 - 1 – расчет по растянутой зоне;
 - 2 – расчет по сжатым бетонным полосам;
 - 3 – расчет на изгибающий момент;
 - 4 – расчет на продавливание колонной;
 - 5 – расчет по растянутой зоне;
 - 6 – расчет по сжатым бетонным полосам
- } по ПКСМ-Ф
- } по СП 63.13330
(СНиП 2.03.01 – 84)
- } по ПКСМ-А

Рис. 2. Сопоставление опытных и расчетных разрушающих усилий в восьмисвайном ростверке при изменении процента армирования

Выводы

Предлагаемые модели и расчетные зависимости хорошо описывают закономерности изменения опытной разрушающей силы при изменении исследуемых факторов, обеспечивают безопасность при эксплуатации (среднее отклонение $F_{test}/F_{calc} = 1,15$), позволяют рационально использовать арматуру.

Предлагаемый метод расчета создает условия для экономии бетона и арматуры за счет повышения разрушающих усилий в среднем в два раза по сравнению с приближенными нормативными методами.

Список литературы

1. Кочеткова, М.В. Методы расчёта ростверков под колонны / М.В. Кочеткова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2016. – №5. – С.218–223.
2. Кочеткова, М.В. Экспериментальная оценка работы ростверков / М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев, О.В. Снежкина, К.С. Паршина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1. – С. 77–81.
3. Кочеткова, М.В. Особенности распределения напряжений и деформаций в многорядных свайных ростверках под колонны / М.В. Кочеткова, О.А. Гончаренко // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2(19). – С.137–143.
4. Кочеткова, М.В. Измерение вертикальных смещений свай для выявления напряжённо-деформированного состояния опорных участков / М.В. Кочеткова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – № 2 (9). – С. 155–160.
5. Кочеткова, М.В. Трещинообразование и схемы разрушения ростверков под колонну с многорядным расположением свай / М.В. Кочеткова // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 112–118.
6. Кочеткова, М.В. Закономерности изменения разрушающей силы ростверков под колонну в зависимости от схемы расположения свай / М.В. Кочеткова // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3 (44). – С. 91–95.
7. Кочеткова, М.В. Работа ростверков под колонны при многорядном расположении свай / М.В. Кочеткова, Н.И. Гусев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2(19). – С.144–151.
8. Кочеткова, М.В. Разработка методов расчёта ростверков под колонну на основе стержневых моделей // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2016 – № 6. – С.162–167.
9. Кочеткова, М.В. Расчётные модели ростверков под колонны / М.В. Кочеткова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 1 (30). – С. 106–112.
10. Кочеткова, М.В. Расчёт прочности ростверка под колонну по каркасно-стержневым моделям / М.В. Кочеткова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 1 (36). – С. 116–121.

References

1. Kochetkova, M.V. Methods of calculating grillings for columns / M.V. Kochetkova // Education and science in the modern world. Innovation. – 2016. – №5. – P.218–223.
2. Kochetkova, M.V. Experimental evaluation of the work of rostverkov / M.V. Kochetkova, N.I. Gusev, O.V. Snezhkina, K.S. Parshina // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 1. – P. 77–81.
3. Kochetkova, M.V. Features of stress and strain distribution in multi-row pile grillings under columns / M.V. Kochetkova, O.A. Goncharenko // Regional architecture and engineering. – 2014. – №2(19). – P.137–143.
4. Kochetkova, M.V. Measurement of vertical displacements of piles to identify the stress-strain state of the support sections / M.V. Kochetkova // Education and science in the modern world. Innovation. – 2017. – № 2 (9). – P. 155–160.

5. Kochetkova, M.V. Cracking and destruction schemes of grillings under a column with a multi-row arrangement of piles / M.V. Kochetkova // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 1 (38). – P. 112–118.
6. Kochetkova, M.V. Regularities of changes in the destructive force of the grillings under the column depending on the arrangement of piles / M.V. Kochetkova // Regional architecture and engineering. – 2020. – № 3 (44). – P. 91–95.
7. Kochetkova, M.V. The work of grillings under columns with a multi-row arrangement of piles / M.V. Kochetkova, N.I. Gusev // Regional architecture and engineering. – 2014. – №2(19). – P.144–151.
8. Kochetkova, M.V. Development of methods for calculating grillings for a column based on rod models //Education and science in the modern world. Innovation. – 2016. – No. 6. – P.162–167.
9. Kochetkova, M.V. Calculation models of grillings for columns / M.V. Kochetkova // Regional architecture and engineering. – 2017. –№ 1 (30). – P. 106–112.
10. Kochetkova, M.V. Calculation of the strength of the grillage under the column by frame-rod models / M.V. Kochetkova // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 1 (36). – P. 116-121.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.33

DOI 10.54734/20722958_2023_1_121

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

Салмин Сергей Михайлович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: sam14-08@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

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

Salmin Sergey Mikhailovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Water Supply, Sewerage and
Hydraulic Engineering»
E-mail: sam14-08@mail.ru

ОЦЕНКА ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ АКТИВНОГО ИЛА, ОБРАБОТАННОГО В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, С.М. Салмин

Исследована окислительная способность предварительно обработанного в электрическом поле возвратного активного ила, применяемого для биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в опытной модельной аэротенке. В качестве электролизера для обработки смеси воздуха и возвратного активного ила была использована модель электрогидродинамического устройства (ЭГДУ) с центральным стержнем. Обработка иловоздушной смеси в ЭГДУ осуществлялась при следующих параметрах: напряжение постоянного тока на электродах U – от 6 до 24 В, критерий Кэмпса Gt при перемешивании потока в стволе ЭГДУ – от $2,1 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$. Экспериментально установлено, что эффективность биологической очистки стоков по показателю химического потребления кислорода в опытной аэротенке повышается с 63,7 до 88,4 % при увеличении значений параметров постоянного тока и критерия Кэмпса в указанных диапазонах. Определены рациональные режимы обработки потока возвратного активного ила с воздухом в ЭГДУ ($U=12$ В, $Gt=3,7 \cdot 10^3$ – $5,0 \cdot 10^3$), установлена связь между интенсивностью обработки иловоздушной смеси в ЭГДУ и величиной дзета-потенциала активного ила на выходе из опытной аэротенки.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, аэротенк, активный ил, химическое потребление кислорода, электрогидродинамическое устройство, дзета-потенциал

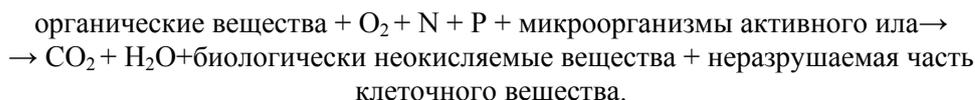
ASSESSMENT OF THE OXIDATIVE CAPACITY OF ACTIVATED SLUDGE TREATED IN AN ELECTRIC FIELD

B.M. Grishin, M.V. Bikunova, S.M. Salmin

The oxidizing capacity of return activated sludge pretreated in an electric field used for biological treatment of domestic wastewater in an experimental model aerotank has been studied. As an electrolyzer for processing a mixture of air and return activated sludge, a model of an electrohydrodynamic device (EHDD) with a central rod has been used. The treatment of the sludge-air mixture in the EHDD has been carried out with the following parameters: DC voltage on the electrodes U from 6 to 24 V, Camp's criterion Gt with flow mixing in the EHDD shaft – from $2,1 \cdot 10^3$ to $5,0 \cdot 10^3$. It has been experimentally established that the efficiency of biological wastewater treatment in terms of chemical oxygen demand in the experimental aerotank increases from 63,7 % to 88,4 % with an rise in the values of the direct current parameters and the Camp criterion in the indicated ranges. The most rational modes of processing for the flow of return activated sludge with air in the EHDD ($U=12$ V, $Gt=3,7 \cdot 10^3$ - $5,0 \cdot 10^3$) were determined, the relationship between the intensity of processing of the sludge-air mixture in the EHDD and the value of the activated sludge zeta potential has been established at the exit from the experimental aerotank.

Keywords: waste water, biological treatment, aerotank, activated sludge, chemical oxygen demand, electrohydrodynamic device, zeta potential

Одним из наиболее распространённых методов биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод является биохимическое окисление примесей в аэротенках с применением активного ила. По С.В. Яковлеву, механизм биохимического окисления органических примесей в аэробных условиях активным илом может быть представлен следующей схемой:



В клетках микроорганизмов активного ила при биологической очистке сточных вод одновременно происходит множество процессов, начиная с массопередачи органического вещества и кислорода с поверхности хлопка активного ила к поверхности клетки и заканчивая метаболизмом диффундирующих в клетку веществ с выделением энергии и синтезом новой бактериальной массы [1, 2].

Одним из важнейших показателей качества активного ила является его электрокинетический потенциал (или дзета-потенциал). Известно, что интенсивность диффузии микроорганизмов активного ила зависит в первую очередь от величины дзета-потенциала. Таким образом, за счёт изменения величины электрокинетического потенциала микроорганизмов активного ила возможно ускорение процессов биохимического окисления органических примесей очищаемых сточных вод.

Наиболее простым методом изменения дзета-потенциала активного ила является обработка иловой смеси постоянным электрическим током. До настоящего времени не имелось данных о влиянии интенсивности электрообработки на электрокинетический потенциал активного ила.

Целью данной работы являлась оценка влияния постоянного электрического тока на окислительную способность активного ила, а также установление характера связи между интенсивностью электрообработки насыщенного воздухом возвратного активного ила и дзета-потенциалом активного ила в аэротенке при различных условиях перемешивания иловоздушной смеси в электрическом поле.

Экспериментальные исследования осуществлялись на опытной установке (рис. 1), в состав которой входили модели опытного и контрольного аэротенков, баки обрабатываемой хозяйственно-бытовой сточной воды и возвратного ила, взятого после вторичных отстойников, модель электрогидродинамического устройства для обработки иловоздушной смеси, насосы и компрессоры. В экспериментах использовался как регенерированный, так и нерегенерированный возвратный активный ил.

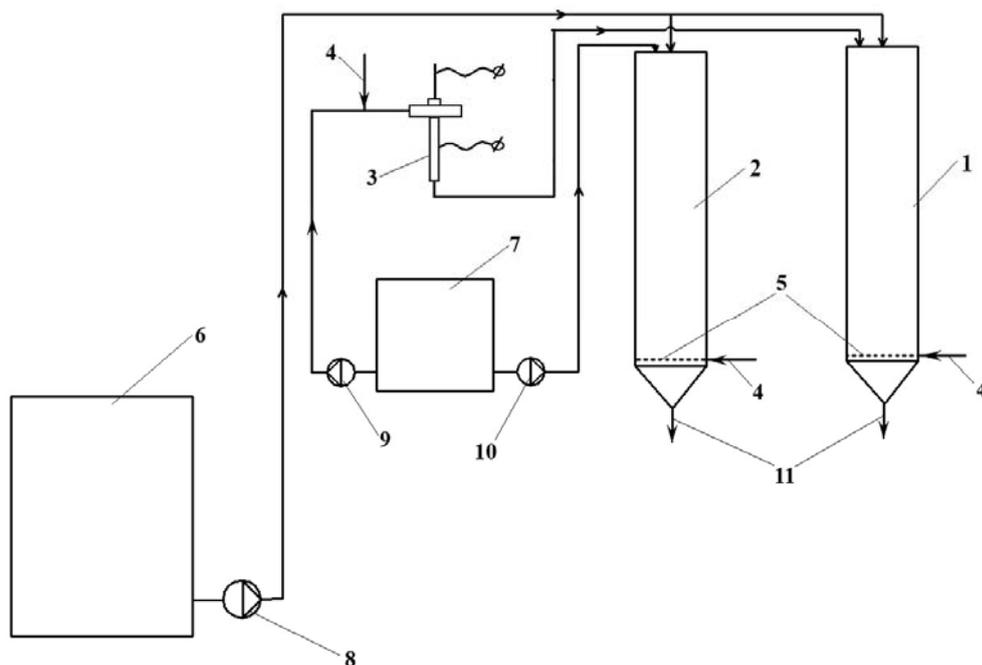


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

- 1, 2 – опытный и контрольный аэротенки; 3 – электрогидродинамическое устройство;
 4 – подача сжатого воздуха; 5 – мелкопузырчатые аэраторы; 6 – бак хозяйственно-бытовой
 сточной воды; 7 – бак возвратного ила; 8, 9, 10 – насосы;
 11 – сброс смеси сточных вод и активного ила

При проведении экспериментов в контрольный аэротенк 2 подавалась смесь хозяйственно-бытовых сточных вод из бака 6 и возвратного активного ила из бака 7, а в опытный аэротенк 1 – смесь сточных вод и предварительно обработанного постоянным током в ЭГДУ 3 насыщенного воздухом возвратного активного ила. Конструкция ЭГДУ была аналогична конструкциям устройств, представленных в работах [3, 4]. Корпус ЭГДУ, использованного в экспериментах, имел камеру входа диаметром 70 мм и ствол диаметром 20 мм. На крышке входной камеры устанавливался диэлектрический патрубок с центральным стержневым электродом диаметром 2 мм и длиной 30 мм. Ствол ЭГДУ состоял из нескольких участков, соединённых между собой муфтами для обеспечения возможности изменения длины ствола от 0,4 до 0,8 м. Центральный электрод и корпус ЭГДУ были выполнены из нержавеющей стали. Коэффициент воздухомыщения ϕ потока иловоздушной смеси в корпусе ЭГДУ находился в пределах 10-12 %. Интенсивность перемешивания потока активного ила с воздухом в корпусе ЭГДУ оценивалась по критерию (числу) Кэмпса Gt . В процессе экспериментов величина критерия Кэмпса изменялась от $2,1 \cdot 10^3$ до $5,1 \cdot 10^3$.

Центральный электрод ЭГДУ в процессе проведения экспериментов поочередно присоединялся к положительному и отрицательному полюсам источника постоянного тока, при этом величина электропотенциала (напряжения) U изменялась в пределах от 6 до 24 В. Сила тока I варьировалась в пределах от 1,2 до 5,8 мА, а удельное количество электричества $A_{уд}$ – от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³. Доза ила в опытном и контрольном аэротенках поддерживалась в пределах 2,1-2,4 г/л, интенсивность аэрации смеси активного ила и сточных вод составляла 6–6,5 м³/(м²·ч), продолжительность очистки в аэротенках была равна 5 часам. Отбор проб смеси сточной воды и активного ила из аэротенков осуществлялся через 1,5, 3 и 5 часов после начала процесса биохимической очистки.

Для оценки окислительной способности активного ила, обработанного совместно с воздухом в ЭГДУ, определялся показатель химического потребления кислорода (ХПК) для исходного стока, а также для очищенного стока, полученного после биологической очистки в аэротенках и последующего отстаивания в лабораторных цилиндрах.

Значение ХПК исходных стоков находилось в пределах 155-160 мг/л. Графики изменения ХПК осветлённых сточных вод в процессе биологической очистки в опытном и контрольном аэротенках приведены на рис. 2–5.

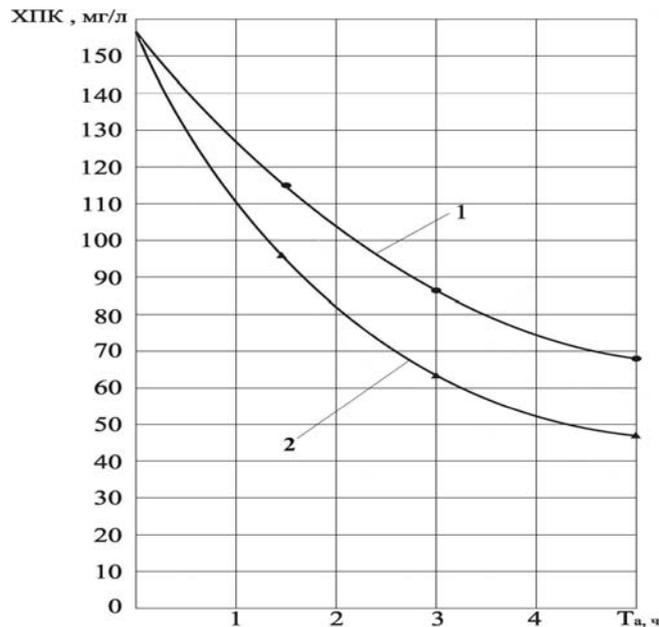


Рис. 2. Графики изменения ХПК сточных вод в процессе биологической очистки в контрольном аэротенке:

1 – без регенерации ила; 2 – с регенерацией ила

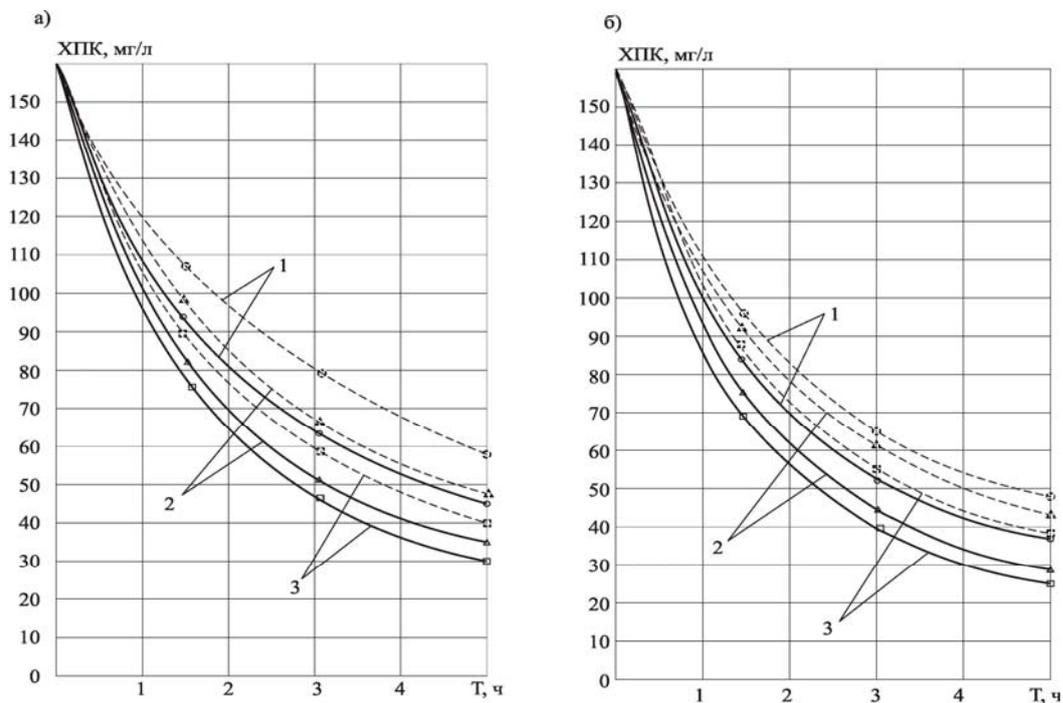


Рис. 3. Графики изменения ХПК сточных вод в процессе биологической очистки в опытном аэротенке при электрообработке иловоздушной смеси в ЭГДУ с центральным электродом при $U=6В$, $A_{уд}=0,5 \cdot 10^{-3} А \cdot ч/м^3$:

а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;

1 – при $Gt=2,1 \cdot 10^3$; 2 – при $Gt=3,7 \cdot 10^3$; 3 – при $Gt=5,0 \cdot 10^3$;

————— – отрицательная поляризация электрода;

----- – положительная поляризация электрода

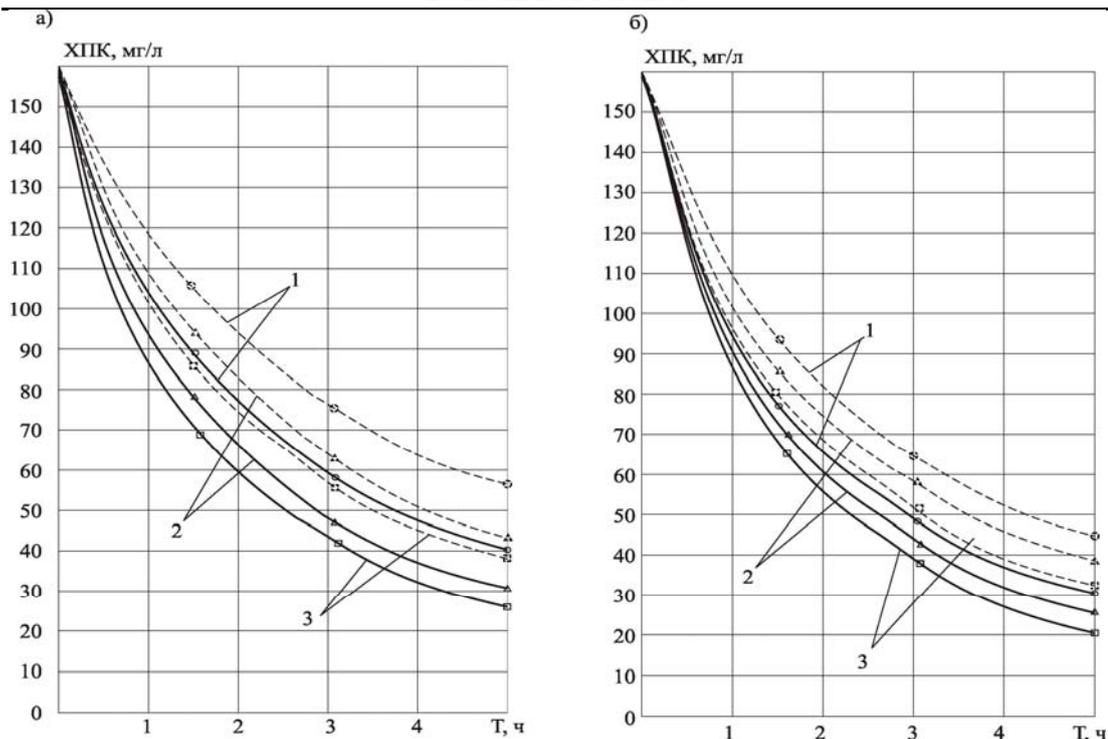


Рис. 4. Графики изменения ХПК сточных вод в процессе биологической очистки в опытном аэротенке при электрообработке иловоздушной смеси в ЭГДУ с центральным электродом при $U=12\text{В}$, $A_{уд}=1,2\cdot 10^{-3}\text{ А}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$:
 а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;
 1 – при $Gt=2,1 \cdot 10^3$; 2 – при $Gt=3,7 \cdot 10^3$; 3 – при $Gt=5,0 \cdot 10^3$;
 ————— – отрицательная поляризация электрода;
 - - - - - – положительная поляризация электрода

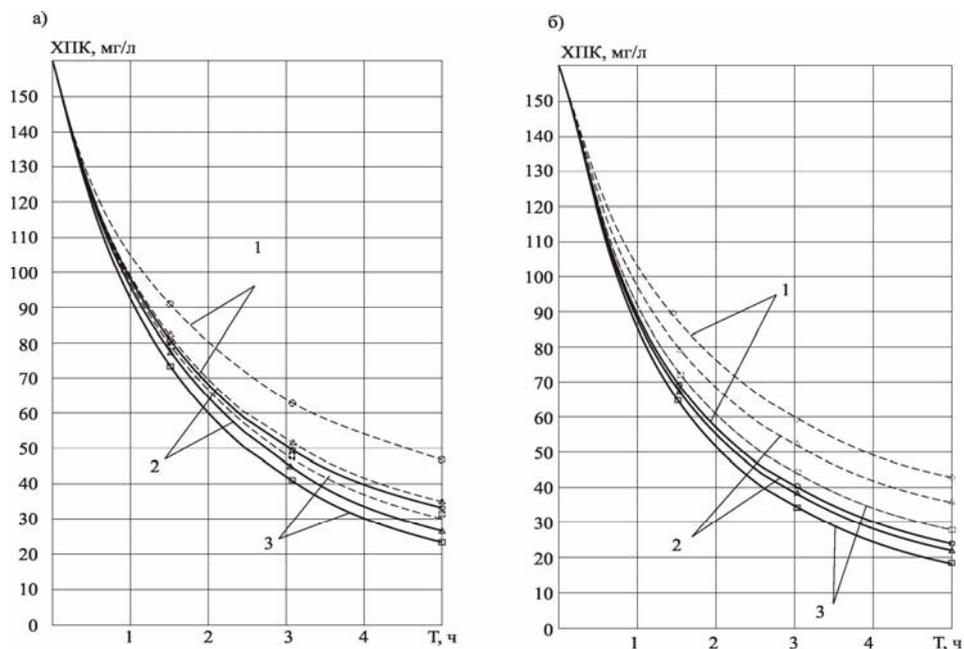


Рис. 5. Графики изменения ХПК сточных вод в процессе биологической очистки в опытном аэротенке при электрообработке иловоздушной смеси в ЭГДУ с центральным электродом при $U=24\text{В}$, $A_{уд}=2,5\cdot 10^{-3}\text{ А}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$:
 а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;
 1 – при $Gt=2,1 \cdot 10^3$; 2 – при $Gt=3,7 \cdot 10^3$; 3 – при $Gt=5,0 \cdot 10^3$;
 ————— – отрицательная поляризация электрода;
 - - - - - – положительная поляризация электрода

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что предварительная обработка возвратного активного ила совместно с воздухом в ЭГДУ во всех случаях позволяла достичь более высокого эффекта биологической очистки сточных вод по сравнению с применением необработанного активного ила. Остаточное значение ХПК в контрольном аэротенке при использовании активного ила без регенерации составляло 68 мг/л (см. рис. 2) с соответствующим эффектом очистки 56,1 %, а при использовании регенерированного ила – 47 мг/л (эффект очистки 69,7 %).

Эффективность снижения ХПК в опытном аэротенке зависела от интенсивности перемешивания иловоздушной смеси в стволе ЭГДУ, а также от величины напряжения и знака поляризации центрального электрода в стволе ЭГДУ. При обработке иловоздушной смеси в ЭГДУ с катодной поляризацией стержня и электропотенциале $U=6$ В (при удельном количестве электричества $A_{уд}$ от $0,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³) содержание ХПК в очищенном стоке наиболее значительно снижалось для регенерированного ила (рис. 3). Остаточные значения ХПК в очищенном стоке для регенерированного ила были равны 37,5 мг/л при $Gt=2,1 \cdot 10^3$ (эффект очистки 76,6 %) и 25 мг/л при $Gt=5,0 \cdot 10^3$ (эффект очистки 84,3 %).

Обработка иловоздушной смеси в ЭГДУ с увеличением значений электропотенциала до $U=12$ В и удельного расхода электричества до $A_{уд}=1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ позволила получить лучший эффект очистки сточных вод по показателю ХПК. Так же, как и в первой серии экспериментов, при катодной поляризации центрального стержня ЭГДУ были достигнуты лучшие показатели последующей биологической очистки по сравнению с применением анодной поляризации стержня (см. рис. 4). Для нерегенерированного возвратного ила в интервале от $Gt = 2,1 \cdot 10^3$ до $Gt = 5,0 \cdot 10^3$ эффект снятия ХПК варьировался от 74,7 до 84,4 % при остаточных значениях этого показателя 40,5 и 25 мг/л (см. рис. 4, а). В экспериментах с регенерированным возвратным активным илом для данного интервала значений Gt и отрицательной поляризации центрального стержня ЭГДУ остаточные концентрации ХПК в очищенных стоках после опытного аэротенка находились в пределах от 30 до 20,5 мг/л (эффект очистки от 81,2 до 87,2 %) (см. рис. 4, б).

Увеличение напряжения до 24 В при обработке возвратного активного ила в ЭГДУ не привело к значимому улучшению качества очистки сточной воды по показателю ХПК в сравнении с обработкой возвратного ила при напряжении 12 В. Наиболее значительное снижение ХПК после биологической очистки стоков в опытном аэротенке, как и в предыдущих сериях экспериментов, наблюдалось при отрицательной поляризации центрального стержня ЭГДУ и критерии Кэмпа от $3,7 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$. Остаточные концентрации ХПК в осветленном стоке для данных параметров обработки составили 23 мг/л при использовании нерегенерированного ила (эффект очистки 85,6 %) и 18,5 мг/л при использовании регенерированного ила (эффект очистки 88,4 %) (см. рис. 5).

Дзета-потенциал активного ила после 5-часовой очистки сточной воды в опытном и контрольном аэротенках определялся методом электрофореза. Экспериментальные значения этого показателя на выходе из опытного аэротенка приведены в таблице.

Значения дзета-потенциала активного ила на выходе из опытного аэротенка

Величины напряжения и знаки поляризации центрального электрода ЭГДУ	Активный ил без регенерации			Активный ил с регенерацией			
	Критерий Кэмпа, $Gt \cdot 10^3$						
	2,1	3,7	5,0	2,1	3,7	5,0	
$U=6$ В	+	-2,9	-3,5	-3,8	-3,0	-3,9	-4,2
	-	-3,2	-3,8	-4,1	-3,3	-4,2	-4,5
$U=12$ В	+	-3,3	-4,0	-4,3	-3,6	-4,3	-4,6
	-	-3,8	-4,5	-4,8	-3,9	-4,7	-5,0
$U=24$ В	+	-3,8	-4,3	-4,6	-3,9	-4,5	-4,8
	-	-4,0	-4,7	-5,0	-4,1	-4,9	-5,2

Величина дзета-потенциала активного ила на выходе из контрольного аэротенка в среднем составляла $-2,2$ мВ при использовании для биологической очистки стоков регенерированного возвратного ила и $-2,7$ мВ при использовании ила после регенерации.

Из таблицы видно, что абсолютные значения отрицательного электрокинетического потенциала активного ила в опытном аэротенке увеличиваются при повышении величины напряжения постоянного тока на центральном электроде ЭГДУ и интенсивности перемешивания возвратного ила с воздухом в стволе ЭГДУ. Наибольшее приращение значений дзета-потенциала активного ила наблюдалось при увеличении напряжения с 6 до 12 В в экспериментах с отрицательной (катодной) поляризацией центрального электрода ЭГДУ и удельных затратах электричества до $1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³. При увеличении напряжения от 12 до 24 В величины дзета-потенциала активного ила изменялись незначительно для одинаковых чисел Кэмпса. Следует также отметить, что электрообработка возвратного ила существенно уменьшает разницу значений дзета-потенциала регенерированного и нерегенерированного активного ила модельных аэротенков с 0,5 мВ (в контрольном аэротенке) до 0,2 мВ (в опытном аэротенке), что позволяет рассмотреть возможность использования обработанного в ЭГДУ возвратного ила без прохождения стадии регенерации в промышленных условиях.

ВЫВОДЫ

1. С увеличением напряжения постоянного тока на центральном электроде электрогидродинамического устройства с 6 до 24 В и интенсивности смешения потока возвратного активного ила с воздухом при числах Кэмпса с $2,1 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$ эффективность биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в аэротенке по показателю ХПК непрерывно повышается с 63,7 до 88,4 %.

2. Наиболее значимое повышение эффективности снижения ХПК в очищенных сточных водах имеет место при увеличении напряжения постоянного тока, подаваемого на ЭГДУ, с 6 до 12 В, катодной поляризации центрального стержня и удельных затратах электричества $1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ с одновременной обработкой иловоздушной смеси в стволе ЭГДУ при числах Кэмпса от $3,7 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$. В этом же диапазоне напряжений постоянного тока наблюдается наибольшее увеличение значений дзета-потенциала активного ила в опытном аэротенке (с $-4,5$ до $-5,0$ мВ). Увеличение напряжения до 24 В и удельных затрат электричества до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ при обработке возвратного ила в ЭГДУ не приводит к существенному улучшению эффекта снятия ХПК и повышению абсолютных значений отрицательного электрокинетического потенциала активного ила аэротенков.

3. Регенерация возвратного активного ила перед его обработкой в ЭГДУ не позволяет достичь значительного улучшения последующей биологической очистки сточных вод по показателю ХПК; поэтому решения о возможности использования регенераторов аэротенков в качестве дополнительных рабочих коридоров для биохимического окисления примесей сточных вод должны приниматься исходя из конкретных условий работы канализационных очистных сооружений.

Список литературы

1. Шамсутдинова, З.Р. Анализ эффективности аэротенков в системе очистки сточных вод / З.Р. Шамсутдинова, Н.И. Хафизов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – №4. – С. 245–249.
2. Кадырова, А.М. Биохимические основы методов биологической очистки сточных вод / А.М. Кадырова // Научный вестник Технологического института. – 2014. – №13. – С. 315–326.
3. Гришин, Б.М. Биологическая очистка хозяйственно-бытовых сточных вод с использованием вихревых смесительных устройств / Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, В.Г. Камбург, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3 (28). – С. 143–148.

4. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации работы городских канализационных очистных сооружений с применением вихревых гидродинамических устройств / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, Н.Г. Вилкова, А.Н. Кошев, Н.Н. Ласьков // Водочистка. – 2012. – №6. – С. 46–56.

References

1. Shamsutdinova, Z.R. Analysis of the effectiveness of aerotanks in the wastewater treatment system / Z.R. Shamsutdinova, N.I. Khafizov // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2016. – No. 4. – P. 245–249.

2. Kadyrova, A.M. Biochemical foundations for methods of biological wastewater treatment / A.M. Kadyrova // Scientific Bulletin of the Technological Institute. – 2014 – No.13. – P. 315–326.

3. Grishin, B.M. Biological treatment of domestic wastewater using vortex mixing devices / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, V.G. Kamburg, A.N. Koshev // Regional architecture and construction. – 2016. – No. 3 (28). – P. 143–148.

4. Andreev, S.Yu. New technology for intensifying the operation of urban sewage treatment facilities using vortex hydrodynamic devices / S.Yu. Andreev, B.M. Grishin, N.G. Vilkova, A.N. Koshev, N.N. Laskov // Vodoочистка. – 2012. – No.6. – P. 46–56.

УДК 528.4

DOI 10.54734/20722958_2023_1_129

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

Акифьев Илья Владимирович,
кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Землеустройство и геодезия»
E-mail: zig@pguas.ru

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

Akifev Ilya Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Land Management and
Geodesy»
E-mail: zig@pguas.ru

Eremkin Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ

И.В. Акифьев, А.И. Ерёмкин, И.К. Пономарева

С целью обеспечения корректных геодезических результатов в реальных условиях на строительной площадке обобщены методы измерений с помощью современной спутниковой аппаратуры с использованием навигационной системы ГЛОНАСС и определены возможности повышения точности геодезических работ при строительстве зданий и сооружений на стройплощадках со сложными условиями приема сигналов. Актуальность исследования обусловлена тем, что в сложных условиях приема спутниковое оборудование может допускать ошибки, которые при выполнении геодезических работ в строительстве могут повлечь за собой различные последствия вплоть до обрушения конструкций. Поэтому представляется крайне важным исследование возможностей исправления искажённых сигналов для повышения качества строительных работ.

Ключевые слова: строительство, планировка объекта, высота здания, геодезические работы в строительстве, спутниковые технологии, ГЛОНАСС, GPS, глобальная навигационная система

COMPARATIVE STUDY OF MODERN GEODETIC METHODS FOR DETERMINING COORDINATES IN REAL CONDITIONS ON A CONSTRUCTION SITE

I.V. Akifev, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva

To ensure correct geodetic measurements in real conditions at a construction site, the methods of measurement using modern satellite equipment using GLONASS navigation system are generalized and the possibilities for improving the accuracy of geodetic work during the construction of buildings and structures on construction sites with difficult signal reception conditions are identified. The study

is relevant is due to the fact that in difficult conditions, satellite equipment can make mistakes, which, when performing geodetic work in construction, can lead to errors in site planning, collapse of structures. In this regard, it seems extremely important to study the possibilities of overcoming and correcting distorted signals in order to improve the quality of construction work.

Keywords: construction, facility layout, building height, geodetic works in construction, satellite technologies, GLONASS, GPS, global navigation system

В условиях загромождения строительной площадки сигналы от любых глобальных навигационных систем будут иметь существенные искажения. В текущей геополитической ситуации необходимо полагаться только на отечественную систему ГЛОНАСС, что усложняет работу геодезистов ввиду меньшего количества спутников, используемых для позиционирования приёмника сигнала. Практика показала, что приёмник сигнала может получить как прямой либо искажённый сигнал одновременно, так и только искажённый сигнал. Причина искажений при геодезических работах в строительстве, как правило, одна и та же – отражение сигнала от строительных объектов. Получив отражённый сигнал, приёмник выдаёт результат определения координат геодезисту без каких-либо проверок, что не отвечает современным требованиям к точности производства работ на стройплощадке.

Любой спутниковый приемник в зависимости от особенностей конструкции определяет координаты точек на строительной площадке с определенной аппаратурной ошибкой, зависимой от класса точности, поэтому одним из важных моментов повышения точности спутниковых измерений является определение величины погрешности.

Для того чтобы оценить именно аппаратурную точность геодезического спутникового оборудования и исключить или, по возможности, ослабить влияние на результаты измерений иных источников ошибок, необходимо и целесообразно поместить приемники в одинаковые условия приема сигналов.

При выполнении измерений приемники рекомендуется располагать друг от друга на расстоянии, не превышающем 1,5 м (длина базовых линий). При этом расстоянии ошибки определения векторов между приемниками будут зависеть исключительно от аппаратурных ошибок, а не от внешних факторов на строительной площадке. Условия внешней среды будут одинаковыми для каждой пары приемников и максимально приближенными к реальной ситуации, возникающей в процессе строительства.

Один из приемников на тестовом полигоне должен быть установлен с возможностью перемещения, а два других являются базовыми; базовые приемники № 2 и № 3 должны быть жестко закреплены на платформе; горизонтальность платформы следует контролировать с помощью переносного круглого уровня.

В качестве отсчетных устройств рекомендуется использовать две металлические линейки с ценой деления шкал 0,5 мм и два верньера; линейки должны быть жестко закреплены на платформе перпендикулярно друг другу, а верньеры – на основании перемещаемого приемника № 1, также перпендикулярно друг другу.

Пример тестового геодезического полигона представлен на рис. 1.

Предложенная методика измерений на тестовом полигоне сводилась к следующему: приемник № 1 смещали с интервалом в 1 мм вдоль перпендикулярных друг другу базовых линий между приемниками № 1 и № 2 по направлению, ориентированному на запад-восток, и между приемниками № 1 и № 3 – на юг-север. Таким образом, расстояние между подвижным приемником и базовым приемником сокращалось.

При обработке спутниковых наблюдений определяли сдвиг в сторону приемника № 2 на 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм и сдвиг в сторону приемника № 3 на 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм в локальной системе координат.

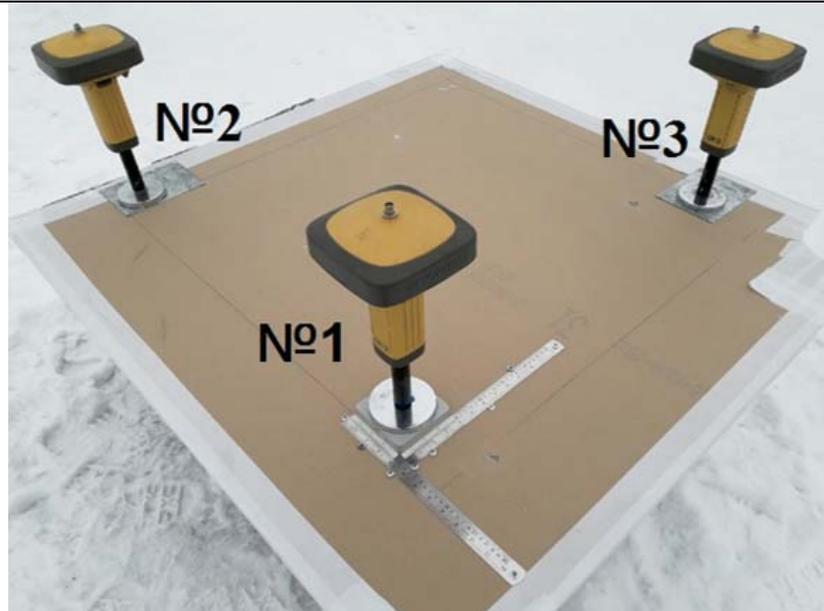


Рис. 1. Тестовый геодезический полигон для исследования влияния аппаратурной ошибки на результаты измерений

По результатам обработки координат положения приемника №1 и длин базовых линий рассчитывается:

1) сдвиг приемника по формуле

$$d_1 = \sqrt{(\Delta N_1 - \Delta N_0)^2 + (\Delta E_1 - \Delta E_0)^2}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где ΔN_0 , мм, и ΔE_0 , мм, – координаты приемника № 1 при начальном положении (сдвиг равен нулю); ΔN_i , мм, и ΔE_i , мм, – координаты приемника № 1 после смещения.

Параметр d_1 показывает величину сдвига приемника № 1 по результатам обработки спутниковых измерений, но не характеризует направление сдвига, т.е. по нему невозможно определить, сместился приемник № 1 строго по направлению к референцному приемнику или же в другом неизвестном направлении;

2) параметр, характеризующий отклонение от реального направления сдвига приемника № 1 к референцному приемнику, по формуле

$$b_1 = S_0 - S_i, \text{ мм}, \quad (2)$$

где S_0 , мм, – длина базовой линии при начальном положении приемника № 1 (сдвиг равен нулю); S_i , мм, – длина базовой линии после смещения приемника № 1;

3) аппаратурная точность по следующему условию:

$$d_i - b_i = 0. \quad (3)$$

Далее определяют параметр, характеризующей величину и направление сдвига приемника №1.

Результаты исследования аппаратурной погрешности спутникового приемника TRIUMPH-2 в графическом виде приведены на рис. 2–4.

Анализ графиков смещения приемника №1 относительно базовых приемников (см. рис. 2–4) позволяет сделать вывод, что величина сдвига, характеризующая аппаратурную точность комплекта геодезических спутниковых приемников в совокупности с программным обеспечением, существенно превышает значение в 1 мм; из этого следует, что поставленная Международной ассоциацией геодезии (International Association of Geodesy — IAG) задача по достижению миллиметрового уровня точности координат пунктов геодезических сетей будет решена. Известно, что на результаты спутниковых измерений действуют и другие источники, вызывающие погрешности.

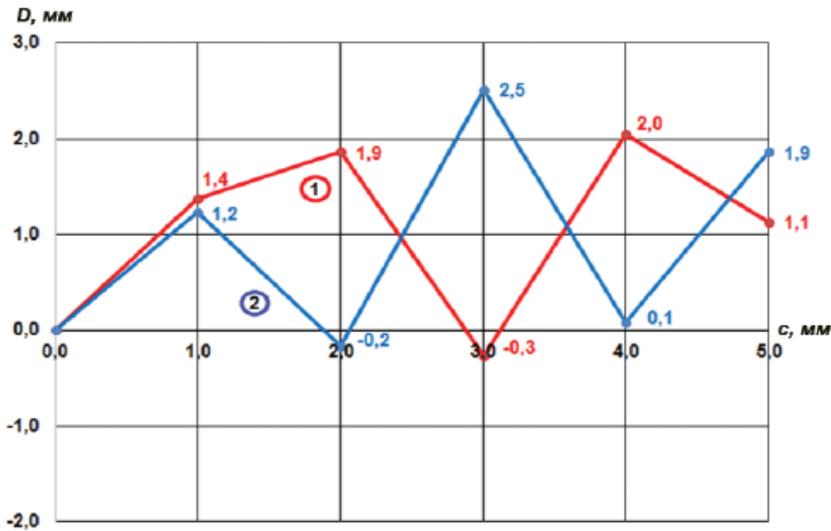


Рис. 2. График изменения значений параметра, характеризующего величину сдвига приемника №1 относительно базовых приемников №2 и №3

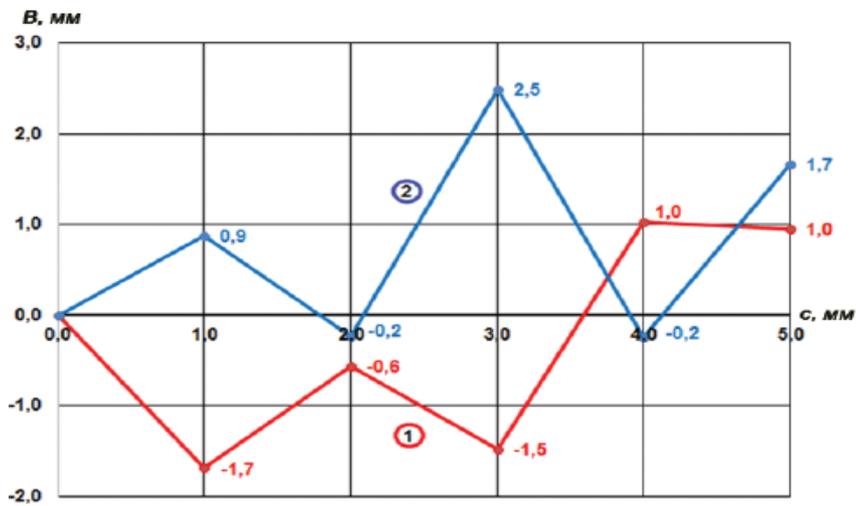


Рис. 3. График изменения значения параметра, который характеризует отклонение вычисленного параметра, определяющего направление сдвига приемника №1 относительно базовых приемников

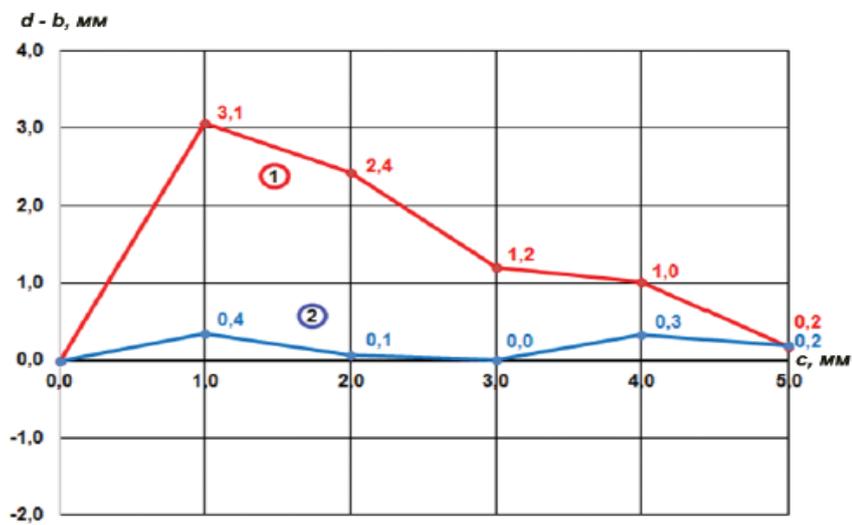


Рис. 4. График разностей между значениями d_1 и b_1 при смещении приемника относительно базовых приемников

Таким образом, при выборе спутникового приемника для высокоточных измерений в процессе строительного производства следует проводить исследование его аппаратурной ошибки по методике, описанной выше, и выбирать тот приёмник, для которого данная ошибка будет минимальной. Основной строительный допуск – 2 см – может быть достигнут малым количеством современных приёмников, и эта задача требует скорейшего решения. Использование приёмников ГНСС в строительной отрасли будет экономически оправдано не только с практической, но и с научной точки зрения.

Технология вычисления координат в квазиреальном времени, основанная на постобработке данных, была разработана в 2020 г. компанией JAVAD GNSS и получила название Real Time Post processed Kinematic (RTPK).

Основные особенности RTPK:

- 1) используются данные, полученные в режиме RTK;
- 2) постобработка выполняется спутниковым приемником;
- 3) проводится верификация (проверка) фиксированного решения.

Отличительной особенностью данного метода с нормативно-правовой точки зрения является то, что напрямую референчные станции не могут быть использованы как пункты опорной сети, поскольку не являются частью государственной системы координат. Требуется определенные процессуальные действия, связанные с метрологическими и административными службами, что является определенной проблемой в привязке (использовании) референчных станций (специальные и местные сети). Однако в составе государственной геодезической сети дифференциальные геодезические станции могут быть использованы.

Решением ГКРЧ РФ (Государственная комиссия по радиочастотам) № 16-39-01 обращения в Роскомнадзор и радиочастотную службу должны содержать географические координаты в системе геодезических координат ГСК. Заключение экспертизы электромагнитной совместимости и разрешения на использования радиочастот также содержат информацию о географических координатах в системе геодезических координат ГСК.

Двухнаправленный алгоритм фильтрации не только предоставляет дополнительные возможности для инициализации фазовых измерений (получения так называемого фиксированного решения), но и увеличивает количество эпох, используемых для вычисления координат. Все имеющиеся сигналы ГНСС обрабатываются совместно, обеспечивая максимальное значение PDOP. В случае применения RTPK нет необходимости выполнять повторные наблюдения на одной и той же точке. Параметры фильтрации устанавливаются на основании предварительной проверки статистических гипотез, выполняемой на полном ряде наблюдений.

Верификация целочисленного решения проводится внутри оригинального алгоритма обработки ковариационной матрицы плавающего решения путем сопоставления так называемых частичных решений еще на этапе обработки ковариационной матрицы. Достоверность вычисленных координат будет лучше, чем при использовании метода RTK. Время постобработки данных в различных ГНСС-приемниках компании JAVAD GNSS составляет примерно 1/20–1/60 от времени наблюдений. Рекомендуемое время наблюдений в экстремальных условиях при полностью «закрытом небосводе» равно 6 минутам. Если условия наблюдений хорошие, то достаточно 5–6 секунд. Таким образом, будет справедливо утверждение, что RTPK является квази-RTK-методом, поскольку обработка данных занимает в большинстве случаев порядка одной секунды.

В случае потери радиосигнала, передающего поправки, предусмотрена возможность скачать файл измерений, полученных на базовой станции, на подвижный приемник и получить решение непосредственно в полевых условиях. Во многих случаях это может быть очень полезно.

Применение полной калибровочной таблицы антенны, учитывающей не только зависимость от угла восхождения спутника, но и от азимута, значительно повышает точность вычисления вертикальной компоненты решения. Обычное расхождение

решений на расстояниях до 15 км при нормальных условиях составляет 1–2 мм по всем трем координатам.

Нами было проведено сравнение режимов RTPK и RTK при выполнении измерений в сложных условиях с использованием приемника TRIUMPH-2. GNSS-приемник TRIUMPH-2 был установлен у стены возводимого кирпичного дома, окруженного многолетними деревьями; место установки показано на рис. 5.

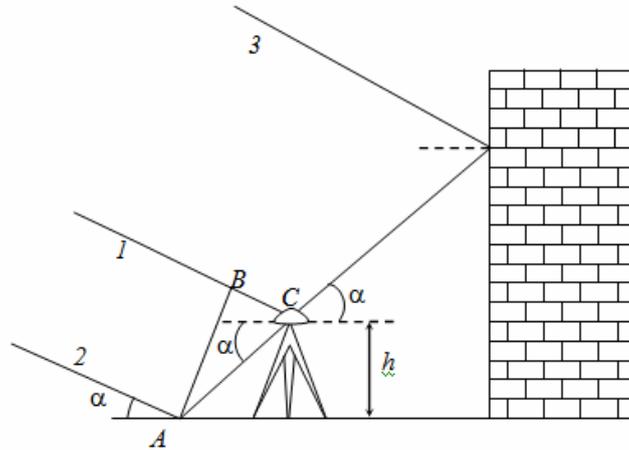


Рис. 5. Место установки приемника

Вследствие сильной многолучевости и обилия отражённых сигналов условия наблюдения в таком месте были хуже, чем даже непосредственно под кронами деревьев. Приемник принимал сигналы GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou, QZSS. Каждые 2 минуты автоматически записывались решения RTK и RTPK.

Статистика измерений показывает, что использование метода RTK позволило получить 45 точных решений и 16 «отлетов», а метод RTPK – 93 точных решения и 23 «отлета».

Таким образом, эффективность RTPK оказалась в 2 раза выше. Настройки GNSS-приемника TRIUMPH позволяют сравнивать оба решения и при их совпадении автоматически записать результат. Как показали испытания, такой подход обеспечивает высокую надежность фиксированного решения (свыше 99,99 %)

Пример отображения на экране приемника результатов сравнения решений в режимах RTK и RTPK представлен на рис. 6.

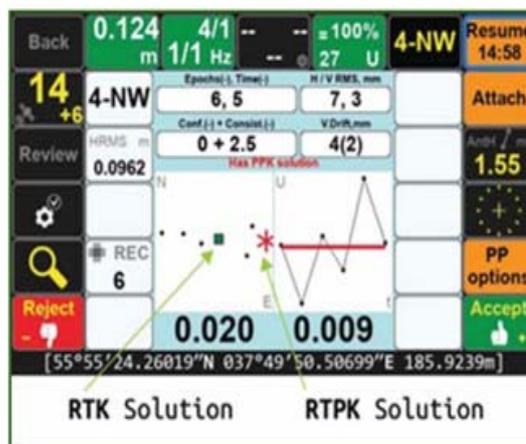


Рис. 6. Пример отображения на экране приемника результатов сравнения решений в режимах RTK и RTPK

Таким образом, расширенное моделирование тропосферного эффекта, возможное только при постобработке, позволяет выполнять надежные определения координат на больших расстояниях от базовой станции, тогда как обычный RTK нельзя

рекомендовать при удалении от базовой станции на расстояние свыше 40 км. При слабом и/или искажённом сигнале от глобальных навигационных систем значительно падает точность геодезических работ при строительстве зданий и сооружений, и геодезист может допустить серьёзную ошибку, которая может привести, в том числе, к обрушению возводимых строительных конструкций. Использование метода RTPK позволяет качественно переломить такую ситуацию и дать необходимую точность при проведении геодезических работ в строительстве.

Использование современных отечественных и зарубежных методов геодезических измерений позволит увеличить точность координат объектов строительства, что важно с точки зрения экономической эффективности, направленной на оптимизацию затрат.

Список литературы

1. Ерёмкин, А.И. Анализ развития возможностей ГЛОНАСС для выполнения геодезических работ в строительстве на современном этапе развития спутниковых технологий / А.И. Ерёмкин, И.В. Акифьев, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 3 (52). – С. 199–212.
2. Пономарева, И.К. Бизнес-планирование на предприятии / И.К. Пономарева, И.В. Акифьев, В.Д. Быстрова // Научное обозрение. – 2014. – № 9–2. – С. 663–665.
3. Акифьев, И.В. Формирование стратегии развития предприятий строительного комплекса в эффективных зонах деятельности: автореф. дис. ... канд. экон. наук / И.В. Акифьев. – Пенза: ПГУАС, 2010.
4. Акифьев, И.В. Формирование стратегии развития предприятий строительного комплекса в эффективных зонах деятельности: дис. ... канд. экон. наук / И.В. Акифьев. – Пенза: ПГУАС, 2010.
5. Акифьев, И.В. Стратегия продвижения малоэтажных зданий в регионах РФ / И.В. Акифьев, И.К. Пономарева // Муниципалитет: экономика и управление. – 2019. – № 1 (26). – С. 5–15.
6. Горобец, В.П. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года / В.П. Горобец, Г.Н. Ефимов, И.А. Столяров // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 24–37.
7. Постановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 г №1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы».
8. Федеральный закон от 30.12.2015 г. № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
9. ITRF2014. Description. – URL: http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/

References

1. Eremkin, A.I. Analysis of the development of GLONASS capabilities for performing geodetic works in construction at the present stage of development of satellite technologies / A.I. Eremkin, I.V. Akifiev, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 3 (52). – P. 199–212.
2. Ponomareva, I.K. Business planning at the enterprise / I.K. Ponomareva, I.V. Akifiev, V.D. Bystrova // Scientific Review. – 2014. – No. 9–2. – P. 663–665.
3. Akifiev, I.V. Formation of a strategy for the development of enterprises of the construction complex in effective areas of activity: Abstract of the dis. ... of Candidate of Economic Sciences / I.V. Akifiev. – Penza: PGUAS, 2010.
4. Akifiev, I.V. Formation of a strategy for the development of enterprises of the construction complex in effective areas of activity: Thesis for the degree of Candidate of Economic Sciences / I.V. Akifiev. – Penza: PGUAS, 2010.

5. Akifiev, I.V. Strategy for the promotion of low-rise buildings in the regions of the Russian Federation / I.V. Akifiev, I.K. Ponomareva // Municipality: economics and management. – 2019. – No. 1 (26). – P. 5–15.

6. Gorobets, V.P. Experience of the Russian Federation in establishing the state system of coordinates in 2011 / V.P. Gorobets, G.N. Efimov, I.A. Stolyarov // Vestnik SGUGiT. – 2015. – Issue. 2 (30). – P. 24–37.

7. Decree of the Government of the Russian Federation of November 24, 2016 No. 1240 «On the establishment of state coordinate systems, the state system of heights and the state gravimetric system».

8. Federal Law of December 30, 2015 No. 431-FZ «On geodesy, cartography and spatial data and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation».

9. ITRF2014. description. – URL: http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/

УДК 628.35

DOI 10.54734/20722958_2023_1_137

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

Салмин Сергей Михайлович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Водоснабжение, водоотведение
и гидротехника»
E-mail: sam14-08@mail.ru

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Salmin Sergey Mikhailovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Water supply, sewerage and
hydraulic engineering»
E-mail: sam14-08@mail.ru

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИЕМА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЕКЦИОНИРОВАНИЯ

С.Ю. Андреев, С.М. Салмин, К.В. Лебединский

Приведены результаты теоретических исследований процесса интенсификации биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в аэротенке-смесителе за счет использования технологического приема гидравлического секционирования аэрационного объема. Получены математические зависимости, описывающие процесс биологической очистки сточных вод в ячеистом аэротенке. Показано, что гидравлическое секционирование аэрационного объема аэротенка-смесителя компактной установки КУ-200 приводит к повышению удельной окислительной мощности сооружения в 1,8 раза. Использование полученных зависимостей позволит оптимизировать технологические процессы биологической очистки сточных вод в аэротенках.

Ключевые слова: гидравлическое секционирование, коэффициент скорости окисления, ячеистый аэротенк, аэрационный объем, окислительная мощность, период аэрации

INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT THROUGH THE USING THE TECHNOLOGY OF HYDRAULIC PARTITIONING

S.Yu. Andreev, S.M. Salmin, K.V. Lebedinskiy

The results of theoretical studies of the process of intensification of domestic wastewater biological treatment in an aerotank mixer due to the use of the technological method of hydraulic partitioning of the aeration volume are presented. Mathematical dependences describing the process of biological wastewater treatment in a cellular aeration tank are obtained. It is shown that hydraulic partitioning of the aeration volume of the aeration tank mixer of the compact installation KU-200

leads to an increase in the specific oxidizing power of the structure by 1.8 times. The use of the obtained dependencies will optimize the technological processes of biological wastewater treatment in aerotanks.

Keywords: hydraulic partitioning, oxidation rate coefficient, cellular aerotank, aeration volume, oxidizing power, aeration period

Основным методом очистки хозяйственных бытовых сточных вод в настоящее время является метод биохимического окисления органических загрязнений микроорганизмами активного ила аэротенка [1, 2, 3]. По структуре потока иловой смеси в аэрационном бассейне аэротенки подразделяются на 2 основных вида:

- 1) аэротенки-вытеснители;
- 2) аэротенки-смесители.

Аэротенки-вытеснители с регенерацией активного ила применяются в процессах биологической очистки сточных вод с концентрацией органических загрязнений до 350 мг/л. Аэротенки-вытеснители не могут быть использованы при биологической очистке сточных вод локальных объектов и малых населенных пунктов, поскольку такие объекты канализования отличаются крайней нестационарностью режима водоотведения, значительными колебаниями расходов сточных вод и концентраций органических загрязнений, содержащихся в сточных водах. В этих случаях широкое распространение получили аэротенки-смесители, представляющие собой биореакторы с децентрализованной подачей сточных вод и активного ила.

Равномерное распределение подаваемых для обработки сточных вод и возвратного активного ила вдоль длинной стороны коридора такого аэротенка позволяет обеспечить быстрое их смешение в аэрационном объеме, происходящее под действием интенсивного поперечного перемешивания. Во всех точках аэрационного объема вдоль длины коридора аэротенка-смесителя устанавливается практически одинаковая концентрация органических загрязнений. Нагрузка на активный ил по органическим загрязнениям в этом случае постоянна по длине коридора. Ее значение зависит от аэрационного объема сооружения и может иметь оптимальную величину при высоких концентрациях органических загрязнений в поступающих на аэротенк-смеситель сточных водах.

Для очистки сточных вод локальных объектов и малых населённых пунктов при их производительности 12-700 м³/сут и концентрации органических загрязнений в поступающих сточных водах БПК_{полн} 200-400 мг/л используются компактные установки типа КУ, которые изготавливаются из металла в заводских условиях и монтируются на территории канализационных очистных сооружений. В настоящее время на станциях биологической очистки малых населенных пунктов и локальных объектов эксплуатируется большое количество компактных установок типа КУ-200. В установке КУ-200 в одном блоке смонтированы следующие сооружения:

- аэротенк-смеситель с пневматической системой аэрации;
- вторичный отстойник;
- аэробный стабилизатор активного ила.

Использование в конструкции КУ-200 аэротенка-смесителя позволяет сгладить кратковременные колебания величины концентрации органических загрязнений в поступающих на очистку сточных водах, присущие малым населенным пунктам, что обеспечивает устойчивость работы сооружений биологической очистки. Существенным недостатком установки КУ-200 является относительно низкая удельная окислительная мощность сооружения.

Анализ материального баланса расходов сточных вод и концентраций содержащихся в них органических загрязнений позволяет вывести формальную схему работы аэротенка-смесителя, описываемую уравнениями

$$Q_{\text{ч}} L_{\text{вх}} = Q_{\text{ч}} L_{\text{вых}} + V_L W_a = Q_{\text{ч}} \cdot L_{\text{вых}} + V_L Q_{\text{ч}} T_a, \quad (1)$$

$$L_{\text{вх}} = L_{\text{вых}} + V_L T_a = L_{\text{вых}} + \rho a (1 - S) T_a, \quad (2)$$

где $Q_{\text{ч}}$ – среднечасовой расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{ч}$; $L_{\text{вх}}$ и $L_{\text{вых}}$ – соответственно концентрации органических загрязнений в сточных водах на входе и в иловой смеси на выходе из аэротенка-смесителя, $\text{мг}/\text{л}$; W_a – величина аэрационного объема аэротенка-смесителя, м^3 ; V_L – объемная скорость окисления органических загрязнений активным илом, $\text{мг}/\text{л}\cdot\text{ч}$; ρ – удельная скорость окисления органических загрязнений беззольным веществом активного ила, $\text{мг}/\text{г}\cdot\text{ч}$; a – доза ила, $\text{г}/\text{л}$; S – зольность ила; $T_a = \frac{W_a}{Q_{\text{ч}}}$ – продолжительность аэрирования иловой смеси в аэротенке-смесителе (период аэрации), ч.

Из (2) имеем

$$L_{\text{вых}} = L_{\text{вх}} - \rho a (1 - S) T_a, \text{ г}/\text{м}^3, \quad (3)$$

$$T_a = \frac{L_{\text{вх}} - L_{\text{вых}}}{\rho a (1 - S)}, \text{ г}. \quad (4)$$

Уравнение (2) можно записать в виде

$$\frac{L_{\text{вх}}}{L_{\text{вых}}} = 1 + \frac{V_L}{L_{\text{вых}}} T_a = 1 + K_p T_a, \quad (5)$$

где K_p – коэффициент скорости реакции, ч^{-1} ,

$$K_p = \frac{\rho}{L_{\text{вых}}} = a(1 - S). \quad (6)$$

В аэротенке-смесителе при $L_{\text{вых}} = \text{const}$ и $\rho = \text{const}$, поскольку a и S также являются постоянными величинами, K_p , в свою очередь, также будет константой. В этом случае формулу (5) можно записать в виде

$$L_{\text{вх}} = L_{\text{вых}} \cdot (1 + K_p T_a), \text{ г}/\text{м}^3, \quad (7)$$

откуда

$$L_{\text{вых}} = \frac{L_{\text{вх}}}{1 + K_p T_a}, \text{ г}/\text{м}^3. \quad (8)$$

Окислительная мощность аэротенка-смесителя, работающего в режиме биологической очистки, может быть существенно повышена путем разделения его аэрационного объема на ряд последовательно соединенных ячеек.

Технологический прием выделения из общего аэрационного объема ряда ячеек, работающих в режиме аэротенка-смесителя и последовательно соединяющихся друг с другом, носит название гидравлического секционирования и используется в ячеистых аэротенках.

Для ячеистого аэротенка, состоящего из двух ячеек, (8) запишется в виде

$$L_{\text{вых}} = \frac{L_{\text{вх}}}{(1 + K_{p1} T_1)(1 + K_{p2} T_2)}. \quad (9)$$

Общее время пребывания сточных вод $T_{\text{ая}}$ в аэротенке, состоящем из двух ячеек ($n=2$), при длительности периодов аэрации первой и второй ступеней T_1 и T_2 может быть определено по формуле

$$T_{\text{ая}} = T_1 + T_2 = T_2 \cdot \left(1 + \frac{T_1}{T_2}\right) = T_2 \cdot (1 + \bar{T}), \text{ ч}, \quad (10)$$

где

$$\bar{T} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (11)$$

откуда

$$T_2 = \frac{T_{\text{ая}}}{1 + \bar{T}}, \quad \text{ч}, \quad (12)$$

$$T_1 = \bar{T}T_2 = T_{\text{ая}} \frac{\bar{T}}{1 + \bar{T}}. \quad (13)$$

Таким образом, формула (9) при $K_p = K_{p1} = K_{p2}$ может быть записана в виде

$$\frac{L_{\text{вх}}}{L_{\text{вых}}} = \left(1 + K_p T_{\text{ая}} \frac{\bar{T}}{1 + \bar{T}}\right) \left(1 + K_p T_{\text{ая}} \frac{1}{1 + \bar{T}}\right). \quad (14)$$

При $\bar{T} = 1$ и $K_p = \text{const}$ формула (14) примет вид

$$\frac{L_{\text{вх}}}{L_{\text{вых}}} = \left(1 + K_p \frac{T_{\text{ая}}}{2}\right) \left(1 + K_p \frac{T_{\text{ая}}}{2}\right) = \left(1 + K_p T_{\text{я}}\right)^2. \quad (15)$$

Для n ячеек формула (15) запишется в виде

$$L_{\text{вых}} = \frac{L_{\text{вх}}}{\left(1 + K_p T_{\text{я}}\right)^n}, \quad \text{мг/л}, \quad (16)$$

где $T_{\text{я}} = \frac{T_{\text{ая}}}{n}$ – продолжительность пребывания сточных вод в ячейке при $\bar{T} = 1$.

На рисунке изображены графики зависимости безразмерной величины $\frac{L_{\text{вх}}}{L_{\text{вых}}}$ (см. формулу (14)) от значения параметра $K_p T_{\text{а}}$ при различных значениях $\bar{T} = \frac{T_1}{T_2}$ и $K_p = \text{const}$.

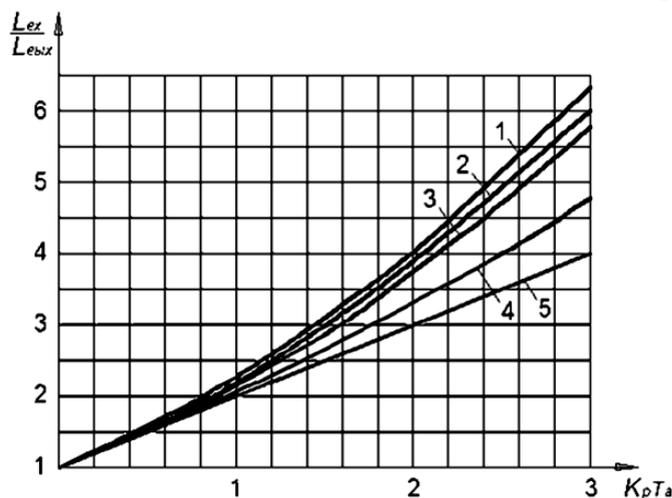


График зависимости безразмерной величины $\frac{L_{\text{вх}}}{L_{\text{вых}}}$ от значения $K_p T_{\text{а}}$

при разных значениях $n = \frac{T_1}{T_2}$ и $K_p = \text{const}$:

1 – $\bar{T} = 1$; 2 – $\bar{T} = 2$; 3 – $\bar{T} = 3$; 4 – $\bar{T} = 10$; 5 – $T_1 = T_{\text{а}}$

Из графиков, представленных на рисунке, следует, что при условии $K_p = K_y = \text{const}$ наиболее эффективным является ячеистый аэротенк, состоящий из двух ячеек равного объема, и $\bar{T} = 1$.

Для случая, когда $K_{p1} \neq K_{p2}$, наиболее эффективным является ячеистый аэротенк, который состоит из n ячеек и для которого выполняется условие

$$K_1 T_1 = K_2 T_2 = K_n T_n = \text{const}. \quad (17)$$

При дозе активного ила $a = 2,5$ г/л, зольности ила $S = 0,3$ и удельной скорости окисления $\rho = 20,6$ мг/(л·ч) в аэротенке-смесителе компактной установки КУ-200, имеющем рабочий аэрационный объем $W_a = 97$ м³, за период аэрации $T_a = 6$ ч концентрация органических загрязнений в сточных водах снижается с $L_{\text{вх}} = 230$ мг/л до $L_{\text{вых}} = 15$ мг/л.

$$L_{\text{вых}} = L_{\text{вх}} - \rho a (1 - S) T_a = 230 - 20,6 \cdot 2,5 (1 - 0,3) 6 = 15 \text{ мг/л}. \quad (18)$$

Величина удельной окислительной мощности аэротенка установки КУ-200 при этих условиях составит:

$$OM_a = \frac{24(L_{\text{вх}} - L_{\text{вых}})}{1000 T_a} = \frac{24(230 - 15)}{1000 \cdot 6} = 0,86 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{сут)}. \quad (19)$$

В первом приближении аэрационный объем аэротенка установки КУ-200 делится на четыре равные части и принимается условие $K_p = K_y = \text{const}$.

Продолжительность процесса биологической очистки сточных вод в одной ячейке составляет:

$$T_y = \frac{T_a}{n} = \frac{6}{4} = 1,5 \text{ ч}.$$

В соответствии с формулой (16) величина коэффициента скорости реакции биохимического окисления органических загрязнений в ячейке аэротенка K_y будет иметь значение:

$$K_y = \left[\left(\frac{L_{\text{вх}}}{L_{\text{вых}}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{T_y} = \left[\left(\frac{230}{15} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{1,5} = 0,653 \text{ ч}^{-1}. \quad (20)$$

Расчетные величины концентрации органических загрязнений на выходе из ячеек секционированного аэротенка-смесителя в этом случае будут иметь значения:

$$L_{y1} = \frac{L_{\text{вх}}}{1 + K_p T_y} = \frac{230}{1 + 0,653 \cdot 1,5} = 116,2 \text{ мг/л}, \quad (21)$$

$$L_{y2} = \frac{L_{y1}}{1 + K_p T_y} = \frac{116,2}{1 + 0,653 \cdot 1,5} = 58,7 \text{ мг/л}, \quad (22)$$

$$L_{y3} = \frac{L_{y2}}{1 + K_p T_y} = \frac{58,7}{1 + 0,653 \cdot 1,5} = 29,7 \text{ мг/л}, \quad (23)$$

$$L_{\text{вых}} = L_{y4} = \frac{L_{y3}}{1 + K_p T_y} = \frac{29,7}{1 + 0,653 \cdot 1,5} = 15 \text{ мг/л}. \quad (24)$$

Между соотношением концентрации органических загрязнений на входе и выходе из аэротенка $\frac{L_{\text{ВХ}}}{L_{\text{ВЫХ}}}$ и соотношением этих концентраций на входе и выходе из его ячеек

$\frac{L_n}{L_{n+1}}$ существует зависимость

$$\frac{L_n}{L_{n+1}} = \left(\frac{L_{\text{ВХ}}}{L_{\text{ВЫХ}}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (25)$$

Поскольку в сточных водах на выходе из ячеек аэротенка концентрации органических загрязнений имеют различные значения ($L_{\text{ВЫХ1}} = 116$ мг/л; $L_{\text{ВЫХ2}} = 59$ мг/л; $L_{\text{ВЫХ3}} = 30$ мг/л; $L_{\text{ВЫХ4}} = 15$ мг/л), то величина удельных скоростей окисления органических загрязнений беззольным веществом активного ила ρ также будет иметь разные значения. Величина удельной скорости окисления ρ может быть определена по формуле

$$\rho = \rho_{\text{max}} \cdot \frac{L_{\text{ВЫХ}} \cdot C_o}{L_{\text{ВЫХ}} \cdot C_o + K_1 \cdot C_o + K_o \cdot L_{\text{ВЫХ}}} \cdot \frac{1}{1 + \varphi a}, \quad (26)$$

где ρ_{max} – максимальная скорость окисления органических загрязнений беззольным веществом активного ила, мг/(г·ч); C_o – концентрация растворенного кислорода воздуха в иловой смеси, мг/л; K_1 – константа, характеризующая свойства органических загрязняющих веществ, мг/л; K_o – константа, характеризующая влияние на процесс биологической очистки растворенного кислорода, мг/л; $L_{\text{ВЫХ}}$ – концентрация органических загрязнений на выходе из аэротенка-смесителя, мг/л; a – доза активного ила, принимаемая на основе эффективности работы вторичных отстойников, г/л; φ – коэффициент ингибирования процесса биологической очистки продуктами распада активного ила, л/г.

Для хозяйственно-бытовых сточных вод: $\rho_{\text{max}} = 85$ мг/(г·ч); $K_1 = 33$ мг/л; $K_o = 0,625$ мг/л; $\varphi = 0,07$ л/г; $C_o = 2$ мг/л.

Тогда

$$\rho_1 = 85 \cdot \frac{116,2}{116,2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 116,2} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 2,5} = 45,3 \text{ мг/(г·ч)}. \quad (27)$$

Продолжительность процесса аэробного окисления органических загрязнений микроорганизмами активного ила в первой ячейке аэротенка в соответствии с формулой (4) будет равна:

$$T_{\text{ая1}} = \frac{L_{\text{ВХ}} - L_{\text{ВЫХ}}}{\rho_1 \cdot a(1-s)} = \frac{230 - 116,2}{45,3 \cdot 2,5(1 - 0,3)} = 1,44 \text{ ч}. \quad (28)$$

Найдем величины ρ_2 и $T_{\text{ая2}}$:

- во второй ячейке аэротенка

$$\rho_2 = 85 \cdot \frac{58,7 \cdot 2}{58,7 \cdot 2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 59} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 2,5} = 38,7 \text{ мг/(г·ч)}, \quad (29)$$

$$T_{\text{ая2}} = \frac{116,2 - 58,7}{38,7 \cdot 2,5(1 - 0,3)} = 0,84 \text{ ч}; \quad (30)$$

- в третьей ячейке аэротенка:

$$\rho_3 = 85 \cdot \frac{29,7 \cdot 2}{29,7 \cdot 2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 29,7} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 2,5} = 30,1 \text{ мг/(Г·ч)}, \quad (31)$$

$$T_{\text{ая3}} = \frac{58,7 - 29,7}{30,1 \cdot 2,5(1 - 0,3)} = 0,56 \text{ ч}; \quad (32)$$

- в четвертой ячейке аэротенка:

$$\rho_4 = 85 \cdot \frac{15 \cdot 2}{15 \cdot 2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 59} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 2,5} = 20,6 \text{ мг/(Г·ч)}, \quad (33)$$

$$T_{\text{ая4}} = \frac{29,7 - 15}{20,6 \cdot 2,5(1 - 0,3)} = 0,41 \text{ ч}. \quad (34)$$

Общая продолжительность очистки сточных вод в ячеистом аэротенке составит:

$$T_{\text{ая}} = T_{\text{ая1}} + T_{\text{ая2}} + T_{\text{ая3}} + T_{\text{ая4}} = 1,44 + 0,84 + 0,56 + 0,41 = 3,25 \text{ ч}. \quad (35)$$

Величина удельной окислительной мощности ячеистого аэротенка будет иметь значение:

$$\text{ОМ} = \frac{24(L_{\text{вх}} - L_{\text{вых}})}{1000T_{\text{ая}}} = \frac{24(230 - 15)}{1000 \cdot 3,25} = 1,59 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{сут)}. \quad (36)$$

Технологический прием гидравлического секционирования аэрационного объема аэротенка компактной установки КУ-200 позволил повысить величину ее удельной окислительной мощности в 1,85 раза.

Величина коэффициента скорости реакции биохимического окисления органических загрязнений в ячейке аэротенка может быть определена по формуле

$$K_{\text{ря}} = \frac{\rho_{\text{я}}}{L_{\text{вых я}}} \cdot a(1 - s), \text{ ч}^{-1}, \quad (37)$$

$$K_{\text{ря1}} = \frac{45,3}{116,2} \cdot 2,5(1 - 0,3) = 0,68 \text{ ч}^{-1}, \quad (38)$$

$$K_{\text{ря2}} = \frac{38,7}{58,7} \cdot 2,5(1 - 0,3) = 1,15 \text{ ч}^{-1}, \quad (39)$$

$$K_{\text{ря3}} = \frac{30,1}{29,7} \cdot 2,5(1 - 0,3) = 1,77 \text{ ч}^{-1}, \quad (40)$$

$$K_{\text{ря4}} = \frac{20,6}{15} \cdot 2,5(1 - 0,3) = 2,40 \text{ ч}^{-1}. \quad (41)$$

Удельная окислительная мощность ячеек может быть определена по формуле (33):

$$\text{ОМ}_{\text{я1}} = \frac{24(230 - 116,2)}{1000 \cdot 1,44} = 1,90 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{сут)}; \quad (42)$$

$$\text{ОМ}_{\text{я2}} = \frac{24(116,2 - 58,7)}{1000 \cdot 0,84} = 1,64 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{сут)}; \quad (43)$$

$$OM_{я1} = \frac{24(58,7 - 29,7)}{1000 \cdot 0,56} = 1,24 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}); \quad (44)$$

$$OM_{я1} = \frac{24(29,7 - 15)}{1000 \cdot 0,41} = 0,86 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}). \quad (45)$$

Рабочий объем ячеек аэротенка составит:

$$W_{яn} = W_a \frac{T_{яn}}{T_a}, \text{ м}^3, \quad (46)$$

$$W_{я1} = 97 \frac{1,44}{6} = 23 \text{ м}^3, \quad (47)$$

$$W_{я2} = 97 \frac{0,84}{6} = 14 \text{ м}^3, \quad (48)$$

$$W_{я3} = 97 \frac{0,56}{6} = 9 \text{ м}^3, \quad (49)$$

$$W_{я4} = 97 \frac{0,41}{6} = 6 \text{ м}^3. \quad (50)$$

Полученные расчетные значения технологических характеристик ячеек аэротенка компактной установки КУ-200 представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Расчетные значения технологических характеристик ячеек аэротенка компактной установки КУ-200

Технологическая характеристика	Значение технологической характеристики			
	1	2	3	4
Номер ячейки n	1	2	3	4
Концентрация органических загрязнений в ячейке $L_{яn}$, мг/л	116	59	30	15
Удельная скорость окисления органических загрязнений $\rho_{яn}$, мг/(г·ч)	49,2	38,7	31	20,6
Объем ячейки $W_{яn}$, м ³	23	14	9	6
Продолжительность процесса аэробного окисления ячейки $T_{я}$, г	1,44	0,84	0,56	0,41
Удельная окислительная мощность ячейки $OM_{яn}$, кг/(м ³ ·сут)	1,9	1,64	1,24	0,86
Коэффициент скорости окисления органических загрязнений в ячейке $K_{яn}$, ч ⁻¹	0,68	1,15	1,77	2,40

Средняя величина удельной скорости окисления органических загрязнений беззольным веществом активного ила в ячейках аэротенка компактной установки КУ-200

$$\rho_{я,ср} = \frac{L_{вх} - L_{вых}}{T_{ая} \cdot a(1-s)} = \frac{230 - 15}{3,25 \cdot 2,5(1 - 0,3)} = 37,8 \text{ мг}/\text{ч}. \quad (51)$$

Средняя величина удельной окислительной мощности в ячейках аэротенка компактной установки КУ-200

$$OM_{я,ср} = \frac{24(L_{вх} - L_{вых})}{1000T_{ая}} = \frac{24(230 - 15)}{1000 \cdot 3,25} = 1,59 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}). \quad (52)$$

Средняя величина коэффициента скорости окисления органических загрязнений в четырех ячейках компактной установки КУ-200

$$K_{я,ср} = \left(\frac{L_{вх}}{L_{вых}} - 1 \right) \frac{1}{T_{ая}} = \left(\frac{230}{15} - 1 \right) \frac{1}{3,25} = 4,41 \text{ ч}^{-1}. \quad (53)$$

Величина скорости окисления органических загрязнений в аэротенке-смесителе компактной установки КУ-200

$$K_{ас,ср} = \left(\frac{L_{вх}}{L_{вых}} - 1 \right) \frac{1}{T_{а}} = \left(\frac{230}{15} - 1 \right) \frac{1}{6} = 2,4 \text{ ч}^{-1}. \quad (54)$$

Аэротенк-смеситель является сооружением биологической очистки сточных вод, имеющим наименьшее значение величины удельной скорости окисления органических загрязнений ρ и наибольшую длительность процесса аэрации $T_{ас}$.

Отношение расчетных значений периодов аэрации в аэротенке-смесителе компактной установки КУ-200 $T_{ас}$ и ячеем аэротенке, состоящем из четырех секций ($n=4$), $T_{ая}$ имеет величину:

$$\bar{T}_{ая} = \frac{T_{ас}}{T_{ая}} = \frac{6}{3,25} = 1,85. \quad (55)$$

В реальном ячеем аэротенке величина удельной скорости окисления в его ячейках уменьшается ($\rho_1=45,2$; $\rho_2=38,7$; $\rho_3=30,1$; $\rho_4=20,6$ мг/(л·ч)) вследствие снижения концентрации содержащихся в сточных водах органических загрязнений. В идеальном аэротенке величина удельной скорости окисления в ячейках имеет постоянное значение, что может быть обеспечено за счет увеличения дозы активного ила $T_{ая}$ (г/л) и соблюдения условия $T_{я} = \text{const}$.

Из формулы (51) следует, что

$$T_{яит} = \frac{L_{ян} - L_{я(n+1)}}{\rho_{я} a_{я} (1-s)} = \text{const}, \text{ мг}/(\text{л} \cdot \text{ч}). \quad (56)$$

Период аэрации в ячеем аэротенке установки КУ-200 при соблюдении условия $\rho_{я} = \rho_{я1} = 45,2$ мг/(л·ч) = const будет иметь величину:

$$T_{ая} = \frac{L_{вх} - L_{вых}}{\rho_{я} a_{я} (1-s)} = \frac{230 - 15}{45,2 \cdot 2,49(1 - 0,3)} = 2,72 \text{ ч}. \quad (57)$$

Безразмерная величина отношения расчетных периодов аэрации в этом случае

$$\bar{T}_{ая} = \frac{T_{ас}}{T_{ая4}} = \frac{6}{2,72} = 2,21. \quad (58)$$

Безразмерная величина отношения расчетных периодов аэрации в идеальном ячеем аэротенке при числе ячеек $n=4$:

$$\bar{T}_{ая4} = \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n = \left(1 + \frac{1}{4} \right)^4 = 2,44. \quad (59)$$

Безразмерная величина отношения расчетных периодов в идеальном ячеистом аэротенке при бесконечном числе ячеек ($n \rightarrow \infty$)

$$\bar{T}_{\text{аин}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e = 2,72. \quad (60)$$

Расчетное значение периода аэрации в идеальном ячеистом аэротенке, состоящем из n ячеек, может быть определено по формуле

$$T_{\text{аин}} = \frac{T_{\text{ас}}}{\bar{T}_{\text{аин}}}, \text{ ч.} \quad (61)$$

При использовании аэрационного объема компактной установки КУ-200 в качестве аэротенка-вытеснителя без регенератора активного ила расчетная величина периода аэрации составит:

$$T_{\text{ас}} = \frac{1 + \varphi a}{\rho_{\text{max}} \cdot C_0 \cdot a(1 - S)} \cdot \left[(C_0 + K_0)(L_{\text{вх}} - L_{\text{вых}}) + K_L \cdot C_0 \cdot \ln \frac{L_{\text{вх}}}{L_{\text{вых}}} \right] K_p, \quad (62)$$

где $K_p = 1,5$ – коэффициент, учитывающий влияние продольного перемешивания.

Расчетные значения величин технологических характеристик аэротенка-смесителя компактной установки КУ-200, ячеистого аэротенка и идеального ячеистого аэротенка представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Расчетные значения величин технологических характеристик аэротенка-смесителя компактной установки КУ-200, ячеистого аэротенка, идеального ячеистого аэротенка

Технологические характеристики	Значения технологических характеристик				
	в аэротенке-смесителе	в аэротенке-вытеснителя	в реальном ячеистом аэротенке при $n=4$	в идеальном ячеистом аэротенке при $n=4$	в идеальном ячеистом аэротенке при $n = \infty$
Концентрация органических загрязнений на выходе из сооружения $L_{\text{вых}}$, мг/л	15	15	15	15	15
Продолжительность процесса аэробного окисления в сооружении T , ч	6	4,42	3,25	2,46	2,21
Объем сооружения W , м ³	97	97	52	40	36
Удельная скорость окисления органических загрязнений ρ , мг/(л·ч)	20,6	27,9	37,9	50,3	56
Удельная окислительная мощность сооружения ОМ, кг/(м ³ ·сут)	0,86	1,17	1,59	2,1	2,34
Коэффициент скорости окисления органических загрязнений в сооружении K_p , ч ⁻¹	2,39	3,24	4,41	5,83	6,49
Коэффициент степени совершенства сооружений K , %	36,8	50,0	67,9	89,7	100

Проведённый теоретический анализ показал, что гидравлическое секционирование аэрационного объема позволит повысить окислительную мощность аэротенка-смесителя в 1,8 раза, а аэротенка-вытеснителя – в 1,4 раза.

Список литературы

1. Степанов, С.В. Технологический расчет аэротенков и мембранных биореакторов / С.В. Степанов. – М.: АСВ, 2020. – 223 с.
2. Хенце, М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М.Хенце.– М.: Мир, 2009. – 480 с.
3. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации работы станции биологической очистки сточных вод с использованием перемешивающих эрлифтных устройств / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, И.А. Гаркина // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1. – С. 90–98.

References

1. Stepanov, S.V. Technological calculation of aerotanks and membrane bioreactors / S.V. Stepanov. – M.: DIA, 2020. – 223 p.
2. Henze, M. Wastewater treatment. Biological and chemical processes / M. Henze. – M.: Mir, 2009. – 480 p.
3. Andreev, S.Yu. A new technology for intensifying the operation of a biological wastewater treatment plant using mixing airlift devices / S.Yu. Andreev, B.M. Grishin, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 1. – P. 90–98.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2023_1_148

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

Пензенский государственный университет
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Лебединский Константин Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортные машины»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

Penza State University of Architecture
and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Andreev Sergey Yuryevich,
Doctor of Sciences, Professor
of the department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail:andreev3007@rambler.ru

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

Penza State University
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

Lebedinskiy Konstantin Valerevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Transport Machines»
E-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВОБОДНОПЛАВАЮЩИХ В АЭРАЦИОННОМ ОБЪЕМЕ АЭРОБНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

С.Ю. Андреев, В.А. Князев, К.В. Лебединский

Приведены результаты аналитических исследований кинетики процесса биохимического окисления сточных вод микроорганизмами активного ила и свободноплавающими в аэрационном объеме аэробными микроорганизмами. Показано, что значительное диффузионное сопротивление в процессе массопередачи кислорода внутри вязкой среды внеклеточного полимера активного ила определяет независимость величины константы Михаэлиса K_m от концентрации кислорода в аэрационном бассейне. Разработана технологическая схема предварительной биологической очистки сточных вод, предусматривающая использование свободноплавающих в аэрационном объеме аэробных микроорганизмов. Использование предложенной технологической схемы позволит существенно интенсифицировать процесс биологической очистки сточных вод.

Ключевые слова: активный ил, свободноплавающие микроорганизмы, ферментативная кинетика, биохимическое окисление, период аэрации, удельная скорость окисления

BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT BASED ON THE USE OF AEROBIC MICROORGANISMS FLOATING FREELY IN THE AERATION VOLUME

S.Yu. Andreev, V.A. Knyazev, K.V. Lebedinskiy

The results of analytical studies of the kinetics of the process of wastewater biochemical oxidation by microorganisms of activated sludge and aerobic microorganisms floating freely in the aeration volume are presented. It is shown that significant diffusion resistance in the process of

oxygen mass transfer inside the viscous medium of the extracellular polymer of activated sludge determines independence of the Michaelis constant K_m from the oxygen concentration in the aeration pool. A technological scheme of preliminary biological wastewater treatment has been developed, which provides the use of aerobic microorganisms floating freely in the aeration volume. The use of the proposed technological scheme will significantly intensify the process of biological wastewater treatment.

Keywords: active sludge, free-floating microorganisms, enzymatic kinetics, biochemical oxidation, aeration period, specific oxidation rate

На станциях биологической очистки сточных вод в настоящее время основными технологическими сооружениями являются аэротенки. В аэротенках в результате жизнедеятельности аэробных микроорганизмов активного ила протекают разнообразные биохимические процессы, которые сопровождаются окислением органических загрязнений, удалением соединений фосфора, нитрификацией и денитрификацией сточных вод.

Описание закономерностей кинетики биохимических процессов очистки сточных вод активным илом, как правило, осуществляется на основе классических представлений теории ферментативной кинетики [1, 2, 3], основным положением которой является предположение о существовании фермент-субстратного комплекса и зависимости скорости протекания биохимической реакции от скорости распада этого комплекса.

Впервые предположение о существовании фермент-субстратного комплекса было выдвинуто в совместной статье немецкого биохимика Ленора Михаэлиса и канадского биохимика Мод Леоноры Ментен, посвящённой кинетике процесса работы инвертазы и опубликованной в журнале «*Zeitschrift Biochemische*» в 1913 году.

В качестве показателя интенсивности процесса биологической очистки сточных вод принято использовать величину удельной скорости окисления органических загрязнений беззольным веществом активного ила, которая определяется классическим уравнением

$$\rho = \rho_{\max} \frac{L}{K_m + L}, \text{ мг/(г}\cdot\text{ч)}, \quad (1)$$

где ρ_{\max} – максимальная удельная скорость окисления органических загрязнений беззольным веществом активного ила, мг/(г·ч); L – концентрация субстрата (органических загрязнений), мг/л; K_m – константа Михаэлиса, мг/л.

В диссертации Скирдова И.В. на соискание ученой степени доктора технических наук «Исследование и разработка методов интенсификации работы сооружений биологической очистки сточных вод» было рекомендовано определять величину удельной скорости окисления органических соединений по следующей формуле, которая позднее была включена в СНиП 2.04.03-85:

$$\rho = \rho_{\max} \frac{L_{\text{вых}} C_0}{L_{\text{вых}} C_0 + K_L C_0 + K_0 L_{\text{вых}}} \frac{1}{1 + \varphi a}, \text{ мг/(г}\cdot\text{ч)}, \quad (2)$$

где $L_{\text{вых}}$ – концентрация органических загрязнений в иловой смеси на выходе из аэротенка, мг/л; C_0 – концентрация растворенного в иловой смеси кислорода воздуха, мг/л; K_L – константа, характеризующая свойства органических загрязнений сточных вод, мг/л; K_0 – константа, характеризующая влияние кислорода на процесс биохимического окисления органических загрязнений, мг/л; φ – коэффициент ингибирования процесса биохимического окисления органических загрязнений продуктами распада активного ила, л/г; a – доза активного ила, г/л.

Обозначив

$$K_0' = \frac{1}{1 + K_0 C_0^{-1}}, \quad (3)$$

$$\varphi' = \frac{1}{1 + \varphi a}, \quad (4)$$

$$\rho_{\max}' = \rho_{\max} K_0' \varphi', \quad (5)$$

$$K_m = K_L \cdot K_0', \quad (6)$$

формулу (2) можно представить в классическом виде формулы (1):

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{\max} \cdot \frac{L_{\text{ВЫХ}}}{L_{\text{ВЫХ}} + K_L + K_0 C_0^{-1} L_{\text{ВЫХ}}} \cdot \frac{1}{1 + \varphi a} = \rho_{\max} \frac{L_{\text{ВЫХ}}}{L_{\text{ВЫХ}} (1 + K_0 C_0^{-1}) + K_L} \cdot \frac{1}{1 + \varphi a} = \\ &= \rho_{\max} \frac{1}{1 + \varphi a} \cdot \frac{1}{1 + K_0 C_0^{-1}} \cdot \frac{L_{\text{ВЫХ}}}{L_{\text{ВЫХ}} + K_L \frac{1}{1 + K_0 C_0^{-1}}} = \rho_{\max}' \cdot \frac{L_{\text{ВЫХ}}}{K_m + L_{\text{ВЫХ}}}, \text{ мг}/(\text{г} \cdot \text{ч}). \end{aligned} \quad (7)$$

В работе М.А. Евилевича и Л.Н. Бранчинского «Оптимизация биохимической очистки сточных вод» приводятся графики, описывающие влияние концентрации кислорода на скорость биохимического окисления органических загрязнений (рис. 1).

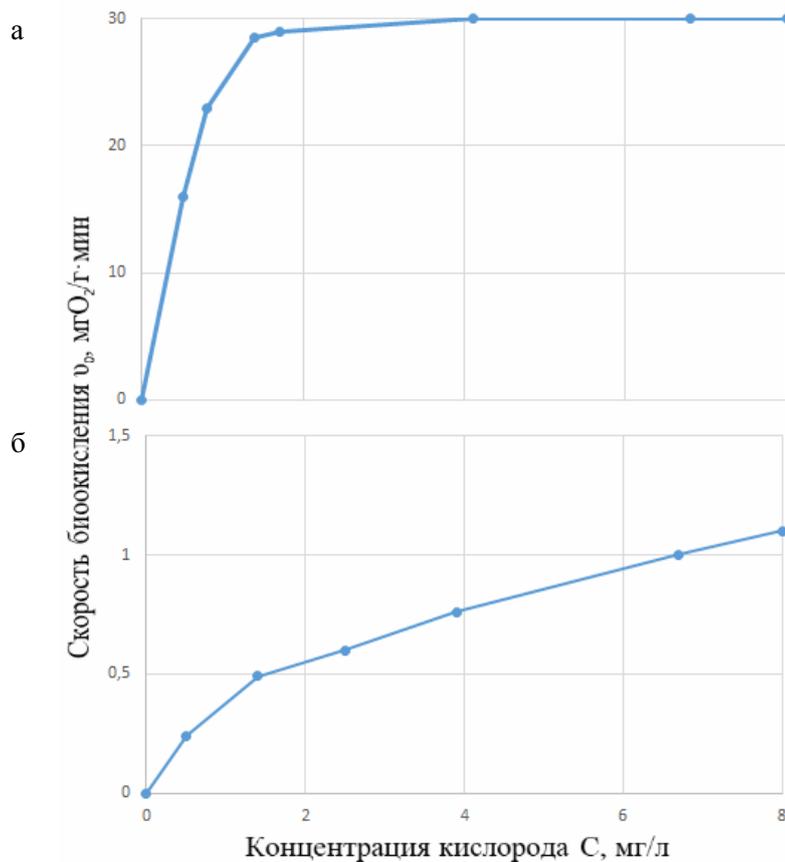


Рис. 1. Влияние концентрации кислорода на скорость биохимического окисления органических загрязнений:

а – свободноплавающие микроорганизмы; б – активный ил

В соответствии с графиками, изображенными на рис. 1, зависимость $v_{уд} = f(c)$ для свободноплавающих микроорганизмов представлена кривой с насыщением, и при концентрации кислорода в аэрационном бассейне $C = 2$ мг/л величина удельной скорости биоокисления v , мг/(г·мин), достигает своего максимального значения, а при дальнейшем повышении концентрации кислорода она изменяется незначительно.

При концентрации кислорода в аэрационном бассейне $C = 2$ мг/л скорость биоокисления органических загрязнений свободноплавающими микроорганизмами превышает в 50 раз величину скорости окисления активным илом.

На кривой линии 2 (см. рис. 1), отображающей изменение величины скорости биоокисления органических загрязнений микроорганизмами активного ила, точка перегиба отсутствует и имеет место монотонная зависимость, указывающая на то, что в данном случае величина концентрации кислорода не является лимитирующим фактором во всем исследуемом диапазоне концентраций кислорода. По этому поводу в работе М.А. Евилевича было написано следующее: «Полученные результаты хорошо согласуются с данными И.В. Скирдова об отсутствии «критической» концентрации кислорода практически во всем реализуемом диапазоне. Это однозначно подтверждает наличие значительного диффузионного сопротивления на этапах переноса кислорода к хлопку и внутри него». Здесь следует отметить, что значительное диффузионное сопротивление переноса как органических веществ, так и кислорода имеет место лишь внутри хлопка активного ила. Лимитирующей стадией является процесс внутреннего массопереноса в хлопке активного ила, происходящий в особо вязкой среде внеклеточного полимера, окружающего сообщество клонов бактериальных клеток.

Процесс внешнего массопереноса в жидкой среде аэрационного бассейна протекает относительно свободно. Формирование хлопьев активного ила является адаптационной реакцией бактериальных клеток на истощение кормовой базы (снижение концентрации органических веществ). Метаболизм бактериальных клеток внутри хлопка активного ила существенно замедляется (возникает аналогия с процессом зимней спячки у высших животных), в результате чего удельная скорость окисления органических загрязнений уменьшается почти на два порядка.

В табл. 1 приведены значения относительных скоростей окисления органических загрязнений \bar{v}_0 , определяемых как отношение удельной скорости окисления v_c , мг/(г·мин), при концентрации кислорода C , мг/л, к удельной скорости окисления v_δ , мг/(г·мин), при концентрации кислорода $C = 8$ мг/л, вычисленные по данным графиков (см. рис. 1) для свободноплавающих бактерий и активного ила.

Т а б л и ц а 1

Значения относительных скоростей окисления органических загрязнений сточных вод

Концентрация кислорода в аэрационном бассейне C , мг/л	0,5	1	1,5	2	4	6	8
Относительная скорость окисления органических загрязнений бактериальными клетками, \bar{v}_δ	0,52	0,84	0,90	0,97	1	1	1
Относительная скорость окисления органических загрязнений активным илом, $\bar{v}_и$	0,23	0,41	0,45	0,55	0,72	0,81	1

В табл. 2 приведены значения: удельных максимальных скоростей окисления органических загрязнений беззольным веществом активного ила ρ'_{max} , вычисленных по формуле (5), константы Михаэлиса, рассчитанной по формуле (6), удельной

скорости окисления $\rho_{\text{вых}}$ при $L_{\text{вых}} = 15$ мг/л, определенной по формуле (2) при концентрации кислорода в иловой смеси C_0 , относительных скоростей окисления $\bar{\rho}$.

Т а б л и ц а 2

Значения удельных максимальных скоростей окисления органических загрязнений сточных вод

Концентрация кислорода в аэрационном бассейне C , мг/л	0,5	1	1,5	2	4	6	8
$\rho'_{\text{max}} = \rho_{\text{max}} \frac{C_0}{C_0 - K_0} \frac{1}{1 + \varphi\alpha}$, мг/(г·ч)	33,2	49,9	52,7	56,8	64,5	67,6	69,5
$K_m = K_L \frac{L_0}{C_0 + K_0}$, мг/л	14,7	20,3	23,3	25,1	28,5	29,9	30,6
$\rho_{\text{вых}} = \rho'_{\text{max}} \frac{L_{\text{вых}}}{L_{\text{вых}} + K_m}$, мг/(г·ч)	16,8	19,5	20,6	21,2	22,2	22,6	22,8
$\bar{\rho}_{\text{вых}} = \frac{\rho_{\text{вых}}}{\rho_{\text{вых.8}}}$, мг/(г·ч)	0,74	0,86	0,90	0,93	0,97	0,99	1,00
$\rho_{\text{вых.и}} = \rho'_{\text{max}} \frac{L_{\text{вых}}}{L_{\text{вых}} + K_m}$, мг/(г·ч) при $K_m = 30,6$ мг/л = const	10,9	15,1	17,3	18,7	21,2	22,2	22,8
$\bar{\rho}_{\text{вых}} = \frac{\rho_{\text{вых}}}{\rho_{\text{вых.8}}}$, мг/(г·ч)	0,48	0,66	0,76	0,82	0,93	0,97	1

Данные, представленные в табл. 1 и 2, свидетельствуют о том, что уравнение бисубстратной реакции (2) (формула СНИП), в соответствии с которым величина константы Михаэлиса K_m зависит от концентрации кислорода C_0 , описывает случай биохимического окисления органических загрязнений свободноплавающими бактериальными клетками (относительная скорость окисления загрязнений бактериальными клетками $\bar{\rho}_8$ при повышении концентрации кислорода C с 1 до 8 мг/л увеличивается с 0,84 до 1,0, при этом относительная скорость $\rho_{\text{вых.б}}$ – с 0,86 до 1,0). Допущение о том, что коэффициент Михаэлиса имеет постоянную величину $K_m = \text{const}$, позволяет более корректно описать процесс биохимического окисления органических загрязнений микроорганизмами активного ила. Протекает процесс, при котором имеет место существенная величина диффузного сопротивления внеклеточного вещества активного ила (лимитирующая стадия внутреннего массопереноса), вследствие чего наблюдается монотонная зависимость повышения скорости окисления при увеличении концентрации кислорода и отсутствует точка перегиба.

В качестве отдельных клеток окислителей органических загрязнений высококонцентрированных производственных сточных вод могут быть использованы штаммы дрожжей, которые имеют следующие преимущества по сравнению с биоценозом активного ила:

1) значительно большая величина удельной скорости окисления органических загрязнений;

2) наличие в сточных водах грубодисперсных и коллоидных загрязнений не снижает интенсивность процесса биохимического окисления органических веществ дрожжевыми клетками. В процессе традиционной биохимической очистки сточных вод, содержащих органические вещества, находящиеся в форме дисперсных частиц, они сорбируются внутри хлопка ила, в результате чего скорость окисления снижается и требуется регенерация активного ила;

3) быстрый прирост биомассы дрожжей в процессе биохимической очистки (в процессе их культивирования).

В работе Ксенофонтова Б.С. «Очистка сточных вод: флотация и сгущение осадков» приводятся сведения о том, число клеток промышленного штамма дрожжей *Candidaguilliermondii* в 1 мл увеличилось за время культивирования $T = 1,6$ часа с начального количества $N = 1,2 \cdot 10^5$ штук в два раза. При использовании адаптированной культуры период удваивания биомассы дрожжей может быть уменьшен до $T = 0,5$ часа. Непродолжительный период увеличения биомассы дрожжевой культуры позволяет отказаться от технологического приема отделения клеток микроорганизмов от очищенных сточных вод и их возврата в аэрационный бассейн.

Предполагается следующая технологическая схема предварительной биологической очистки высококонцентрированных сточных вод, предусматривающая использование свободноплавающих штаммов дрожжей (рис. 2).

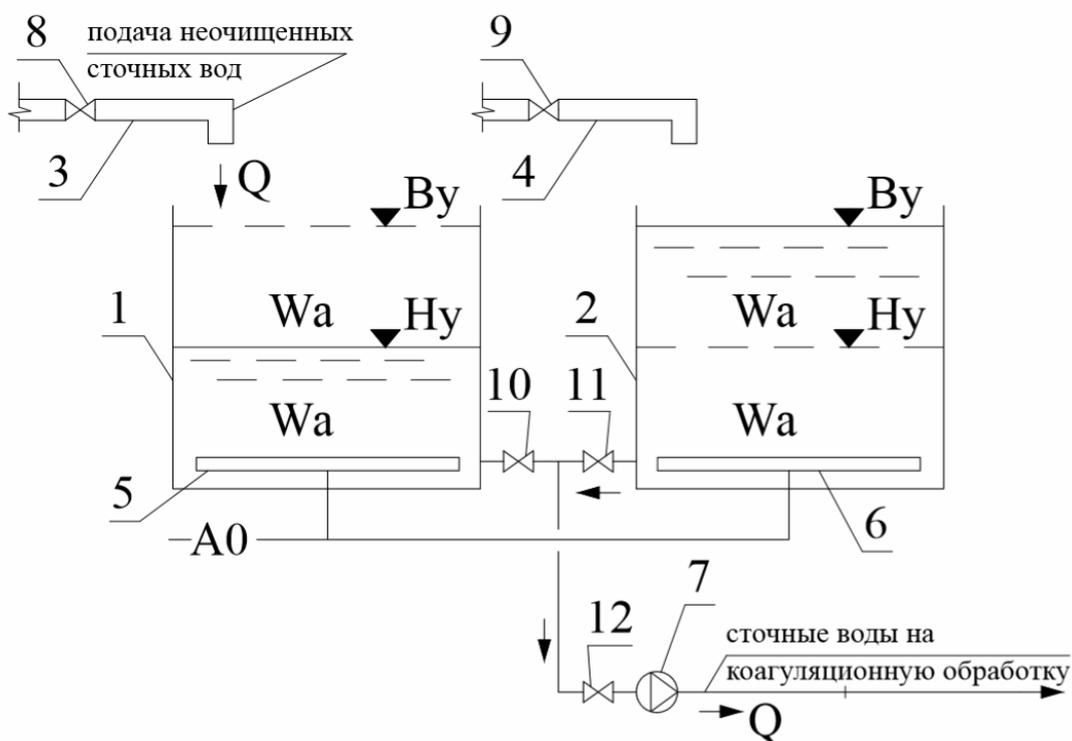


Рис. 2. Технологическая схема предварительной биологической очистки высококонцентрированных сточных вод, предусматривающая использование свободноплавающих штаммов дрожжей:

- 1 – циклический биореактор первой ступени; 2 – циклический биореактор второй ступени;
- 3 – трубопровод подачи сточных вод на биологическую очистку первой ступени;
- 4 – трубопровод подачи сточных вод на биологическую очистку второй ступени;
- 5, 6 – система пневматической аэрации; 7 – насос подачи сточных вод из биореактора второй ступени биологической очистки на коагуляционную обработку;
- 8, 9, 10, 11, 12 – запорная арматура

Установка предварительной биологической очистки сточных вод клетками свободноплавающих дрожжей работает следующим образом. На трубопроводе подачи сточных вод открывается задвижка 8, и сточные воды подаются в циклический биореактор (циклотенк) первой ступени очистки 1. Расход подаваемых сточных вод поддерживается на уровне Q ($\text{м}^3/\text{ч}$).

В биореакторе 1 работает система пневматической аэрации 5. Уровень жидкости в биореакторе 1 находится на отметке ∇H_1 (м), обеспечивающей величину объема обрабатываемых сточных вод W_a (м^3), в котором содержатся свободноплавающие

клетки дрожжей с концентрацией a (г/л). Одновременно с открытием задвижки 8 открываются задвижки 11 и 12, и насос 7 подает сточные воды, прошедшие биологическую очистку, на коагуляционную обработку с расходом Q (м³/ч). В результате коагуляционной обработки в процессе флотации или отстаивания сточных вод отделяются коллоидные и грубодисперсные загрязнения. Растворенные органические загрязнения были предварительно окислены в процессе предварительной биологической очистки.

Перед моментом открытия задвижек 11 и 12 уровень жидкости в биореакторе второй ступени находится на отметке ∇B_y , в систему пневматической аэрации 6 постоянно поступает сжатый воздух. Через некоторое время $\Delta T_{(2)}$ уровень жидкости в биореакторе 2 опускается до отметки ∇H_y , концентрация клеток свободноплавающих дрожжей в нем будет составлять a (г/л). Уровень жидкости в биореакторе первой ступени 1 поднимется до отметки ∇B_y . После этого задвижка 8 на трубопроводе подачи сточных вод закрывается и открывается задвижка 9. Биореактор второй ступени 2 выводится в режим работы биореактора первой ступени, а биореактор первой ступени 1 выводится в режим работы биореактора второй ступени биологической очистки.

Проведенные аналитические исследования закономерностей процесса биохимического окисления органических загрязнений сточных вод аэробными микроорганизмами позволили сделать следующие выводы:

1. Значительное диффузионное сопротивление в процессе массопередачи кислорода внутри вязкой среды внеклеточного полимера хлопка активного ила определяет независимость величины константы Михаэлиса K_m от концентрации кислорода в аэрационном бассейне C_0 .

2. Величина удельной скорости окисления органических загрязнений сточных вод свободноплавающими в аэрационном объеме аэробными микроорганизмами на порядок превышают величину удельной скорости окисления органических загрязнений активным илом.

3. Наличие в сточных водах грубодисперсных и коллоидных загрязнений не снижает интенсивность процесса биохимического окисления органических загрязнений сточных вод свободноплавающими в аэрационном объеме аэробными микроорганизмами.

4. Непродолжительный период удвоения биомассы свободноплавающих в аэрационном объеме аэробных микроорганизмов позволяет отказаться от технологического приема отделения клеток микроорганизмов от очищенных сточных вод и их возврата в аэрационный бассейн, что значительно упрощает процесс биологической очистки.

Список литературы

1. Хенце, М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М.Хенце. – М.: Мир, 2009. – 480 с.
2. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации работы станции биологической очистки сточных вод с использованием перемешивающих эрлифтных устройств / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, И.А. Гаркина // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1. – С. 90–98.
3. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование процессов очистки сточных вод в аэротенках / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, В.Г. Камбург // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №2. – С. 114–120.

References

1. Henze, M. Wastewater treatment. Biological and chemical processes / M.Henze. – М.: Mir, 2009. – 480 p.

2. Andreev, S.Yu. A new technology for intensifying the operation of a biological wastewater treatment plant using mixing airlift devices / S.Yu. Andreev, B.M. Grishin, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 1. – P. 90–98.

3. Andreev, S.Yu. Mathematical modeling of wastewater treatment processes in aerotanks / S.Yu. Andreev, B.M. Grishin, V.G. Kamburg // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 2. P. 114–120.

УДК 697.921.42:628.85

DOI 10.54734/20722958_2023_1_156

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

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

Пономарева Инна Константиновна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Информационное
обеспечение управления и производства»
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

Penza State University of Architecture
and Construction

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

Eremkin Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Heat, Gas Supply
and Ventilation»
E-mail: eremkin@pguas.ru

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

Orlova Natalya Alexandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Heat 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

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ВОЗДУХА В СТОКОПРИЕМНОМ ОТВЕРСТИИ И В ЗОНЕ СВОБОДНОГО ПРОСТРАНСТВА ВЫТЯЖНОГО ЗОНТА

А.И. Ерёмкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова

Изложены технологические решения применения вытяжных зонтов для реализации задач локализации вредностей в виде копоти, сажи, влаги, углекислого газа, образующихся над открытым пламенем при сгорании свечей, размещенных на церковных подсвечниках. Впервые приведены результаты исследования полей скоростных и температурных полей от открытого пламени свечей в зоне всасывания и свободном пространстве вытяжного зонта в виде конуса с углом раскрытия 60° . Экспериментальные исследования проводились при высоте свободного пространства $h = 300$ мм.

Ключевые слова: открытый вытяжной зонт, профили скоростей и температур, зона всасывания зонта, вредности, копоть и сажа, отсасываемый воздух, свеча, зона свободного пространства, объемная концентрация вредностей, подсвечник, храм, зал богослужения, микроклимат, убранство, термоанемометр, координатник, микроанометр, пробоотборник

FORMATION OF THE AIR FLOW IN THE DRAIN HOLE AND IN THE ZONE OF FREE SPACE OF THE EXHAUST HOOD

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova

Technological solutions for the use of exhaust hoods for localization of hazards in the form of soot, soot, moisture, carbon dioxide formed by burning candles placed on church candlesticks are described. For the first time, the results of the study of the fields of velocity and temperature fields from the open flame of candles in the suction zone and the free space of the exhaust hood in the form

of a cone with an opening angle of 60° are presented. Experimental studies were carried out at the height of the free space $h = 300$ mm.

Keywords: exhaust hood, speed and temperature profiles, umbrella suction zone, soot and soot hazards, sucked air, candle, free space zone, volume concentration of hazards, candlestick, temple, worship hall, microclimate, decoration, hot-wire anemometer, coordinator, micromanometer

В настоящее время проблема климатизации в залах богослужения православных храмов, предотвращения загрязнений убранства и создания комфортных условий для прихожан и персонала является актуальной задачей. Основной причиной загрязнений вредностями, образующимися при сгорании церковных свечей, является отсутствие специальных исследований комплексного формирования вентиляционных вытяжных конвективных потоков, возникающих над источником горения свечей, и использования устройств для улавливания и удаления вредных веществ от источника в местах их образования.

Авторами статьи обобщены результаты исследования российских ученых, работающих над проблемой применения вытяжных зонтов для удаления вредностей: С.Е. Бутакова, В.В. Батурина, В.Н. Талиева, И.А. Шепелева, В.М. Эльтермана, В.Н. Посохина, В.Я. Меклера, Т.А. Фиолковского, А.А. Рымкевича, П.И. Дячека, В.А. Пухкала, В.А. Сотникова, В.Н. Богословского, П.И. Килина, И.Г. Старовойрова, А.Э. Захаревича и др. Изученный опыт использовался применительно к решению проблемы локализации вредностей, образующихся над пламенем при сгорании свечей, используемых в православных храмах в процессе богослужения.

На экспериментальном стенде (рис. 1) были проведены исследования процесса формирования теплового загрязненного воздушного потока над подсвечником с горящими свечами при свободном пространстве $h_{\text{сн}} = 300$ мм с целью определения области стабильного потока всасывания и оптимальной высоты установки зонта над подсвечником $h_{\text{зп}}$, мм.

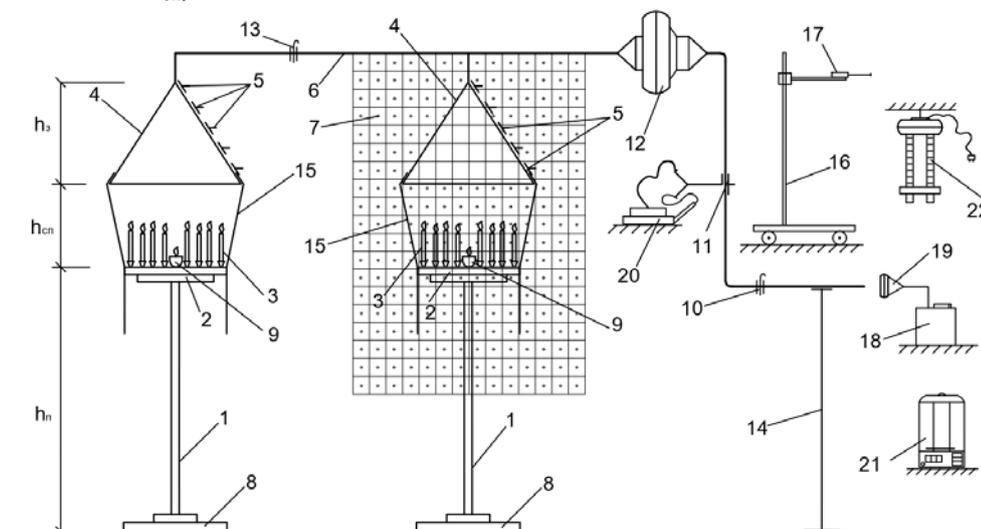


Рис. 1. Разработанный авторами экспериментальный стенд системы местной вытяжной вентиляции с удалением загрязненного воздуха с помощью зонтов из верхней зоны: 1 – стойка подсвечника; 2 – столешница; 3 – свеча; 4 – вытяжной зонт; 5 – отверстие для измерения скорости, температуры и полного давления внутри зонта; 6 – воздуховод; 7 – условная координатная сетка; 8 – основание подсвечника; 9 – лампада; 10 – шибер; 11 – отверстие для измерения скорости воздуха в воздуховоде; 12 – канальный вентилятор; 13 – шибер; 14 – подставка для вентилятора; 15 – крепление вытяжного зонта со столешницей; 16 – стойка координатника; 17 – штанга для крепления термоанемометра; 18, 19 – пробоотборник; 20 – микромонитор с фильтродержателем; 21 – электронные весы; 22 – психрометр

Фотофиксация элементов экспериментального стенда, применяемого оборудования и приборов представлена на рис. 2.



Рис. 2. Фотофиксация элементов стенда

Описание экспериментального стенда, программа и методика проведения экспериментальных исследований температурных и скоростных полей в зоне всасывающего отверстия и свободного пространства вытяжного зонта приведены в работе [1].

В процессе серии исследований учитывали количество удаляемого зонтом воздуха L_3 , м³/ч, силы гравитации, турбулентную диффузию копоти и сажи $q_{сп}$, мг/м³, температуру $t_{ос}$, °C, и скорость $v_{ос}$, м/с, на оси всасывания вытяжного отверстия зонта и в свободном пространстве $v_{сп}$, м/с, $t_{сп}$, °C, высоту установки вытяжного зонта над подсвечником $h_{сп}$, мм. На основе полученных результатов построены профили температурных и скоростных полей в поперечном сечении, перпендикулярном траектории потока над подсвечником в зоне свободного пространства и плоскости всасывания вытяжного зонта (рис. 3, 4, 5). Эксперименты проводились при следующих исходных данных применительно к задачам исследования: задавалась высота свободного пространства зонта $h_{сп} = 300$ мм, варьировалась заполняемость горящими свечами 25 % (см. рис. 3), 50 % (см. рис. 4), 100 % (см. рис. 5) при количестве мест установочных свечей на подсвечнике, равном 50.

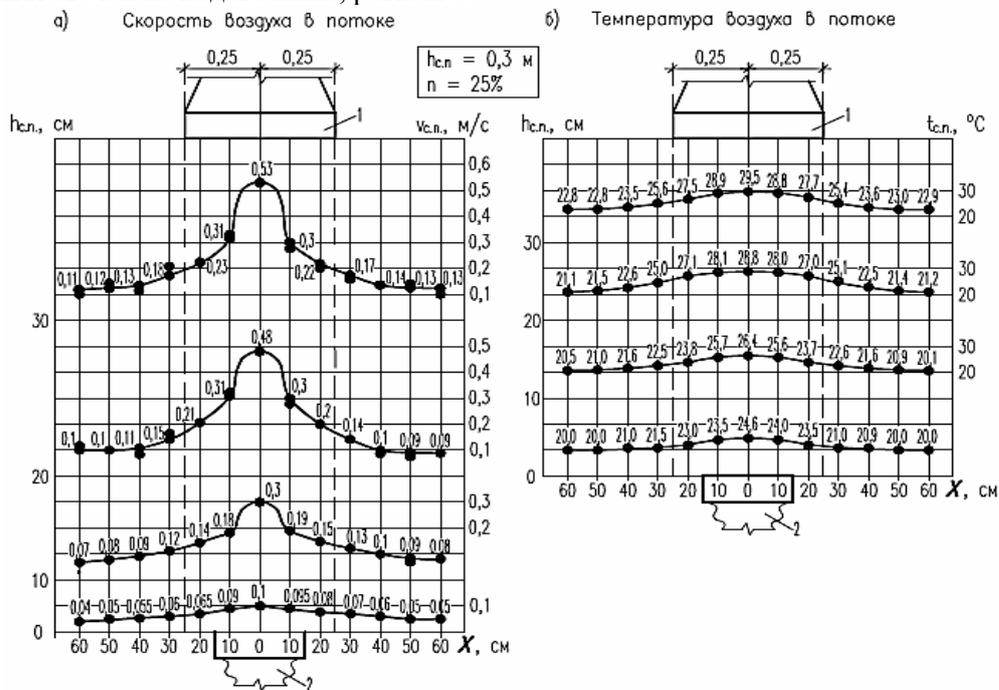


Рис. 3. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{сп} = 300$ мм открытого вытяжного зонта при количестве горящих свечей на столешне подсвечника $n=25\%$ (13 шт.):

1 – входное отверстие зонта; 2 – подсвечник

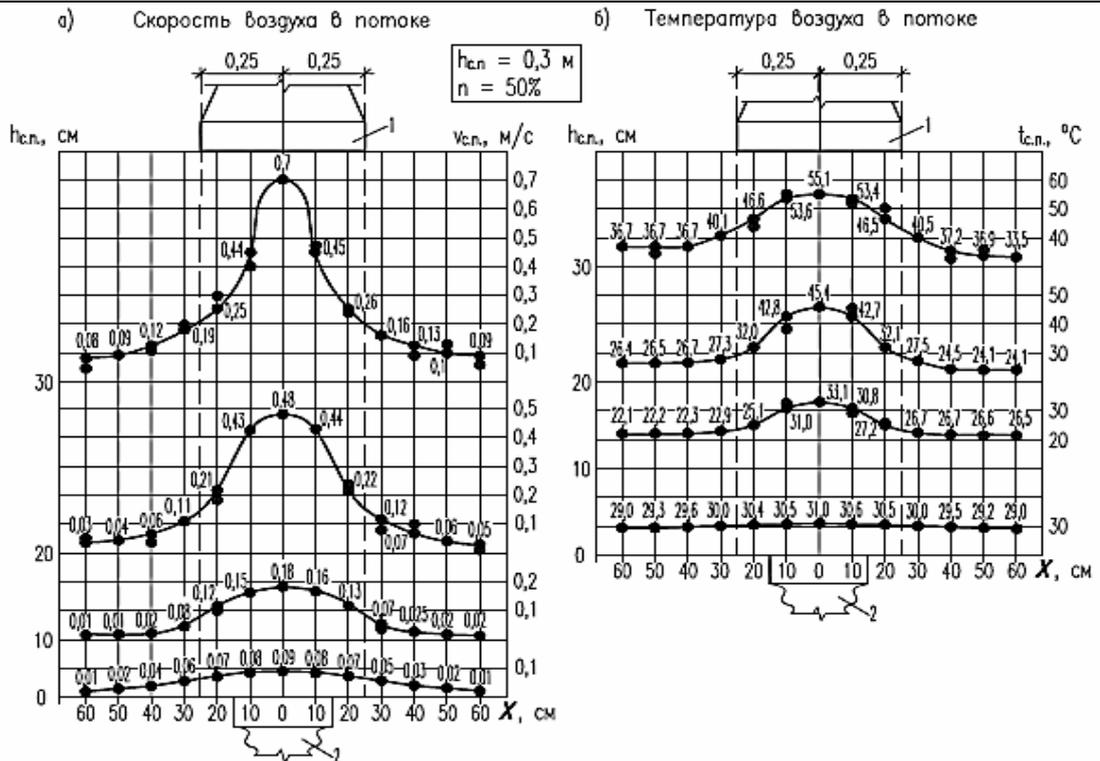


Рис. 4. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{cp} = 300$ мм открытого вытяжного зонта при количестве горящих свечей на столешне подсвечника $n=50\%$ (25 шт.):
1 – входное отверстие зонта; 2 – подсвечник

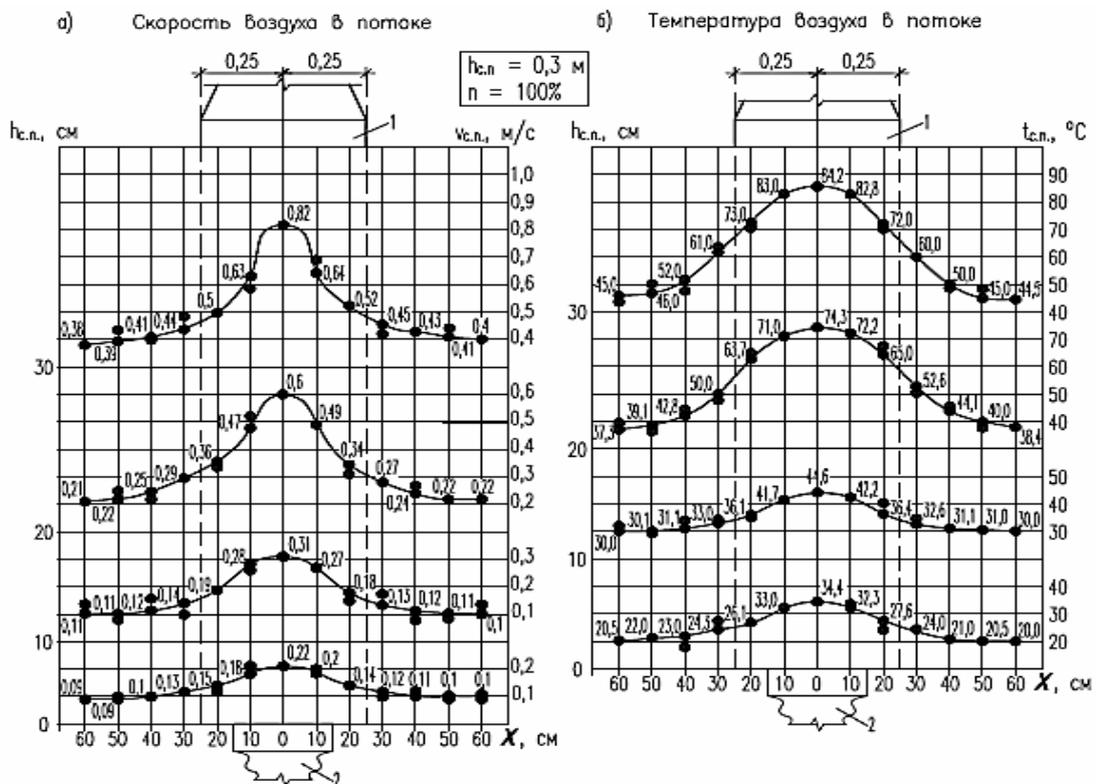


Рис. 5. Профили скоростей (а) и температур (б) воздуха в поперечном сечении всасывающего потока в зоне свободного пространства $h_{cp} = 300$ мм открытого вытяжного зонта при количестве горящих свечей на столешне подсвечника $n=100\%$ (50 шт.):
1 – входное отверстие зонта; 2 – подсвечник

Полученные экспериментальные данные профилей скоростей $v_{сп}$, м/с, и температур $t_{сп}$, °С, воздуха в поперечном сечении потока, образованного в свободном пространстве за счет теплоты горящих свечей и местной механической вытяжной вентиляции при $h_{сп} = 300$ мм и заполняемости свечами $n=25\%$ (13 шт.), приведены на рис. 2, а среднестатистические значения $v_{сп}$, м/с, $t_{сп}$, °С, – в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Среднестатистические значения скорости $v_{сп}$, м/с, и температуры $t_{сп}$, °С, в восходящем потоке при $h_{сп} = 300$ мм, $n=25\%$ (13 свечей)

X , см	60		50		40		30		20		10		0		10		20		30		40		50		60	
$h_{сп}$, см	$v_{сп}$	$t_{сп}$																								
30	0,11	22,8	0,12	22,8	0,13	23,5	0,18	25,6	0,23	27,5	0,31	28,9	0,53	29,5	0,3	28,8	0,22	27,7	0,17	25,4	0,14	23,6	0,13	23,0	0,13	22,9
20	0,1	21,1	0,1	21,5	0,11	22,6	0,15	25,0	0,21	27,1	0,31	28,1	0,48	28,8	0,30	28,0	0,2	27,0	0,14	25,1	0,1	22,5	0,09	21,4	0,09	21,2
10	0,07	20,5	0,08	21,0	0,09	21,6	0,12	22,5	0,14	23,8	0,18	25,7	0,3	26,4	0,19	25,6	0,15	23,7	0,13	22,6	0,1	21,6	0,09	20,9	0,08	20,1
0	0,03	29,5	0,04	29,6	0,04	30,0	0,05	30,7	0,055	32,4	0,06	32,5	0,06	32,9	0,06	32,6	0,055	32,3	0,05	30,6	0,04	29,9	0,04	29,5	0,03	29,4

Для сравнительного анализа полученных данных при высоте свободного пространства $h_{сп} = 300$ мм и $n=25\%$ (13 свечей) проведены исследования при наполняемости свечами $n=50\%$ (25 свечей). Значения профилей скоростей $v_{сп}$, м/с, и температур воздуха $t_{сп}$, °С, в поперечном сечении всасываемого зонтом потока приведены на рис. 4, среднестатистические значения $v_{сп}$, м/с, и $t_{сп}$, °С, – в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Среднестатистические значения скорости $v_{сп}$, м/с, и температуры $t_{сп}$, °С, в восходящем потоке при $h_{сп} = 300$ мм, $n=50\%$ (25 свечей)

X , см	60		50		40		30		20		10		0		10		20		30		40		50		60	
$h_{сп}$, см	$v_{сп}$	$t_{сп}$																								
30	0,08	36,7	0,09	36,7	0,12	36,7	0,19	40,1	0,25	46,6	0,45	53,6	0,7	55,1	0,45	53,4	0,26	46,5	0,16	40,5	0,13	37,2	0,1	36,9	0,09	33,5
20	0,03	26,4	0,04	26,5	0,06	26,7	0,11	27,3	0,21	32,0	0,43	42,8	0,48	45,4	0,44	42,7	0,22	32,1	0,12	27,5	0,07	24,5	0,06	24,1	0,05	24,1
10	0,01	22,1	0,01	22,2	0,02	22,3	0,08	22,9	0,12	25,1	0,15	31,0	0,18	33,1	0,16	30,8	0,13	27,2	0,07	26,7	0,03	26,7	0,025	26,6	0,02	26,5
0	0,01	29,0	0,02	29,3	0,04	29,6	0,06	30,0	0,07	30,4	0,08	30,5	0,09	31,0	0,08	30,6	0,07	30,5	0,05	30,0	0,03	29,5	0,02	29,2	0,01	29,0

Также проведены экспериментальные исследования для варианта высоты свободного пространства $h_{сп} = 300$ мм при заполняемости подсвечника свечами $n=100\%$ (50 свечей). Значения профилей скоростей $v_{сп}$, м/с, и температур $t_{сп}$, °С, в поперечном сечении всасываемого зонтом потока приведены на рис. 5, среднестатистические значения $v_{сп}$, м/с, и $t_{сп}$, °С, – в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Среднестатистические значения скорости $v_{сп}$, м/с, и температуры $t_{сп}$, °С, в восходящем потоке при $h_{сп} = 300$ мм, $n=100\%$ (50 свечей)

X , см	60		50		40		30		20		10		0		10		20		30		40		50		60	
$h_{сп}$, см	$v_{сп}$	$t_{сп}$																								
30	0,38	45,0	0,39	46,0	0,41	52,0	0,44	61,0	0,49	73,0	0,63	83,0	1,0	84,2	0,64	82,8	0,52	72,0	0,45	60,0	0,43	50,0	0,41	45,0	0,4	44,5
20	0,21	37,3	0,22	39,1	0,25	42,8	0,29	50,0	0,36	63,7	0,47	71,0	0,6	74,3	0,49	72,2	0,34	65,0	0,27	52,6	0,24	44,1	0,22	40,0	0,22	38,4
10	0,11	30,0	0,11	30,1	0,12	31,1	0,14	33,0	0,19	36,1	0,28	41,7	0,31	44,6	0,27	42,2	0,18	36,4	0,13	32,6	0,12	31,1	0,11	31,0	0,1	30,0
0	0,09	20,5	0,09	22,0	0,1	23,0	0,13	24,3	0,15	26,1	0,18	33,0	0,22	34,4	0,2	32,3	0,14	27,6	0,12	24,0	0,11	21,0	0,1	20,5	0,1	20,0

Авторами статьи выполнен качественный и количественный анализ полученных экспериментальных результатов в сравнении с выводами российских ученых, изучающих формирование конвективных и вентиляционных потоков, а также использование устройств для улавливания и удаления вредных веществ из помещения. Проведенный анализ позволяет сделать обобщенный вывод, что результаты серии экспериментов, представленные в виде профилей скоростей и температур (см. рис. 3, 4, 5) в поперечном сечении потока в свободном пространстве вытяжного зонтика при $h_{сп} = 300$ мм, подтверждают надежность предложенных авторами методики и программы проведения описанных экспериментов, а также достоверность полученных

результатов $v_{\text{сп}}$, м/с, $v_{\text{ос}}$, м/с, $L_{\text{сп}}$, м³/ч, L_3 , м³/ч, $v_{\text{сп}}$, м/с, $t_{\text{ос}}$, °С, $t_{\text{сп}}$, °С, $t_{\text{сп}}$, °С, $q_{\text{сп}}$, мг/м³. Анализировались высота свободного пространства $h_{\text{сп}} = 300$ мм для удаления требуемого объема воздуха зонтом L_3 , м³/ч, скорость на оси всасывающего отверстия зонта $v_{\text{ос}}$, м/с, снижение концентрации копоти и сажи в воздухе $q_{\text{сп}}$, мг/м³, и проводилась оценка комфортности условий для прихожан при постановке свечей высотой до 30 см на подсвечник в период богослужения. Аналогичные исследования, проведенные авторами при высоте зонта $h_{\text{сп}} = 400$ мм и $h_{\text{сп}} = 500$ мм, позволили выполнить сравнительный анализ всех полученных результатов.

В процессе эксперимента восходящий поток в зоне всасывания вытяжного зонта создавался за счет теплоты от горящих церковных свечей, установленных на столешне подсвечника, и местной механической вытяжной вентиляции с использованием канального вентилятора в системе зонта. В результате образовалось разрежение в плоскости всасывания зонта за счет разности между атмосферным давлением в лаборатории и давлением, создаваемым вытяжным вентилятором, а также в результате разности плотностей внутреннего и нагретого воздуха в свободном пространстве зонта. Исследования показали, что скорость воздуха конвективного потока в центре всасывающего отверстия зонта $v_{\text{ос}}$, м/с, при сгорании свечей на подсвечнике при неработающем вентиляторе в среднем составила $v_{\text{ос}} = 0,25$ м/с. Данной скорости недостаточно для эффективной работы зонта, она должна быть не менее $v_{\text{ос}} = 0,4-0,5$ м/с. Экспериментально установлена скорость воздуха в потоке $v_{\text{ос}}$, м/с, создаваемом только вытяжным вентилятором, при отсутствии горящих свечей на подсвечнике, она равна $v_{\text{ос}} = 0,49$ м/с.

При условии, когда поток в свободном пространстве зонта при $h_{\text{сп}} = 300$ мм формировался одновременно за счет конвективного потока от сгорания свечей и работы вытяжного вентилятора, скорость воздуха в центре всасывающего отверстия зонта в среднем составила $v_{\text{ос}} = 0,74$ м/с. Из полученных результатов следует, что конвективный поток от сгорания свечей способствует увеличению осевой скорости потока в зоне всасывания зонта и, как следствие, количества загрязненного воздуха, удаляемого системой местной вытяжной вентиляции. Это позволяет увеличить коэффициент эффективности улавливания вредностей при заполняемости свечей $n=25\%$, 50% , 100% .

Аэродинамические характеристики при $h_{\text{сп}} = 300$ мм, представленные на рис. 3, 4, 5 в виде профилей скоростных и температурных полей, позволяют сделать вывод, что загрязненный воздух движется к вытяжному отверстию зонта со всех сторон, в результате резко сокращается зона активного действия всасывающего факела. Снижение активности факела усугубляется еще и тем, что $h_{\text{сп}} = 300$ мм соответствует участку формирования теплового потока, где скорость и температура воздуха минимальные и поток менее стабильный и неустойчивый. Установка зонта на данном участке конвективного потока с $h_{\text{сп}} = 300$ мм нецелесообразна. Скорость воздуха на оси всасывающего отверстия зонта $v_{\text{ос}}$, м/с, изменяется от 0,82 до 0,53 м/с, в зависимости от заполняемости горящих свечей, соответственно 25 % (см. рис. 3) и 100 % (см. рис. 5).

Экспериментально установлено, что при одинаковых условиях скорость на оси плоскости всасывания зонта при $h_{\text{сп}} = 400$ мм значительно выше, чем при $h_{\text{сп}} = 300$ мм, и составляет $v_{\text{ос}} = 1,4$ м/с. Это объясняется тем, что $h_{\text{сп}} = 400$ мм соответствует высоте устойчивого и стабильного разгонного участка конвективного потока с максимальными значениями скорости и температуры воздуха. Это является главным критерием определения $h_{\text{сп}}$, мм, – высоты установки зонта над подсвечником. В данном случае эффективность улавливания вредностей зонтом будет максимальной.

Из графиков профилей скорости и температуры воздуха в плоскости всасывающего отверстия зонта, представленных на рис. 3, 4, 5, при $h_{\text{сп}} = 300$ мм следует, что по мере приближения стока к центру отверстия зонта скорость в произвольной точке возрастает в зависимости от заполняемости подсвечника горящими свечами от 0,38 до 0,82 м/с при 100 % заполняемости, от 0,18 до 0,7 м/с при 50 % заполняемости и от 0,11 до 0,53 м/с при 25 % заполняемости. Начальная температура стока ниже, чем температура внутри и на оси потока, и возрастает в зоне всасывания зонта в произвольной

точке с увеличением количества горящих свечей с 45 до 84,2 °С при 100 % заполняемости, от 36,7 до 55,1 °С при 50 % заполняемости, от 22,8 до 29,5°С при 25 % заполняемости.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что по мере приближения к центру всасывающего отверстия в плоскости всасывания зонта скорость и температура воздуха быстро растут, а по мере удаления от центра стока скорость и температура затухают и их количественные значения зависят от интенсивности теплового потока, создаваемого горящими свечами. Происходящие процессы влияют на эффективность улавливания, на величину стока и на количество воздуха, протекающего через поперечное сечение потока в зоне всасывания зонта L_3 , м³/ч. Эти условия необходимо учитывать при разработке конструкции зонта, определении $h_{сп}$, мм, и расхода воздуха для улавливания и удаления зонтом копоти и сажи, образующихся при сжигании свечей в зале богослужения.

Рассмотрим на примере, как образуется сток к потоку в свободном пространстве зонта. Из профилей скоростей $v_{сп}$, м/с, воздуха в поперечном сечении потока в зоне свободного пространства зонта при $h_{сп} = 300$ мм, приведенных при заполняемости подсвечника свечами в количестве $n=100\%$ (см. рис. 5), следует, что с увеличением расстояния от центра всасывающего отверстия зонта скорость стока уменьшается от 0,82 до 0,38 м/с и далее приближается практически к нулю или соответствует подвижности воздуха в помещении. Предполагаемая модель свободного стока к восходящему потоку в зоне свободного пространства в плоскости всасывающего круглого отверстия зонта показана на рис. 6.

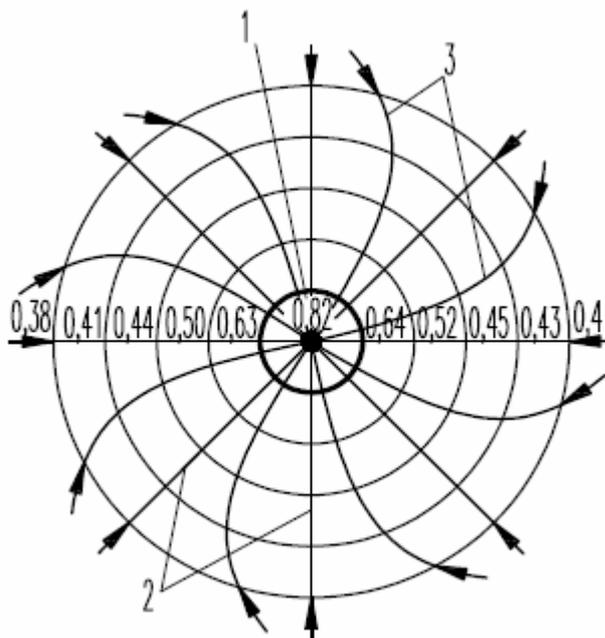


Рис. 6. Модель свободного стока к восходящему потоку в плоскости всасывающего круглого отверстия зонта:
1 – отверстие зонта; 2 – линии стока, 3 – линии сферической поверхности

Линии стока – это пространственный воздушный поток, устремленный в виде прямой линии к месту всасывания потока. Из анализа модели стока следует, что воздух со всех сторон устремляется к линии поглощения потока, т.е. к отверстию зонта. Точки с одинаковыми значениями скорости образуют сферическую, цилиндрическую или пространственную поверхность. Производительность стока $L_{сп}$, м³/ч, допускается определять в зависимости от площади внешней поверхности цилиндра, сферы и диаметра входного отверстия зонта.

В случае свободного стока в зоне свободного пространства при любых вариантах $h_{\text{сп}}$, мм, зонта скорость движения воздуха v_3 , м/с, пропорциональна расходу и обратно пропорциональна квадрату расстояния до центра стока и выражается уравнением неразрывности:

$$v_3 = \frac{L_3}{4\pi r_x^2}, \quad (1)$$

где L_3 – секундный расход воздуха, удаляемого зонтом, м³/с; r_x – расстояние от произвольной точки в плоскости всасывания до центра всасывающего отверстия зонта, м; $4\pi r_x^2$ – поверхность сферы свободного стока в зоне свободного пространства с радиусом r_x , м².

Формула (1) универсальная и позволяет рассчитать секундный расход воздуха $L_{\text{сп}}$, м³/с, проходящего через всасывающее отверстие зонта диаметром d_3 , м, площадью $\pi d_3^2/4$, м², по формуле

$$L_3 = \frac{\pi d_3^2}{4} v_3. \quad (2)$$

Можно определить на расстоянии r_x , м, от центра всасывающего отверстия зонта скорость движения воздуха в плоскости всасывания v_x , м/с, из уравнения

$$r_x = \sqrt{\frac{L_3}{4\pi v_x}}. \quad (3)$$

Существуют и другие методы, методики и математические аппараты и формулы для определения v_3 , L_3 , r_x для различных поверхностей сфер и геометрических форм. При этом установлено, что полученные значения скорости значительно различаются при разных методах расчета. Это затрудняет получение достоверных данных для выполнения расчетов системы местной вытяжной вентиляции с использованием зонтов для улавливания и удаления копоти и сажи при сгорании свечей в зале богослужения.

Достоверность результатов экспериментальных данных, представленных в виде профилей скоростей в плоскости всасывающего отверстия зонта (см. рис. 3, 4, 5), при изотермических условиях отсутствия горящих свечей с достаточной точностью подтверждается расчетами v_3 , м/с, L_3 , м³/с, r_x , м², произведенными по формулам (1), (2), (3). Установлено, что при нестационарных условиях количество воздуха, протекающего через поперечное сечение потока в зоне всасывающего отверстия зонта, возрастает с увеличением количества горящих свечей на подсвечнике.

При заполняемости свечей $n=25\%$ $L_3 = 150$ м³/ч и возрастает до $L_3 = 220$ м³/ч при $n=100\%$. Это происходит за счет увеличения теплового потока от горящих свечей и, как следствие, роста скорости в сечении зонта v_3 , м/с. Изменение расхода воздуха в зависимости от количества горящих свечей на подсвечнике необходимо учитывать при оптимизации производительности местной вытяжной механической вентиляции с применением зонтов для улавливания и удаления копоти и сажи, образующихся при сгорании свечей в зале богослужения.

Для рассматриваемого случая свободного пространства $h_{\text{сп}} = 300$ мм скорость движения воздуха на оси всасывающего отверстия зонта диаметром $d_3 = 500$ мм составляет при $n=100\%$ $v_{\text{ос}} = 0,82$ м/с. По мере удаления от центра до края кромки зонта справа и слева скорость уменьшается соответственно до $v_x = 0,49$ м/с и $v_x = 0,47$ м/с. Средняя скорость в зоне всасывания зонта составляет $v_{\text{сп}} = 0,6$ м/с и несколько отличается от $v_{\text{ос}} = 0,82$ м/с за счет неравномерного расположения свечей, их высоты, а также неравномерности горения. При расчете местной вытяжной вентиляции необходимо применять усредненное количество заполняемости свечей $n=50\%$ при любом количестве установочных мест на подсвечнике.

Экспериментально установлено (см. рис. 3, 4, 5), что с увеличением расстояния от центра плоскости всасывающего отверстия зонта скорость стока плавно уменьшается. Данную закономерность подтверждают профили скоростей воздушного потока в плоскости отверстия всасывания зонта при $h_{сн} = 300$ мм и заполняемости подсвечника свечами $n=25\%$, 50% , 100% (рис. 7, а, б, в).

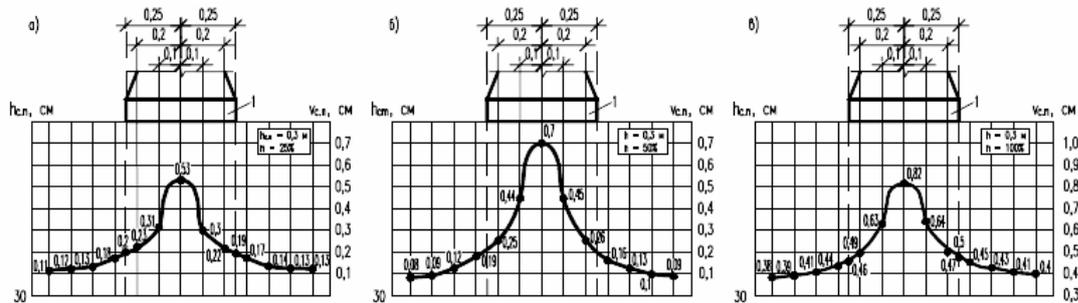


Рис. 7. Графики профилей скорости воздуха $v_{сн}$, м/с, в поперечном сечении в плоскости всасывающего отверстия зонта диаметром 500 мм:
а – при $n=25\%$; б – при $n=50\%$; в – при $n=100\%$; 1 – входное отверстие зонта

Графики, отражающие закономерность изменения скорости воздуха в плоскости всасывающего отверстия зонта в безразмерной форме v_x/v_{oc} на произвольном расстоянии от оси всасывания x/r при x , мм, и радиусе зонта $r=250$ мм ($d_3=500$ мм) при разной заполняемости подсвечника свечами $n=25\%$, 50% , 100% , представлены на рис. 8 (а,б,в).

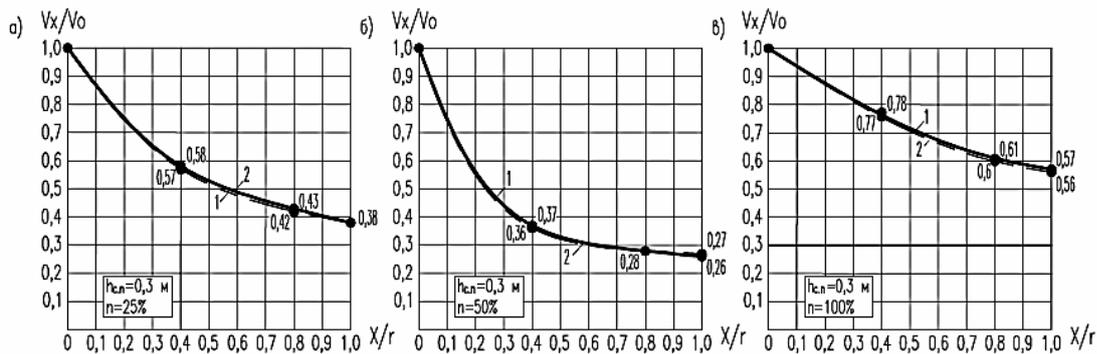


Рис. 8. Графики изменения скорости воздуха в безразмерной форме в плоскости круглого всасывающего отверстия зонта диаметром 500 мм:
а – при $n=25\%$; б – при $n=50\%$; в – при $n=100\%$;
1 – график скорости воздуха справа от оси зонта;
2 – график скорости воздуха слева от оси зонта

Качественный анализ графиков в безразмерной форме, приведенных на рис. 8,а,б,в, при $h_{сн} = 300$ мм позволяет сделать выводы, что при всех вариантах заполняемости свечей n , %, скорость воздуха в зоне всасывания зонта плавно уменьшается при v_x/v_{oc} до 0,24, при v_x/v_{oc} до 0,26, при v_x/v_{oc} до 0,46. Расчетом установлено, что средняя скорость в зоне всасывания зонта составляет $v_{ср} = 0,6$ м/с при $h_{сн} = 300$ мм, $v_{ср} = 0,85$ м/с при $h_{сн} = 400$ мм, что позволяет обеспечить удаление вредных от сгорания свечей. Хотя расстояние $h_{сн} = 300$ мм усложняет прихожанам процедуру постановки свечей на подсвечник.

Проводилась серия экспериментов по изучению влияния количества сгораемых свечей на подсвечнике n , %, на параметры воздуха в свободном пространстве в зоне всасывания зонта $t_{сн}$, °C, $v_{сн}$ м/с, L_3 , м³/ч, $q_{сн}$, мг/м³. Полученные результаты приведены на рис. 9.

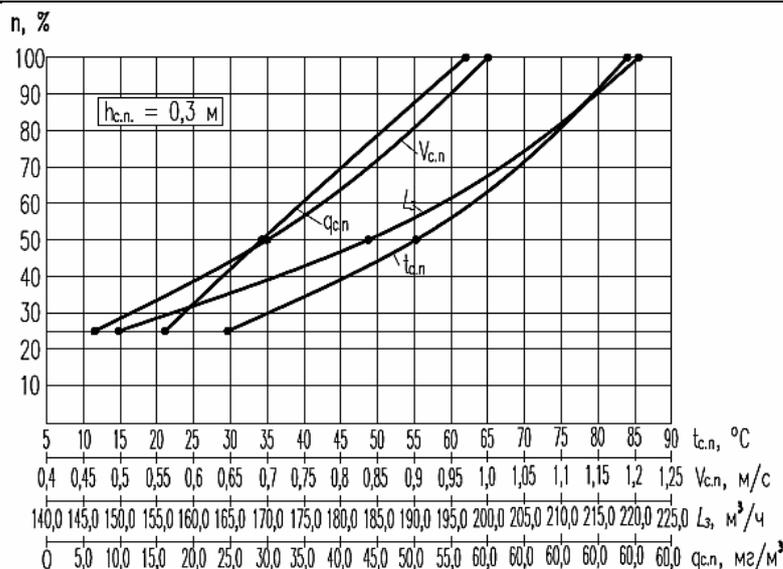


Рис. 9. Графики изменения параметров воздуха в зоне всасывания зонта в зависимости от количества сгораемых свечей n , % на подсвечнике:

$h_{cп}$ – высота свободного пространства, мм; $v_{cп}$ – скорость воздуха в зоне всасывания, м/с;
 $t_{cп}$ – температура воздуха в зоне всасывания, °С; $q_{cп}$ – объемная концентрация копоти и сажи в воздушном потоке, мг/м³; L_3 – объем воздуха, удаляемого зонтом, м³/ч

Анализ графиков, приведенных на рис. 9, позволяет сделать вывод, что с увеличением заполняемости сжигаемыми свечами подсвечника от 25 до 100 % резко возрастает поступление теплоты в свободное пространство зонта.

В результате архимедовой силы увеличивается общий импульс восходящего потока, что приводит к росту скорости $v_{cп}$, температуры $t_{cп}$, объемной концентрации копоти и сажи $q_{cп}$, а также воздуха, удаляемого зонтом L_3 . Эти особенности являются положительными, и необходимо их учитывать при проектировании эффективной местной системы вытяжной вентиляции с использованием зонтов для локализации вредностей при сгорании свечей. Важно отметить, что рост объемной концентрации копоти и сажи в свободном пространстве зонта является отрицательным фактором и зависит от количества сжигаемых свечей.

Для комплексной оценки влияния различных факторов на эффективность улавливания и удаления вредностей вытяжным зонтом в системе местной вытяжной вентиляции проведена серия лабораторных и натурных исследований. В процессе экспериментов рассматривались различные варианты установки высоты вытяжного зонта над подсвечником $h_{cп}$, мм, в пределах 300 мм, 400 мм, 500 мм. Данные высоты принимались с учетом характерных участков конвективного потока, образованного от теплоты горящих свечей, удобства для прихожан при размещении свечей на подсвечнике, размера вытяжного зонта и интерьера зала богослужения. В зависимости от вариантов $h_{cп}$, мм, анализировались изменения скорости $v_{cп}$, м/с, температуры $t_{cп}$, °С, расход воздуха L_3 , м³/ч, и объемная концентрация копоти и сажи $q_{cп}$, мг/м³, в зоне свободного пространства между нижней кромкой зонта и подсвечником. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 10.

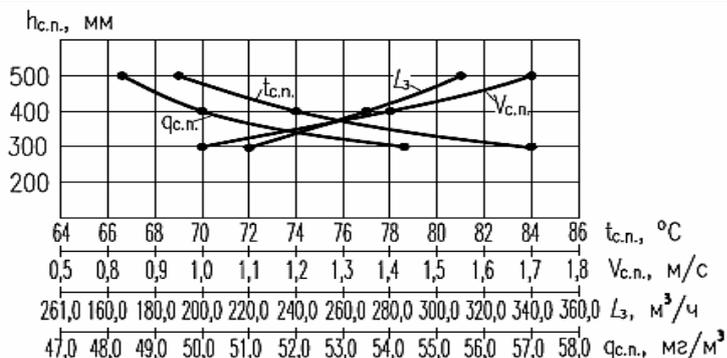


Рис. 10. Графики изменения параметров воздуха в зоне всасывания зонта в зависимости от высоты установки $h_{сп}$, мм, зонта над подсвечником:
 $v_{сп}$ – скорость воздуха в зоне всасывания, м/с; $t_{сп}$ – температура воздуха в зоне всасывания, $^\circ\text{C}$;
 $q_{сп}$ – объемная концентрация копоти и сажи в воздушном потоке, мг/м^3 ;
 $L_з$ – объем воздуха, удаляемого зонтом, $\text{м}^3/\text{ч}$

Известно, что воздух к вытяжному отверстию свободно устанавливаемого зонта движется со всех сторон и в зависимости от высоты свободного пространства $h_{сп}$, мм, изменяется объем подтекаемого из помещения воздуха (стока) к восходящему потоку в зоне всасывания. Анализ приведенных графиков (см. рисунок 10) показывает, что с увеличением $h_{сп}$, мм, наблюдается значительный рост объемного расхода $L_з$, $\text{м}^3/\text{ч}$, воздуха в потоке и $v_{сп}$, м/с, в зоне всасывания, что является положительным процессом. В то же время выявлено снижение температуры $t_{сп}$, $^\circ\text{C}$, и объемной концентрации сажи и копоти $q_{сп}$, мг/м^3 , в свободном пространстве зонта за счет их разбавления стоком в зоне всасывания.

С учетом разных положительных факторов доказано, что наилучшим результатом по уменьшению объемной концентрации копоти и сажи является применение высоты установки зонта $h_{сп} = 400$ мм при производительности зонта $L_з$ от 270 до 450 $\text{м}^3/\text{ч}$. При этом объемная концентрация копоти и сажи на всасывающей стороне зонта при 100 % заполняемости свечей $q_{сп} = 54,3$ мг/м^3 , а на выходе из системы местной вытяжной вентиляции $q_{сп} = 48,4$ мг/м^3 , разница составляет около 11 %. Это объясняется частичным налипанием копоти и сажи на поверхностях зонта и системы местной вытяжной вентиляции, а также турбулентной диффузией данных вредностей в сторону помещения и их ассимиляцией в потоке удаляемого зонтом воздуха.

Полученные теоретические и экспериментальные данные позволяют авторам сделать следующие **выводы**:

1. Проведенный анализ систем климатизации в храмах, соборах, церквях позволяет сделать вывод, что в залах богослужения отсутствуют системы локализации вредностей, образующихся при сгорании свечей на подсвечниках.

2. Предложена местная вытяжная механическая система вентиляции с использованием зонтов над подсвечниками для улавливания и удаления вредностей от сгорания свечей.

3. Построены профили температурных и скоростных полей в поперечном сечении в зоне свободного пространства и плоскости всасывания зонта при высоте установки зонта над подсвечником 300 мм и различной заполняемости подсвечника горящими свечами – 25 %, 50 %, 100 %.

4. Экспериментально подтверждено, что по мере приближения потока воздуха к центру всасывающего отверстия зонта скорость и температура воздуха резко возрастают, а по мере удаления от центра стока скорость и температура затухают до значений параметров воздуха помещения.

5. Авторами установлено, что поток воздуха в свободном пространстве в зоне всасывания формируется одновременно за счет теплоты от сгорания свечей и работы вытяжного вентилятора. При этом конвективный поток от сгорания свечей способствует увеличению скорости потока в зоне всасывания и количества воздуха, удаляемого вытяжным вентилятором.

6. Рекомендуется для эффективного улавливания загрязнений высоту установки зонта над подсвечником предусматривать на участке разгона конвективного потока от сгорания свечей в зоне «шейки» потока, где высокая скорость и устойчивое состояние потока воздуха.

7. Исследования подтверждают зависимости параметров воздуха в потоке от количества сгораемых свечей на подсвечнике. С увеличением числа сжигаемых свечей возрастает импульс теплового потока, происходит рост скорости и температуры воздуха в потоке, объемной концентрации копоти и сажи и количество воздуха, удаляемого зонтом.

8. Установлены изменения параметров воздуха в потоке в зоне всасывания зонта в зависимости от изменения высоты установки зонта над подсвечником. С увеличением высоты установки наблюдается рост скорости и расхода воздуха в потоке, снижение температуры и объемной концентрации копоти и сажи в свободном пространстве зонта за счет разбавления стоком.

Список литературы

1. Еремкин, А.И. Методика и программа экспериментальных исследований температурных и скоростных полей в зоне всасывающего отверстия вытяжного зонта / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4. – С. 132–139.

2. Боровицкий, А.А. Исследования закономерностей взаимодействия воздушных потоков в вытяжном зонте / А.А. Боровицкий, С.В. Угарова // Актуальные проблемы современного строительства: межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – С.55–58.

3. Еремкин, А.И. Влияние санитарно-гигиенического состояния микроклимата в залах богослужения православных соборов на физиологическое состояние прихожан / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, А.Г. Багдасарян // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2020. – № 6. – С. 151–156.

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

5. Еремкин, А.И. Совершенствование систем климатического обеспечения комфортных условий и сохранности историко-культурного наследия в православных культовых сооружениях / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, Д.А. Трофимов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 4. – С. 36–45.

6. Eremkin, A.I. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012005.

7. Еремкин, А.И. Инженерные системы поддержания микроклимата православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – № 1. – С. 87–91.

8. Еремкин, А.И. Комплексное решение локализации загрязнений в процессе сгорания церковных свечей в православных сооружениях / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, Н.А. Орлова, А.А. Мишин, А.В. Мочалов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2. – С. 104–116.

9. Рогова, Т.Н. Влияние турбулентной диффузии газов на расчет объемов удаляемого воздуха / Т.Н. Рогова // Мир транспорта. – 2006. – № 1. – С. 16–21.

10. Килин, П.И. Расчет и устройство вытяжных зонтов / П.И. Килин, Т.Н. Рогова. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – 71 с.

11. Позин, Г.М. Местная вытяжная вентиляция – самый эффективный способ организации воздухообмена в помещении / Г.М. Позин // Инженерные системы. – 2008. – № 3. – С. 40–45.

12. Сотников, А.Г. Теоретически-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции / А.Г. Сотников, А.А. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2. – С. 54–59.
13. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. – М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.
14. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978 – 144 с.

References

1. Eremkin, A.I. Methodology and program of experimental studies of temperature and velocity fields in the zone of the suction opening of the exhaust hood / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, N.A. Orlova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4. – P. 132–139.
2. Borovitsky, A.A. Studies of the laws of interaction of air flows in the exhaust hood / A.A. Borovitsky, S.V. Ugarova // Actual problems of modern construction: interuniversity. Sat. scientific tr. – SPb.: SPbGASU, 2010. – P.55–58.
3. Eremkin, A.I. Influence of the sanitary-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. Innovations. – 2020. – No. 6. – P. 151–156.
4. 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, I.K. Ponomareva, V.A. Leontiev, K.A. Petrova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1. – P. 195–202.
5. Eremkin, A.I. Improving the systems of climatic support for comfortable conditions and the preservation of historical and cultural heritage in / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, D.A. Trofimov // Orthodox religious buildings. Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2021. – No. 4. – P. 36–45.
6. Eremkin, A.I. Analysis of the microclimate of the halls of worship / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012005.
7. Eremkin, A.I. Engineering systems for maintaining the microclimate of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova // Education and science in the modern world. Innovations – 2021. – No. 1. – P. 87–91.
8. Eremkin, A.I. comprehensive solution for the localization of pollution during the 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 // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2. – P. 104–116.
9. Rogova, T.N. Influence of turbulent diffusion of gases on the calculation of volumes of removed air / T.N. Rogova // Mir transporta. – 2006. – No. 1. – P. 16–21.
10. Kilin, P.I. Calculation and arrangement of exhaust hoods / P.I. Kilin, T.N. Rogova. – Ekaterinburg.: UrGUPS, 2005. – 71 p.
11. Pozin, G.M. Local exhaust ventilation is the most efficient way to organize indoor air exchange / G.M. Pozin // Engineering Systems. – 2008. – No. 3. – P. 40–45.
12. Sotnikov, A.G. Theoretical and experimental substantiation of the method for optimizing air exchanges in industrial ventilation systems / A.G. Sotnikov, A.A. Borovitsky // Civil Engineering Journal. – 2012. – No. 2. – P. 54–59.
13. Taliev, V.N. Aerodynamic ventilation / V.N. Taliev. – М.: Stroyizdat, 1979. – 295 p.
14. Shepelev, I.A. Aerodynamics of air flows in the room / I.A. Shepelev. – М.: Stroyizdat, 1978. – 144 p.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 711.523-042.2

DOI 10.54734/20722958_2023_1_169

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Мирхасанов Рустем Фаритович,
старший преподаватель кафедры «Дизайн
и национальные искусства»
E-mail: rystem69@mail.ru

Садков Вадим Анатольевич,
доктор искусствоведения, профессор,
главный научный сотрудник НИЛ
«Вычислительный дизайн и цифровое
производство»
E-mail: vsadkov@gmail.com

Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Конструктивно-
дизайнерское проектирование»
E-mail: l.sabitov@bk.ru

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

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

Бочарова Юлия Васильевна,
старший преподаватель кафедры «Дизайн
и ХПИ»
E-mail: iulia1908@mail.ru

Kazan (Volga Region) Federal University

Russia, Kazan, st. Kremlin, d. 18

Mirkhasanov Rustem Faritovich,
Senior Lecturer of the Department of «Structural
engineering and design»
E-mail: rystem69@mail.ru

Sadkov Vadim Anatolievich,
Doctor of Art History, Professor,
Chief Researcher, Research Laboratory
«Computational Design and Digital
Manufacturing»
E-mail: vsadkov@gmail.com

Sabitov Linar Salikhzanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Structural Engineering and
Design»
E-mail: l.sabitov@bk.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Bocharova Yulia Vasilievna,
Senior Lecturer of the department «Interior
Design and Artistic Design»
E-mail: iulia1908@mail.ru

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ КИТЧА В АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТАХ

Р.Ф. Мирхасанов, В.А. Садков, Л.С.Сабитов, Ю.В.Бочарова

Приведена информация о выявлении китча в композиции архитектуры посредством вычленения, фиксации законов и средств композиции, которые применялись при создании хрестоматийно известных творческих продуктов архитектуры. Проанализированы композиционные объемно-пространственные построения на основе известных образцов современности и наследия. Показано, как подобная работа исследовательского характера позволяет развивать вкус, выявлять эклектику, китч, учит понимать ход и истоки композиционной мысли автора творческого продукта. Отмечено, что изучение формальной (композиционной) сферы позволяет выстраивать путь авторской работы над проектом, избегая китча, ошибок и разочарований.

Ключевые слова: инженерное искусство, дизайн, объемно-пространственная композиция, формальный подход, формообразование, конструктивизм, деконструктивизм, проект, дефиниция, китч

ANALYSIS OF KITSCH TRENDS IN ARCHITECTURAL OBJECTS

A.R. Gaiduk, L.S. Sabitov, R.F. Mirkhasanov, Y. V.Bocharova

The authors give information about identification of «kitsch» in the composition of architecture by separation, fixing the laws and means of composition that have been used to create the well-known creative products of architecture. Composite volumetric-spatial constructions are analyzed on the basis of well-known samples of modern art and heritage. Such work allows to develop artistic taste, reveal eclecticism, «kitsch», teaches to understand the course and the origins of the compositional thought of the author of a creative product. The study of the formal (compositional) sphere allows you to build the path of the author's work on the project, avoiding «kitsch», mistakes and disappointments.

Keywords: engineering art, design, three-dimensional composition, formal approach, shaping, constructivism, deconstructivism, project, definition, kitsch

Создание объектов объемно-пространственной композиции, заказчиками которых являются миллиардеры, появление компаний по созданию, например, одежды, главными дизайнерами, руководителями которых выступают наследники миллионных состояний, – все это влияло и влияет на мировое искусство XX–XXI в.

Дизайн как массовое, проектное, инженерно-техническое, промышленное искусство для удовлетворения потребностей широких масс возник в конце XVIII в. Это было уже не элитарное искусство – декоративно-прикладное, ручное, эксклюзивное – для узкого круга лиц, а именно массовое искусство для широких слоев населения. Неудивительно, что у истоков и в авангарде искусства XX в. значатся коммунисты Пабло Пикассо, Маргарете Шютте-Лихоцки, Оскар Нимейер, «социалисты в искусстве» Эрнст Май, Бруно Таут, Ле Корбюзье. «Социалистами в искусстве» в данном случае мы называем мастеров архитектуры и дизайна, которые симпатизировали советскому государству, работали в СССР, пытались создавать промышленное искусство, нацеленное на обеспечение потребности рабочих слоев населения всех стран мира.

Сегодня, в эпоху распространения в обществе «моды на молодость», трансформацию природной композиции человеческого тела с помощью имплантации, а формы тела – с помощью облегающей спортивной и гламурной одежды, «узаконены» китч и эклектика, которые явно читались и в историзме конца XIX в., и в проектах некоторых знаменитых мастеров модерна (ар-нуво). Активно проявляли себя «китчевые» тенденции в искусстве США 50–60-х гг. XX в. под маской течения «поп-арт», переводя негатив в «шутливую» форму. Открыто выступили и проявились авторы объемно-пространственных композиций в русле «китч» под названием «гламур» и «фьюжн» в мировом искусстве в насыщенные высокими технологиями и информационным полем 90-х гг. XX – 10–20-х гг. XXI века [1].

Моисей Гинзбург в труде «Стиль и эпоха» писал: «Архитектурные памятники, оголенные, очищенные от блестящей и поверхностной одежды, предстали во всей прелести и неожиданной остроте художественного аскетизма, во всей силе грубого и лапидарного языка простых, ничем не засоренных архитектурных форм» [2]. Из композиционных построений зданий античности, Возрождения мэтрами модернизма 20-х г. XX в. были изъяты первоэлементы форм. Модернисты – архитекторы удалили исторические реминисценции в экстерьерах зданий. Модернисты – художники очищали свои полотна от содержательной части композиционного организма: оставшаяся только композиционная часть превращалась в абстрактные композиции Малевича К.С. («Черный квадрат») или полотна Пита Мондриана.

Черта, характеризующая китч, отмечена, на наш взгляд, в словах Якимовича А.К., который писал, пересказывая суждение М. Дворжака: «Необыкновенный талант Борромини оживлять архитектуру, заставляя её двигаться, волноваться, расти ввысь остался бы бесполезным, да и вообще не смог бы развиваться без совершенного освоения вековых традиций строительного ремесла». Его рационализм, точный расчёт и инженерное мастерство противостояли фантазиям Бернини, «театральной эффектности его скульптур и безграмотной с точки зрения тектоники архитектуры».

Одним из показателей китча в искусстве является «пафосность», роскошь проектов, которая не согласована с экономическими реалиями определенной исторической эпохи. Достаточно вспомнить яркий пример строительства замка короля Людвига II в конце XIX в. (рис. 1, 2), которое было столь обременительным для государства, что привело к отставке и смерти правителя.



Рис. 1. Замок Нойшванштайн короля Людвига II. Фюссен, Бавария, Германия



Рис.2. Замок Нойшванштайн короля Людвига II. Интерьер. Фюссен, Бавария, Германия

Считаем, что архитекторы и инженеры, строившие замок для Людвига II, отлично видели психофизическое состояние заказчика, понимали, что интерьеры до предела перенасыщены архитектурными деталями различных эпох и стилей, различных масштабов и модулей декора, живописи, что созданная объемно-пространственная композиция воспринимается как «какофония» звуков, а не гармоничный оркестр.

Замок, построенный в эпоху всестороннего проявления инженерного гения, поисков в конструкции зданий стальных каркасов и навесных легких стен из стекла, создается в тяжеловесном стиле раннего Средневековья.

Еще один пример – особняк «Capital Hill Residence» на Рублевке (2006–2018 г.), проект знаменитого на весь мир архитектора Захи Хадид. Дом расположен в подмосковном лесу Барвиха на склоне холма, обращенного к северу. Здание, окруженное 20-метровыми деревьями, состоит из двух объемов. Один из них парит над деревьями на высоте 22 м. Дело в том, что заказчик изъявил архитектору желание: «Я хочу просыпаться утром и просто видеть голубое небо». Хадид ответила: «Вы понимаете, что должны быть выше деревьев?».

Недостроенный дом «Capital Hill Residence» в 2016 г. был выставлен на продажу и оценен в 150 млн долларов (по курсу 2022 г. – около 10 млрд рублей). В прессе указывалось, что цена «нереальна в текущих рыночных условиях».

В качестве примера для сравнительного анализа предлагаем проект горизонтального небоскреба Эля Лисицкого, признанный во всем мире хрестоматийно известным образцом авангарда в искусстве [3].

Эль Лисицкий, в отличие от Хадид и авторов замка Людвига II, проектировал общественное здание, которое имело целью удовлетворение не интересов и амбиций богатейших в мире людей, а информационных и эстетических потребностей миллионов жителей столицы. Здание «горизонтального небоскреба» планировалось в русле функциональной и экономической политики первого государства победившего пролетариата и крестьянства, испытывающего нужду в финансах, материалах для строительства, научных и инженерных кадрах.

Таким образом, несоответствие уровня материальных средств, затраченных на проект, финансовая убыточность проекта и его завышенные «требования к себе» – это показатель тенденций китча в искусстве.

Искусственная художественная форма в классических видах изобразительного искусства (архитектуре) и дизайне строится по аналогии с природными (живыми) формами и организмами) и включает в себя кроме содержательной базы и композиционную форму. Таким образом, эти две эстетические категории и дефиниции находятся в пропорциональном соотношении, в определенном гармоничном балансе. Архитектура модернизма использует иногда как основу для образного решения инженерные конструкции и реальные или фантастические машины, существующие в литературных проектах, фильмах, видео и т.д.

Важнейший закон композиции – контраст – гласит, что старое и новое по времени и эпохе могут быть противопоставлены в композиции, создавая гармонию. Но архитекторы направления «деконструктивизм» предлагают образ «Хаоса – Разрушения» [4].

Таким образом, проекты горизонтальных небоскребов Эля Лисицкого решали вопрос включения новых форм дизайна XX в. в историческую застройку и при этом транслировали реалистичный инженерный подход, а постройки деконструктивистов предлагают создавать гармонию на основе контраста с объектами, символизирующими «Разрушение».

«Гармония» и «Хаос» – дефиниции изобразительного искусства и две ипостаси логического и интуитивного начал. Форма (композиция, функциональность, логистика, зонирование, конструкция, геометрия и математика в искусстве и т.д.) относится к гармонии, а содержание (украшение, декор, гламурно-китчевые тенденции, «рассказ и литературщина», национальное в искусстве и т.д.) можно отнести к природному, неструктурированному «полюсу Хаоса».

Труд архитекторов, скульпторов, живописцев был направлен во все времена на поиск новой архитектурной формы, на решение новой формальной задачи. В XX в. создавалась архитектура, отличная от классической ордерной системы и «историзма». Но данные объемно-пространственные композиции строились в соответствии с идеей «Гармонии» и «Созидания», в то время как некоторые постройки XXI в., описанные ниже, демонстрируют идею «Разрушения» и «Хаоса».

Возвращаясь к проекту Хадид, мы видим, что мощнейший контраст живых природных форм (вертикали сосен высотой около 20 м) и футуристической, спроектированной в машинной графике архитектуры из стали, стекла и бетона создает гармоничное единство искусственных и природных форм. Присутствует в проекте Хадид и переключка модулей сложной прихотливой формы.

Ле Корбюзье в своем труде «Градостроительство» пишет: «В современном городе должна господствовать прямая линия. Жилые дома, водопроводные и канализационные линии, шоссе, тротуары – все должно строиться по прямой. Прямая линия оздоравливает город». Эти идеи отражают постулаты геометрии, логику, рациональность мышления, гармонию структурированного Человеком мира Природы» [5].

Объекты проектов Хадид отвергают постулаты закона модульно-метрических членений, раскрытых в словах Корбюзье выше. Проекты Хадид могли бы быть функциональнее и удобнее, если бы были построены на основе прямых углов и квадратных модулей, но по сложившемуся мнению проектировщик Хадид – «королева извилистых линий», и для внешнего эффекта и «красивости», а не функциональной необходимости появляются прихотливые изгибы линий в планах и фасадах ее построек. Как видим, объемно-пространственные объекты проектов Фрэнка Гери и Захи Хадид вступают в конфронтацию с постулатами Корбюзье.

Четкая нацеленность архитекторов 20-х гг. XX в. на разработку яркого современного образа, языка и новой современной композиционной формы сказывалась в следовании важному закону новизны и современности [6, 7]. Но современный мир транслирует моду на «хайп» и «скандальную популярность», и новой формой стал образ не созидания и гармонии, а разрушения и дисгармонии. Примером новой для

современного периода архитектурной композиции может служить здание центра здоровья мозга «Лу Руво» в Лас-Вегасе с его форсированием динамики, акцентированием идеи разрушения и хаоса и с максимальной при этом содержательной частью композиции (упор на декоративное, внешне эффектное).

Универсальность и следование константам формального подхода и требованиям условного языка каждого вида классического искусства и дизайна воспринимаются сегодня как трансформированный модернизм на современном временном этапе и современными же материалами язык античности и раннего, высокого Возрождения.

Подобные построения характерны для планировки военных лагерей, городов древнеримской инженерии и архитектуры. Эти модули и ритм метрического шага идут от античного Парфенона.

Универсальный изобразительный язык работ Пита Мондриана и всего творческого объединения «Де Стейл», родившегося под знаменем неопластицизма в 1917 г., как и конструктивизма 20-х г. XX в., транслировал идею-манифест членения формата плоскостной и пространства объемной композиции по модульно-метрическому принципу [8].

Попытка сломать модульно-метрический закон композиции, предпринятая Фрэнком Гери в проекте здания центра здоровья мозга «Лу Руво» в Лас-Вегасе, продолжает негативную линию театральности, пафоса, экзальтации и «чужацества», начатую в самых необычных постройках и росписях эпохи маньеризма, создающих иллюзии восприятия объектов зрителем, причудливые сочетания элементов, масштабов деталей и целого.

Необычайно странная и причудливая постройка в русле течения «маньеризм» была создана Франческо Борромини [9, 10]. Римская церковь Сан Карло «у четырёх фонтанов» (рис. 3) указанного выше мастера поражает пышностью, странным сочетанием архитектурных элементов в композиции.



Рис. 3. Франческо Борромини. Церковь Сан Карло «у четырёх фонтанов», Рим (1638–1667 гг.)

Эта же линия продолжилась и в иконах поп-арта, когда сиюминутный легковесный китч был противопоставлен вечному искусству классики современности и прошлых эпох.

Отрыв от законов композиции означает максимальное увеличение содержательного начала (внешние эффекты и связь постройки с вербальными понятиями «мозг», «болезнь», «разрушение», «человек») в ущерб функциональному – формальному (стена, крыша, климат) в искусственно созданном организме здания. Это закономерно

приведет к ошибкам в проектировании и, как следствие, к проблемам в обслуживании здания [11,12].

Так, агентство Associated Press опубликовало 07 ноября 2007 г. информацию, что Массачусетский технологический институт (МТИ) подал в суд на известного архитектора Фрэнка Гери (Frank Gehry).

Погоня за внешним визуальным эффектом, преобладание «содержания» над «формой» приводит к отрыву проекта от его функциональной стороны в угоду внешним эффектам, рассчитанным на сиюминутный эффект скандальной окраски. По мнению представителей Массачусетского технологического института (МТИ), при разработке проекта комплекса «Stata Center» на территории института Гери допустил серьезные ошибки, повлекшие за собой постоянные протечки, проблемы с дренажом и образование плесени на стенах. Также сообщается, что из-за объемных форм элементов здания снег и массивные глыбы льда, падающие с крыши и оконных выступов, не только напрямую угрожают жизни работников института, но часто блокируют запасные выходы. MIT заплатил компании «Gehry Partners» 15 миллионов долларов за проектирование комплекса «Stata Center», строительство которого обошлось в 300 миллионов долларов. В иске утверждается, что Фрэнк Гери «нарушил свои обязанности, предоставив некачественные услуги по проектированию и чертежи» (рис. 4).

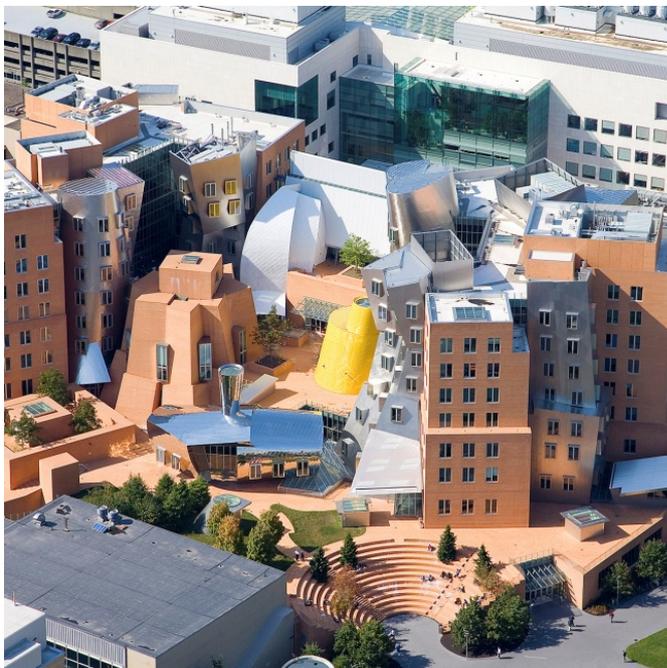


Рис. 4. Фрэнк Гэри. Комплекс «Stata Center» на территории Массачусетского технологического института (МТИ)

Представитель строительной компании «Skanska», которая возвела здание в 2004 г., утверждает, что Гери игнорировал неоднократные предупреждения застройщиков о недочетах в проекте. «Дело не в строительных работах», – заявил Пол Хьювинс, вице-президент строительной компании «Skanska».

Условный изобразительный язык архитектуры и инженерного искусства базируется на достижениях науки и техники, на материалах и технологиях строительства, на основе конструкторской школы, личных предпочтениях автора проекта, исторических и стилистических предпочтениях эпохи [13, 14].

Условный изобразительный, созидательный язык объемно-пространственных композиций таких знаменитых на весь мир мастеров, как Заха Хадид, Фрэнк Гери (рис. 5), основан на очень мощном значении содержательной части искусственно создаваемого композиционного организма. Композиционная конструкция, аналитический (формальный) подход, геометрия построений – эти элементы формальной сферы композиции данными персоналиями целенаправленно разрушаются. Только

прекрасные современные материалы и искусство инженеров строительных компаний спасают ситуацию в указанных выше проектах.



Рис. 5. Здание центра здоровья мозга имени Лу Руво Архитектор Фрэнк Гери. Инженер Г.К. Уоллес. 2007-2010 гг. Лас-Вегас. США

Создание плоскостной и объемно-пространственной композиции сопровождается композиционными поисками автора творческого продукта. Огромный интерес для учащегося, студента, исследователя, ученого, профессионала представляет понимание хода композиционной мысли автора всемирно известного творческого продукта. Прекрасно, когда остались многочисленные, ценные для изучения композиционные поиски и эскизы мэтров. Но иногда такие композиционные разработки бывают потеряны или недоступны для изучения. Выполняя схематический графический анализ, мы приходим постепенно к истокам, к идее, первоначальному замыслу автора, к синтезу архитектуры и живописи, что является важным в свете современных требований профессиональной подготовки архитекторов и дизайнеров. Схематический графический анализ выполняется обычно студентами на занятиях по композиции, пропедевтике. Особенно это интересно, когда эскизы и зарисовки, которые были в самом начале пути работы Мастера по созданию образца Наследия, не сохранились. Студентами изучаются принципы построения конструкции и объемной формы на выбранном хрестоматийно известном объекте научной, художественной и инженерной мысли. В процессе работы студента над объектом меняются различные стороны психической деятельности, студенты учатся абстрагированию мышления, у них формируется образно-пространственное, композиционное мышление, изменяются методы выполнения действий, совершенствуются и углубляются знания формальной сферы [15].

Не вызывает сомнений, что Франческо Борромини – гений архитектуры Средневековья, а проекты Захи Хаид и Фрэнка Гери успешны в финансовом плане, знамениты, вошли навсегда в историю мирового искусства и архитектуры. Но успешность и знаменитость указанного выше проекта Борромини основана на достижениях всей многовековой инженерно-архитектурной школы Европы, охватывающей античность и средние века, на высоте ремесленного искусства строителей эпохи Возрождения. Достижения современной науки, техники, инженерного искусства и разрушение композиционных постулатов из арсенала ее законов и средств, характерно и для творчества Фрэнка Гери и Захи Хаид.

Изучение композиционной сферы мирового Наследия в объектах, ставших хрестоматийной классикой архитектуры и дизайна, является огромным вдохновением для исследовательской, научной и творческой работы. Данная работа полезна также для создания собственного авторского учебного и профессионального продукта.

Список литературы

1. 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.
2. Гинзбург, М.Я. Стиль и эпоха: проблемы современной архитектуры / М.Я. Гинзбург. – М.: Государственное издательство, 1924. – 239 с.
3. Cohen Jean-Louis. Mies van der Rohe / Cohen Jean-Louis. – Paris: Hazan, 1994. – 143 p.
4. Le Corbusier. Vers une architecture / Le Corbusier. – Paris: G. Crès, Collection de «L'Esprit Nouveau», 1923. – 230 p.
5. Ле Корбюзье. Архитектура XX века / Ле Корбюзье. – М.: Прогресс, 1970. – 215 с.
6. Lodder, Ch. Russian constructivism / Ch. Lodder. – London: New Haven: Yale univ. press. – 328 p.
7. Mohr, C. Funktionalität und Moderne. Das Neue Frankfurt und seine Bauten 1925-1933 / C. Mohr, M. Müller. – Köln: R. Müller Verlag, 1984. – P.200.
8. Stein, P. Grove Art Online / P. Stein, F. Borromini. – Oxford Art Online: Oxford University Press, 2013. – 200 p.
9. Бочарова, Ю.В. Территория и объекты завода имени М.В. Фрунзе в контексте развития городской среды Пензы / Ю.В. Бочарова, М.Т. Хрюкина // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 3(44). – С. 20–25.
10. Фремpton, К. Международный стиль: тема и вариации, 1925–1965 / К. Фремpton // Современная архитектура: критический взгляд на историю развития. – М.: Стройиздат, 1990. – 363 с.
11. Данилов, А.М. Разработка строительных материалов как сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 2 (27). – С. 50–54.
12. Корягина, С.А. Информатизация управления строительством как основы предотвращения техногенных аварий / С.А. Корягина // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 4. – С. 11–31.
13. Саденко, Д.С. Основы научно-технического сопровождения объектов капитального строительства / Д.С. Саденко, И.Н. Гарькин, М.В. Арискин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 89–95.
14. Гарькин, И.Н. Технология проведения ремонтных работ на памятнике, являющемся объектом культурного наследия / И.Н. Гарькин, Н.В. Агафонкина // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 4.
15. Данилов, А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем: монография / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014. – 168 с.

References

1. Skachkov, Yu.P. Modification of the pattern method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.
2. Ginzburg, M.Ya. Style and era: problems of modern architecture / M.Ya. Ginzburg. – M.: State Publishing House, 1924. – 239 p.
3. Cohen Jean-Louis. Mies van der Rohe / Cohen Jean-Louis. – Paris: Hazan, 1994. – 143 p.
4. Le Corbusier. Vers une architecture / Le Corbusier. – Paris: G. Crès, Collection de «L'Esprit Nouveau», 1923. – 230 p.
5. Le Corbusier. Architecture of the XX century / Le Corbusier. – M.: Progress, 1970. – 215 p.
6. Lodder, Ch. Russian constructivism / Ch. Lodder. – London: New Haven: Yale univ. press. – 328 p.

7. Mohr, C. Funktionalität und Moderne. Das Neue Frankfurt und seine Bauten 1925-1933 / C. Mohr, M. Müller. – Köln: R. Müller Verlag, 1984. – P.200.
8. Stein, P. Grove Art Online / P. Stein, F. Borromini. – Oxford Art Online: Oxford University Press, 2013. – 200 p.
9. Bocharova, Yu.V. The territory and facilities of the plant named after M.V. Frunze in the context of the development of the urban environment of Penza / Yu.V. Bocharova, M.T. Khryukina // Urban planning and architecture. – 2021. – Vol. 11, No. 3(44). – P. 20–25.
10. Frampton, K. International Style: Theme and Variations, 1925-1965 / K. Frampton // Modern architecture: a critical look at the history of development. – M.: Stroyizdat, 1990. – 363 p.
11. Danilov, A.M. Development of building materials as complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 2 (27). – P. 50–54.
12. Koryagina, S.A. Informatization of construction management as a basis for preventing man-made accidents / S.A. Koryagina // Building materials and products. – 2021. – Vol. 4, No. 4. – P. 11–31.
13. Sadenko, D.S. Fundamentals of scientific and technical support of capital construction objects / D.S. Sadenko, I.N. Garkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 89–95.
14. Garkin, I.N. Technology of carrying out repair work on a monument that is an object of cultural heritage / I.N. Garkin, N.V. Agafonkina // Bulletin of the Eurasian Science. – 2020. – Vol. 12, No. 2. – P. 4.
15. Danilov, A.M. Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems: Monograph / A.M. Danilov, I.A. Garkina. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2014. – 168 p.

УДК 37.016:75.012

DOI 10.54734/20722958_2023_1_178

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Мирхасанов Рустем Фаритович,

старший преподаватель кафедры «Дизайн и национальные искусства»

E-mail: rystem69@mail.ru

Сабитов Линар Салихзанович,

доктор технических наук, профессор кафедры «Конструктивно-дизайнерское проектирование»

E-mail: l.sabitov@bk.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,

ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гарькин Игорь Николаевич,

кандидат исторических наук, доцент кафедры «Управление качеством

и технология строительного производства»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

Kazan (Volga Region) Federal University

Russia, Kazan, st. Kremlin, d. 18

Mirkhasanov Rustem Faritovich,

Senior Lecturer of the department «Structural engineering and design»

E-mail: rystem69@mail.ru

Sabitov Linar Salikhzanovich,

Doctor of Sciences, Professor of the department «Structural Engineering and Design»

E-mail: l.sabitov@bk.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,

tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Garkin Igor Nikolaevich,

Candidate of History Sciences, Associate Professor of the department «Management

Quality and Technology of Building Production»

E-mail: igor_garkin@mail.ru

ОТ «ЧУГУННОЙ АРХИТЕКТУРЫ» К МЕТАЛЛИЧЕСКОМУ КАРКАСУ

Р.Ф. Мирсаханов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин

Показана необходимость изучения богатейшего пласта наследия формальных (композиционных) построений в классическом изобразительном искусстве и дизайне. Главное внимание уделено современным поискам в области композиции изобразительного искусства и дизайна на основе формальных подходов к изучению и созданию творческих продуктов.

Ключевые слова: «чугунная» архитектура, металлический каркас, схематический анализ, композиция, ритм, модуль, аналоги, методика, творческий продукт, дизайн, вольная копия

FROM «CAST IRON ARCHITECTURE» TO METAL FRAME

R.F. Mirsakhanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin

The authors of the article call for the study of the richest layer of the heritage of formal (compositional) constructions in classical fine arts and design. The main attention is paid to modern searches in the field of composition of fine arts and design based on the study of formal approaches in the study and production of creative products.

Keywords: «cast-iron» architecture, metal frame, schematic analysis, composition, rhythm, module, analogues, technique, creative product, design, free copy

Схематический графический анализ «ритмических переключек», почти параллельных между собой «силовых» линий, «модульных членений» в творческих продуктах классиков мирового дизайна является, на наш взгляд, интересной и важной областью для теоретических и практических исследований в учебной и творческой деятельности.

Для практиков, теоретиков искусства дизайна, студентов – будущих дизайнеров вызывает интерес выявление взаимодействия связи и общности интерпретации терминов «ритм» и «модуль» в различных видах классического изобразительного искусства и дизайна. Законы композиции настолько универсальны, что «работают»

как в «плоской» изобразительной поверхности живописи, так и в объемно-пространственной по своему характеру композиции архитектуры и дизайна.

Одним из аспектов модернизации российского образования в русле изучения студентами предметов дизайнерского цикла является задача формирования будущих профессионалов, владеющих современными инновационными технологиями. Считаем, что архитектор и дизайнер должны дорасти до уровня профессионального инженера-проектировщика стальных конструкций. Но это невозможно без глубоких знаний об объективно существующем развитии формы в изобразительном искусстве и дизайне. Обратимся к истории.

В 1720 г. Абрахам Дерби выплавил чугун в доменной печи на коксе вместо древесного угля; в 1855 г. Генри Бессемер изобрел конверторы, а компания «Сименс» создала в 1864 г. мартеновские печи, что привело к массовому производству стали. В середине XVIII в. в Англии научились производить прокат листового железа. В 1830 г. английские сталевары изготавливают рельсы для железной дороги; 1854 г. – начало производства во Франции двутавровых балок из ковкого железа [1].

Двутавровая балка является продолжением развития железнодорожного рельса. Появление основного элемента современного строительства – строго нормированного модульного элемента в виде двутавровой балки – является символическим проявлением начала индустриального века.

«Чугунная архитектура» – не совсем корректное название, отражающее использование чугуна при строительстве зданий и мостов, изготовлении балконов и оград и т.д.

Технологии, разработанные во время промышленной революции конца XVIII–XIX веков, сделали чугун относительно дешевым и пригодным для строительства материалом. Для декоративных и строительных целей он использовался вплоть до 1900 г., пока не вышел из моды и не был заменен сталью и бетоном [2].

Передача нагрузки от стены на каркас происходила поэтапно, и первый шаг к этому композиционному решению каркаса здания виден в большепролетных аркадах кирпичных фасадов английских доков.

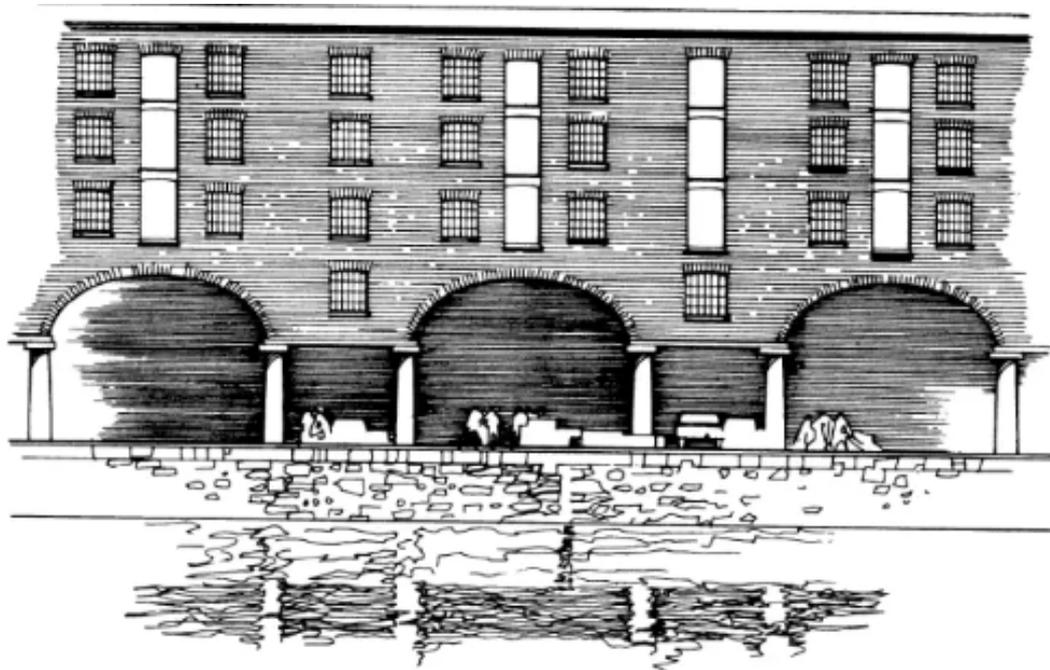


Рис. 1. Ливерпуль. 1845 г.

Фасады зданий контор, магазинов, выполненные полностью из стальных конструкций, появились в США. В период 1850–1880-х гг. произошел расцвет «чугунной архитектуры», пионером которой был Джеймс Богард (Богардус), изобретатель и

конструктор. Пятиэтажное здание издательства «Харпер и братья», построенное в 1854 г., имело фасад, состоящий из чугунных конструкций, архитектурных по эстетике, но формальных по своей сути. Внутренний каркас здания выражал функцию композиционной формы и был выполнен из прокатных стальных балок. Декор фасада выражал содержательное начало в композиционном организме: он основан на элементах ренессанса и характерных для того времени пышных формах эклектизма второй половины XIX в. [4, 5].



Рис. 2. Джеймс Богард (Богардус). Здание издательства «Харпер и братья». 1854 г.

Считаем, что в обучении дизайнерскому искусству существует важная проблема в умении студентами – будущими дизайнерами вычленять из созданной ранее дизайнером искусственной художественной формы ритмическую и модульную структуру [3].

Одним из решений данной проблемы мы видим выполнение разработанных аналитических схематических заданий.

Задание №1. Выполнить схематическое изображение проекта здания издательства «Харпер и братья» (1854 г.) с визуальным расчленением изображения на 3 светлотных и цветовых тона. Акцентировать внимание на ритме цветовых пятен.

Задание №2. Выполнить схематический графический анализ проекта Жюля Солнье «Многоэтажное здание со стальным каркасом. Шоколадная фабрика Менье. Нуазье-на-Марне близ Парижа» с вычленением модульной составляющей композиции данного творческого продукта. Классифицировать и отразить на рисунке близкие по геометрической форме и по площади фигуры на плане и фасаде здания.

Задание №3. Выполнить схематический графический анализ – изображение проекта с вычленением принципа «переключек» многочисленных горизонтальных, вертикальных, диагональных линейных ритмов.

Задание №4. Выполнить графическое схематическое изображение модульной сетки в композиции проекта Жюля Солнье «Многоэтажное здание со стальным каркасом. Шоколадная фабрика Менье. Нуазье-на-Марне близ Парижа».

Здание отеля «Watson's» – старейшее сохранившееся чугунное здание Индии и, вероятно, самое старое полностью чугунное каркасное здание в мире, построенное на три года раньше знаменитой шоколадной фабрики Менье в Нуазье-на-Марне близ Парижа (1867–1869). Спроектировал его инженер Роулэнд Мейсон Ордиш, наиболее известный проектом Зимнего сада в Дублине (1865).



Рис. 3. Отель «Watson's» (Watson's Esplanade).
Район Кала-Года. Город Мумбаи (Бомбей). Индия



Рис. 4. Многоэтажное здание со стальным каркасом. Шоколадная фабрика Менье.
Нуазье-на-Марне близ Парижа. 1871–1872 гг.

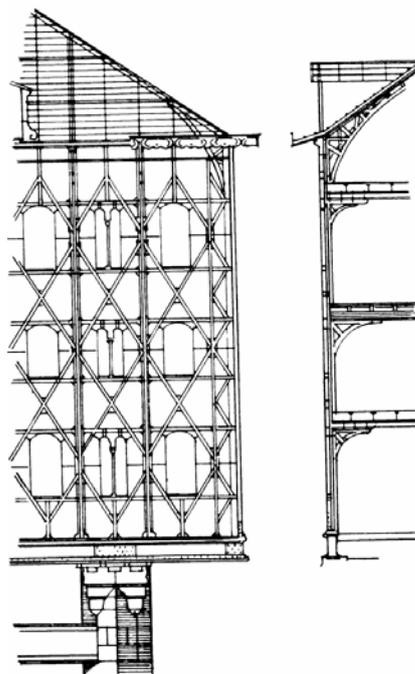


Рис. 5. Жюль Солнье. Многоэтажное здание со стальным каркасом.
Шоколадная фабрика Менье. Нуазье-на-Марне близ Парижа. 1871–1872 гг.

Первым стальным каркасным строением традиционно считается шоколадная фабрика Менье в Нуазье-на-Марне близ Парижа (проект Жюлья Солнье). Учитывая бурное развитие металлургии, удивительно, что первая постройка со стальным каркасом относится лишь к 1871–1872 гг. [6]. Но при этом нужно помнить, что пожары 70-х г. XIX в. показали уязвимость стальных конструкций перед длительным воздействием огня.

Несомненно, что проект здания в конструктивной части отталкивался от деревянного каркаса фахверковых зданий с заполнением промежутков утрамбованной глиной и нарезанной соломой. В случае с шоколадной фабрикой промежутки металлического каркаса заполнялись кирпичной кладкой. Таким образом, проект шоколадной фабрики не только основывался на фахверковой архитектуре европейского средневековья, но и заглядывал в будущее:

1) трансформация построек со стальным каркасом в будущем предполагала возможность перестройки, расширения или демонтажа [7];

2) Жюлем Солнье была использована диагональная сетка раскосов – важная деталь каркасов современных небоскребов.

В шедевре пионера функционализма Жюлья Солнье очень ярко выражен принцип рентабельности, рациональности строительства. В композиции фасада сильны диагональные ритмы, что, в свою очередь, порождает соотношения ритмики вертикалей и горизонталей.

Таким образом, формальная (композиционная) часть нового искусственно созданного творческого продукта, находясь в неделимом союзе с содержательной частью, главенствует в достижении яркого современного образа новым языковым кодом.

Необходимо отметить важный момент, состоящий в том, что в образовательном процессе многих современных вузов, готовящих дизайнеров, необходима практика вольного копирования работ знаменитых дизайнеров.



Рис. 6. Многоэтажное здание со стальным каркасом. Шоколадная фабрика Менье. Нуазье-на-Марне близ Парижа. 1871–1872 гг.

Считаем, что копиральная практика для дизайнера, архитектора так же важна, как для художника. Предлагаем студентам выполнять в рамках пропедевтики и рисунка схематические изображения хрестоматийно известных шедевров мировой архитектуры и дизайна.

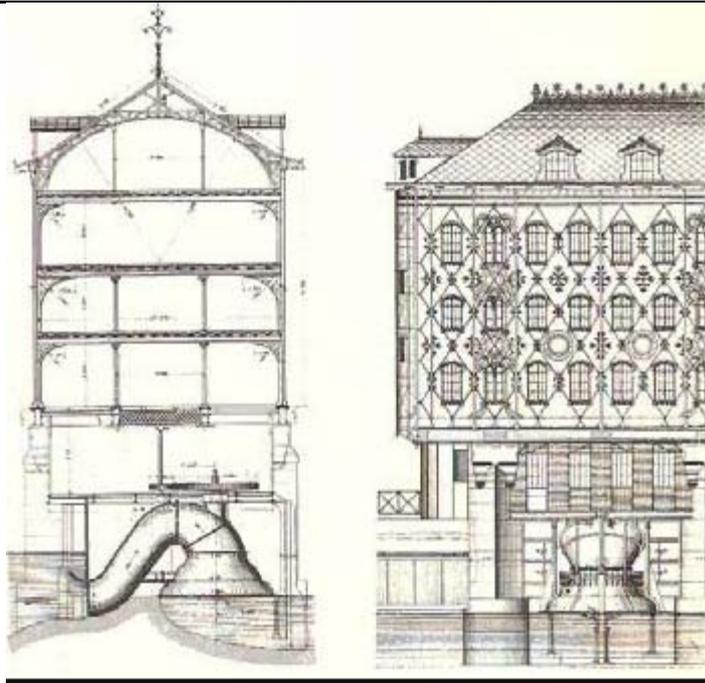


Рис.7. Многоэтажное здание со стальным каркасом. Шоколадная фабрика Менье.
Нуазье-на-Марне близ Парижа. 1871–1872 гг.

Фабрика по производству шоколада Менье – продукт творческой деятельности инженера и архитектора Жюль Солнье – имеет следующие характеристики:

- 1) здание покоится на четырех контрфорсах плотины на реке Марна;
- 2) металлический каркас усилен связями ромбообразной формы;
- 3) свободно висят углы здания;
- 4) формат окон определен диагонально-ромбической сеткой связи;
- 5) линейно-ритмическая организация плоской и объемно-пространственной композиции приводит к модульным членениям;
- 6) балки перекрытий связаны консолями с вертикальными стойками фасада.

Грамотная организация модульных и метрических членений в плоскостной и объемно-пространственной композиции приводит, в том числе, и к ритмической организации данной композиции.

Возможно введение понятия «формальный метод на основе модульных и ритмических членений в композиции» в практику учебной и творческой, проектной и оценочной деятельности в дизайне. В педагогической практике появляется еще один показатель оценочного критерия, представленный практической реализацией формального метода в учебных работах [8, 9].

Следствием недостаточно глубокого изучения законов формальной сферы, главенствующей в эволюционном развитии изобразительного искусства, часто является слабость творческих, курсовых работ, выраженная дилетантской художественной визуализацией.

Существующая проблема возникает, на наш взгляд из-за недостаточно глубокой разработки методик, пособий, нормативов по освоению и классификации формальных (композиционных) технологий. Знания законов и свойств композиции должны не оставаться только теорией, а закрепляться в различных практических заданиях, например, выполнении «вольного копирования» и «композиционных построений» на основе образцов известных персоналий в объемном моделировании, учебном рисунке, живописи. Рисунок и живопись в обучении дизайнера должны иметь прикладной характер, а не быть предметом станкового характера в духе «искусства ради искусства».

Студент факультета архитектуры (дизайна), где взаимодействуют творческие и педагогические профили подготовки, должен органично воспринимать взаимодействие образования, культуры, науки в русле возникновения важнейших течений

прошлых эпох и современного мира, должен уметь аргументировано объяснить их с точки зрения формальных поисков знаменитых персоналий изобразительного искусства и дизайна.

Таким образом, можно сделать вывод, что мастер, студент, учащийся должен осознанно подходить к выбору метрической и ритмической организации при создании творческого или учебного продукта. В результате того или иного соотношения в балансе «ритм – модуль» происходит профессиональное созидание новой искусственной художественной формы.

В конечном итоге происходит создание яркого самобытного художественного образа в продукте дизайна.

Авторы убеждены, что студент «творческой специальности», работающий над созданием ритмической и модульной организации плоскостной и объемно-пространственной композиции, создает профессиональный продукт решения дизайнерских задач. Благодаря подготовленности студента к прочтению модульных и ритмических языковых кодов мастеров дизайна он всегда будет легко ориентироваться в различных направлениях и течениях архитектуры и дизайна.

В заключение авторы подчёркивают необходимость применения интегративной обучающей методики, тезисная доминанта которой формулируется как «новые яркие и современные образные решения на основе классических аналогий».

Таким образом, благодаря проведенной расшифровке формальных компонентов в творческих продуктах известных персоналий студент будет готовым к созданию собственных авторских работ, сможет анализировать композиционные построения на основе константы – постулатов формальной сферы. Это даст студенту вуза понимание аналогов, истоков, персоналий мастеров, повлиявших на рождение данного композиционного построения.

Студент, работающий над дополнительными заданиями по нашей методике, включающей схематический графический анализ, будет более свободен в подходах композиционных решений дизайн-проекта.

Список литературы

1. Нежданов, К.К. Способ проката двутаврового профиля сечения из низколегированной стали / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 4 (237). – С. 51–54.
2. Саженко, Д.С. Основы научно-технического сопровождения объектов капитального строительства / Д.С. Саженко, И.Н. Гарькин, М.В. Аriskин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 89–95.
3. Лапшина, Е.Г. Концепция архитектурного пространства городов: динамическая составляющая / Е.Г. Лапшина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 170–176.
4. Гарькин, И.Н. Некоторые аспекты проведения предпроектных работ на объектах культурного наследия / И.Н. Гарькин, Л.С. Сабитов, А.Р. Гайдук, Т.А. Глебова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 11 (95). – С. 678–688.
5. Каракова, Т.В. Художественная перфорация как инструмент формообразования архитектуры общественного здания в контексте эмерджентности системы / Т.В. Каракова, А.В. Данилова // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 211–219.
6. 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.
7. Шеина, С.Г. Пример применения BIM технологий при обследовании зданий и сооружений / С.Г. Шеина, Е.В. Виноградова, Ю.С. Денисенко // Инженерный вестник Дона. 2021. – URL: № 6(78). ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037

8. Лызина, А.Г. Средовые условия восприятия православных храмов и комплексов / А.Г. Лызина // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 4 (45). – С. 87–93.

9. Раузеєв, И.З. Эргономические аспекты организации пространства современного города / И.З. Раузеєв // Научная перспектива. – 2012. – № 12. – С. 108–112.

References

1. Nezhdanov, K.K. A method of rolling an I-section profile from low-alloy steel / K.K. Nezhdanov, I.N. Garkin // Construction mechanics and calculation of structures. – 2011. – No. 4 (237). – P. 51–54.

2. Sadenko, D.S. Fundamentals of scientific and technical support of capital construction objects / D.S. Sadenko, I.N. Garkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 89–95.

3. Lapshina, E.G. The concept of the architectural space of cities: a dynamic component / E.G. Lapshina // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 170–176.

4. Garkin, I.N. Some aspects of pre-project work on cultural heritage sites / I.N. Garkin, L.S. Sabitov, A.R. Gaiduk, T.A. Glebova // Engineering Bulletin of the Don. – 2022. – No. 11 (95). – P. 678–688.

5. Karakova, T.V. Artistic perforation as a tool for shaping the architecture of a public building in the context of system emergence / T.V. Karakova, A.V. Danilova // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 1 (46). – P. 211–219.

6. Skachkov, Yu.P. Modification of the PATTERN method for solving architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2011. – No. 1. – P. 4–9.

7. Sheina, S.G. An example of the use of BIM technologies in the inspection of buildings and structures / S.G. Sheina, E.V. Vinogradova, Yu.S. Denisenko // Engineering Bulletin of the Don. – 2021. – URL: No. 6 (78). ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037

8. Lyzina, A.G. Environmental conditions for the perception of Orthodox churches and complexes / A.G. Lyzina // Urban planning and architecture. – 2021. – Vol. 11, No. 4 (45). – P. 87–93.

9. Rauseev, I.Z. Ergonomic aspects of the organization of the space of a modern city / I.Z. Rauseev // Scientific perspective. – 2012. – No. 12. – P. 108–112.

УДК 69.01

DOI 10.54734/20722958_2023_1_186

Петрозаводский государственный университет

Россия, 185910, г. Петрозаводск,
пр. Ленина, д. 33

Селютина Любовь Федоровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства»
E-mail: selutinalf@mail.ru

Ратькова Елена Игоревна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства» E-mail: ratjkova@mail.ru

Корнеев Артур Александрович,
преподаватель кафедры «Технология
и организация строительства»
E-mail: bagrom18@yandex.ru

Petrozavodsk State University

Russia, 185910, Petrozavodsk, 33,
Lenin Avenue

Selutina Lyubov Feodorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technologies and
Construction Management»
E-mail: selutinalf@mail.ru

Ratkova Elena Igorevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technologies
and Construction Management»

Korneev Arthur Alexandrovich,
Lecturer of the department «Technologies
and Construction Management»
E-mail: bagrom18@yandex.ru

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОХРАНЕНИЯ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В ПОВЕНЦЕ

А.А. Корнеев, Е.И. Ратькова, Л.Ф. Селютина

Представлены сведения о состоянии конструкций двухэтажного жилого здания в Повенце, являющегося объектом культурного наследия регионального значения. Приведены результаты обследования здания, его состояние оценено как аварийное. Предложены варианты сохранения объекта культурного наследия.

Ключевые слова: жилой дом, брусчатые стены, деревянные перекрытия, загнивание, возгорание, аварийное состояние, адаптивное повторное использование

ANALYSIS OF THE STATE AND POSSIBILITIES OF PRESERVATION A CULTURAL HERITAGE SITE IN POVENETS

A.A. Korneev, E.I. Ratkova, L.F. Selutina

The authors present information about the state of a two story residential building in the village of Povenets is an object of a cultural heritage of regional significance. A survey of the building has been carried out. The condition of the building is assessed as emergency. Some variants of preservation the object of cultural heritage are proposed.

Keywords: residential building, timber walls, wooden floors, rotting, fire, emergence condition, adaptive reuse

Введение

На берегу Онежского озера стоит старинный поселок Повенец, основанный новгородскими купцами более 500 лет назад. Через слободу проходила тропа богомольцев к Соловецкому монастырю, центру православной культуры края. Отсюда издревле торговые люди добирались до Белого моря по воде на челнах и посуху волоком. Еще Иван Грозный мечтал выстроить путь, соединяющий Онегу и Белое море. Эту мечту лелеял и Петр Великий, однако осуществилась она только в советское время в начале 30-х годов. 2 августа 1933 года Беломорско-Балтийский канал был принят в эксплуатацию (рис. 1).

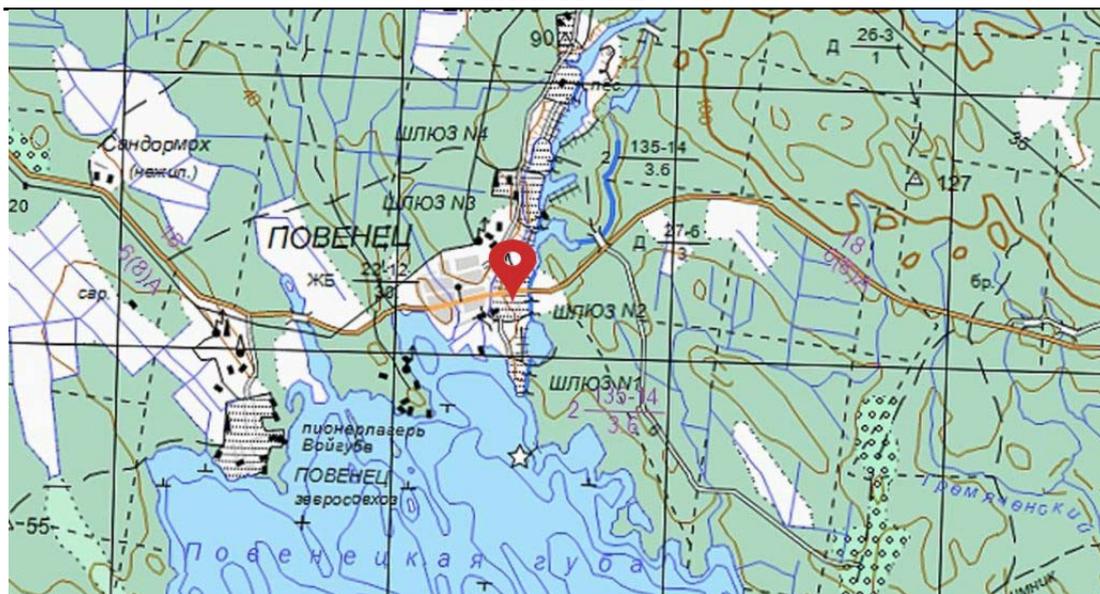


Рис. 1. Карта местности

Источник: <http://www.vrorgo.ru/wp-content/uploads/2018/12/8.jpg>

Для возведения Беломорско-Балтийского канала были построены вспомогательные сооружения и здания: вдоль канала для проживания рабочих были предусмотрены бараки, а для людей, обслуживающих канал, – дома у каждого шлюза. Одним из таких и является жилой дом № 6 у шлюза № 2 (рис. 2).

Дом жилой, построен в 1930 г. В соответствии с приказом № 38 Министерства культуры РК от 18.02.2000 г. жилой дом № 6 у шлюза № 2 Беломорско-Балтийского канала является объектом культурного наследия. Исследования, результаты которых приведены в статье, выполнены для дома № 6. Этот дом построен по типовому проекту. Сохранился и жилой дом № 5, также являющийся объектом культурного наследия регионального значения. В настоящее время дом № 5 эксплуатируется только в летнее время, и состояние его гораздо лучше, чем дома № 6.



Рис. 2. Дом у шлюза № 2 Беломорско-Балтийского канала.

Фото Селютиной Л.Ф.

Теоретический анализ

Объекты культурного наследия представляют собой значительную материальную и духовную ценность, утрата их невосполнима. Угроза физической утраты памятника связана с процессом естественного старения. Здания культурного наследия могут прийти в упадок из-за плохого финансирования и обслуживания, последствий стихийных бедствий, гниения, горения. В работе [1] авторы показали результаты расчетов среднегодовой (за период с 2004 по 2007 г.) оценочной величины утрат недвижимых памятников по всем субъектам Российской Федерации, рост числа утраченных памятников. Установлено, что мониторинг состояния конструкций позволяет продлить срок жизни здания и сократить затраты на уход за ним [2, 3]. Исследователи К. Безас, В. Комианос, Д. Куфудакис, Г. Цуманис, К. Кабасси, К. Ойконому предлагают проведение мониторинга с помощью систем, основанных на беспроводных сенсорных сетях (WSN) [4]. Такие системы способны быстро и надежно собирать информацию. Применение этих систем рекомендовано для мониторинга исторических зданий, подвергшихся износу временем и особенно чувствительных к любому виду вмешательства.

Также серьезные риски для объектов культурного наследия несут пожары. Статистика пожаров в России, а также зарубежный опыт подтверждают это [5].

Пожар летом 2018 года в церкви Успения Богородицы (г. Кондопога, Республика Карелия) еще раз продемонстрировал беззащитность таких сооружений перед огнем. Жемчужина Русского Севера, объект культурного наследия, памятник деревянного зодчества за несколько часов превратился в груды обугленных бревен [6].

Информация о последствиях пожаров известна как в нашей стране, так и в странах Европы и мира. Так, в работе [7] представлены данные, собранные в шести муниципалитетах Португалии, о последствиях лесных пожаров в октябре 2017 года. Эта информация очень важна в контексте управления рисками, связанными с культурным наследием.

Вопросам сохранения объектов культурного наследия уделяется значительное внимание в мировой практике реставрации. Обращается внимание на то, что особенности структуры древесины оказывают негативное влияние на ее физико-механические свойства (снижение прочности, загнивание, возгорания). Деревянные конструкции подвержены риску внутренних повреждений из-за изменения температуры и влажности. Таким образом, необходимость безопасности конструкций требует постоянного технического обслуживания зданий.

Краткая характеристика объекта

Здание двухэтажное, без подвального помещения, рассчитано на 2 семьи. Расположение здания показано на рис. 1. Размеры здания 10,24×11,25 м. Дом построен в 30-е годы XX века. Общая площадь квартир 118,8 кв. м. Квартиры имеют входы со стороны буквенных осей (рис. 3, 4).

Квартира, вход в которую расположен со стороны Беломорско-Балтийского канала, двухэтажная. На первом этаже располагались кухня и одна жилая комната; выход на второй этаж через лестницу, где были расположены две спальни и две кладовые.

Вход в однокомнатную квартиру расположен со стороны Повенецкого поселения. В квартире есть кухня и одна жилая комната.

Все несущие и ограждающие конструкции выполнены из местного материала – древесины, а сам объект построен по технологиям начала XX века.

Методика

Цель исследования — комплексное изучение жилого дома в историческом, архитектурном, конструктивном аспектах. Задачи исследования: сбор архивно-исторических данных по исследуемому объекту и месту; натурное обследование объекта; выявление строительной истории; определение характерных архитектурных особенностей объекта. По результатам выполненных работ подготовлены материалы для решения вопросов сохранения объекта культурного наследия.

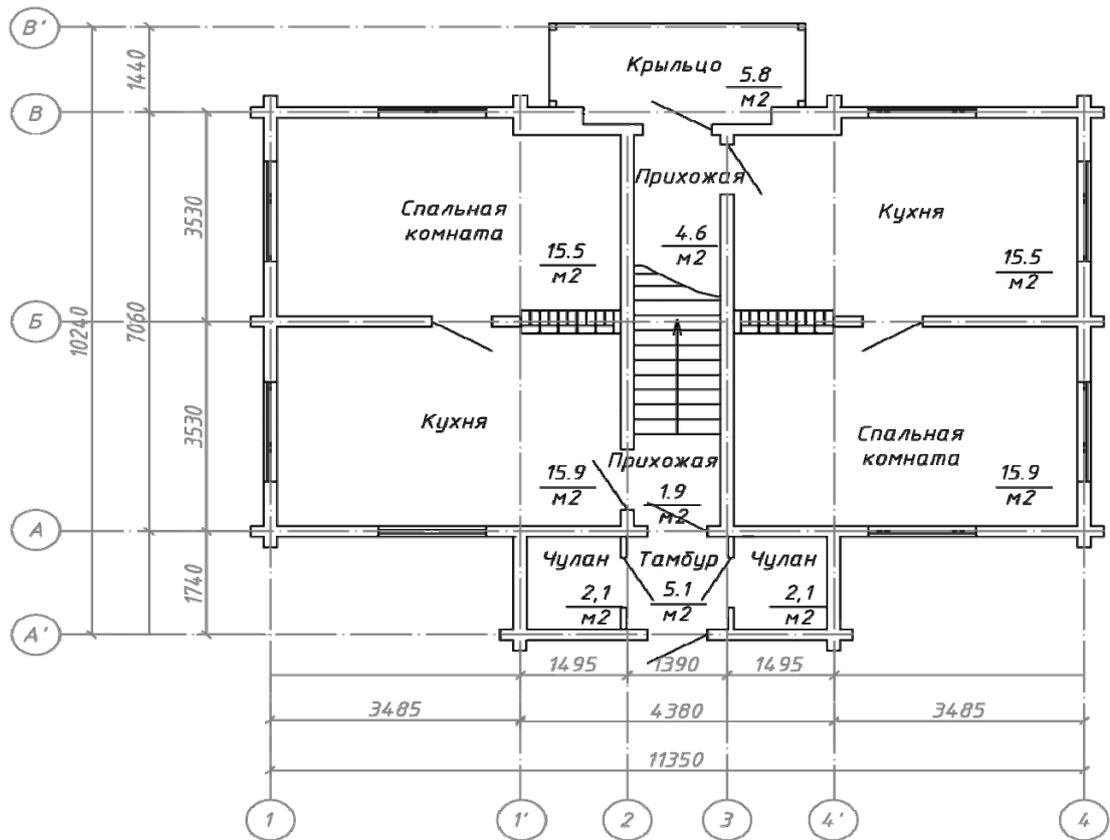


Рис. 3. План первого этажа

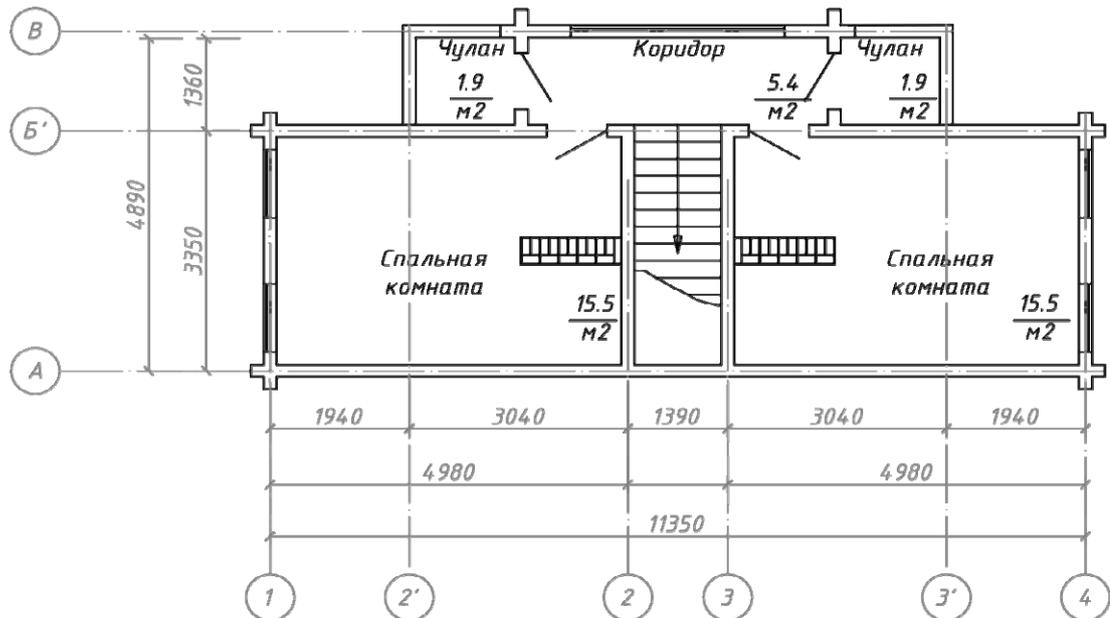


Рис. 4. План второго этажа

Исследовательская часть

Исследования состояния жилого дома и обсуждение подходов к сохранению здания выполнены во время экспедиций в октябре 2021 г. и апреле 2022 г.

Наружные и внутренние стены здания выполнены из брусьев размером 18×20 см. Балки перекрытий и арки выполнены из бруса. Обрешетка – необрезная доска.

Выявлены механические и биологические повреждения дранки, рубероидных листов крыши, поражение гнилью обрешетки, кобылок, подшивки кровли, арок, верхних венцов стен, наличие колоний грибов, физический износ отделочных слоев перекрытий.

Состояние деревянных конструкций здания

Дом строили заключенные ГУЛАГа. Бревна привозили из леса, расположенного рядом. Несмотря на то, что квалификация большинства работников была низкой, состояние конструкций и узлов подтверждает качественное выполнение всех элементов. Например, коньковый узел стропильных ног и соединение повышенной затяжки и стропильных ног выполнены тщательно с минимальными зазорами, что не оказало негативного влияния на изменение пространственной неизменяемости дома. Следует отметить и надежное выполнение ленточного фундамента.

Внутренние деревянные стены находятся в хорошем состоянии (рис. 5).



Рис.5. Внутренняя стена по оси 2 жилого дома.
Фото Селютиной Л.Ф.

Обрешетка, балки перекрытий, арки, связи здания имеют биоповреждения; брусья стен имеют следы возгорания и горения (рис. 5, 6, 7).

Коньковый узел арки выполнен встык. Встык – самое точное соединение; нужно очень точно подрезать торцы стропильных ног, чтобы обеспечить упор друг в друга.

Причиной загнивания конструкций крыши и перекрытий является попадание осадков внутрь здания. Незапертые входы в здание, посещение здания бездомными привели к возгоранию стены в кладовой на втором этаже (рис. 9).



Рис. 6. Обрешетка расположена на верхнем поясе арок (обрешетка вдоль буквенных осей здания). На левой арке видно, что соединение арки с повышенной затяжкой выполнено врубкой полусковороднем. Фото Селютиной Л.Ф.



Рис. 7. Торцевая арка здания. Крепление повышенной затяжки к стропильной ноге производится врубкой полусковороднем. Чердачное перекрытие разрушено. Фото Селютиной Л.Ф.



Рис. 8. Узел сопряжения элементов чердачного перекрытия и арки крыши.
Крепление стропильной ноги к верхнему венцу скобой. Фото Корнеева А.А., апрель 2022 г.



Рис. 9. Разрушение бревен стены здания в результате пожара
(второй этаж, кладовая). Фото Корнеева А.А., апрель 2022 г.

Результаты

Здание находится в аварийном состоянии, и разрушение его конструкций происходит очень быстро. В период с октября 2021 г. (первая экспедиция в Повенец) по апрель 2022 г. (вторая экспедиция) произошли заметные разрушения перекрытия первого этажа. Происходит развитие биоповреждений деревянных конструкций, появились признаки нарушения конструктивной безопасности. Состояние конструкций здания, узлов, появление признаков нарушения пространственной жесткости здания указывают на необходимость срочного проведения мероприятий с целью сохранения объекта.

Обеспечение конструктивной безопасности здания в целях сохранения объекта культурного наследия регионального значения требует рассмотрения и проведения срочных мероприятий.

Варианты сохранения объекта культурного наследия в Повенце

Задача сохранения объекта культурного наследия основана на рассмотрении здания как части национальной культуры.

Сохранение здания возможно в двух вариантах. Первый вариант: воссоздание здания на прежнем месте. Пример сохранения ситовой усадьбы в исходном положении приведен М. Гостыла и М. Вазио [8].

Второй вариант: адаптивное повторное использование здания. Шабиан Яздани Мехр обсуждает и критически анализирует эволюцию выдающихся теорий сохранения зданий XIX-го и XX-го веков и их связь с современной практикой адаптивного повторного использования, а также их применение [9].

С предложением о переносе жилого дома на территорию, принадлежащую церкви, и использовании здания в качестве объекта культурного наследия, выступил Соболев Р.Ю., настоятель храма Николая Чудотворца в Повенце. Храм Николая Чудотворца [14] расположен в 70 м от дома № 6.

Результаты обследования свидетельствуют о том, что воссоздание здания на прежнем месте потребует значительных средств. Предложение настоятеля храма Николая Чудотворца о переносе здания на участок, отведенный храму и, таким образом, образовании исторического центра, посвященного памяти строителей Беломорско-Балтийского канала, является актуальным и может быть осуществлено при устранении существующих юридических препятствий.

Выводы

Исследование состояния жилого дома в Повенце является продолжением предыдущих работ [11, 12], выполненных с целью изучения деревянных конструкций исторических зданий Республики Карелия.

Жилой дом в Повенце (Карелия), построенный заключенными ГУЛАГа в 1930 г., является объектом культурного наследия регионального значения,

Потребность сохранения памятника высока и особенно актуальна в связи с возможной утратой наследия, связанного с историей строительства Беломорско-Балтийского канала и человеческими судьбами заключенных ГУЛАГа.

Выполнено обследование здания, разработаны архитектурно-строительные чертежи. Результаты обследования показывают, что здание находится в аварийном состоянии и промедление с выполнением работ по его сохранению приведет к разрушению объекта культурного наследия.

Рассмотрены два варианта сохранения здания: воссоздание жилого дома на прежнем месте [8] и адаптивное повторное использование здания [9].

Первый вариант предусматривает строительство нового здания на прежнем месте.

Вторым вариантом сохранения является воссоздание здания на территории храма свт. Николая Чудотворца [10]. Сохранившиеся в хорошем состоянии брусья можно использовать при возведении внутренних стен.

Выполненные исследования расширяют знания специалистов в области деревянных конструкций, продолжают научные исследования в области сохранения объектов культурного наследия.

Список литературы

1. Овсянникова, Т.Ю. Оценка рисков утраты недвижимых объектов культурного наследия общества / Т.Ю. Овсянникова, Ю.Б. Скуридина, О.В. Котова // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 3 (7). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-riskov-utraty-nedvizhimyh-obektov-kulturnogo-naslediya-obschestva>.
2. ГОСТ Р 55567-2013. Порядок организации и ведения инженерно-технических исследований на объектах культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 35 с.
3. ГОСТ 319374-2011. Правила обследования и мониторинга технического состояния: ГОСТ 319374-2011. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 54 с.
4. Bezas, K. Structural Health Monitoring in Historical Buildings / K. Bezas, V. Koufoudakis, G. Tsoumanis, K. Kabassi, K. Oikonomou // A Network Approach. Heritage. – 2020. – № 3 (3). – P.796-818. – URL: <https://doi.org/10.3390/heritage3030044>.
5. Пожары в исторических зданиях в России в 2004-2021 годах. – URL: <https://ria.ru/20210412/pozhary-1727935648.html>.
6. В Карелии сгорела Успенская церковь, уникальный памятник деревянного зодчества конца XVIII века. – URL: <https://tverdyi-ak.livejournal.com/3617667.html>.
7. Figueiredo, R. Understanding the Impacts of the October 2017 Portugal Wildfires on Cultural Heritage / R. Figueiredo, E. Paupério, X. Romão // Portugal Wildfires on Cultural Heritage. – Heritage. – 2021. – № 4 (4). – P. 2580–2598. – URL: <https://doi.org/10.3390/heritage4040146>.
8. Gosztyła, M. Wooden architecture of sieve farmsteads in Biłgoraj on the example of the farmstead at Nadstawna 32 St./ M. Gosztyła, M. Wazio // VII Conference SOLINA Sustainable Development: Architecture – Building Construction – Environmental Engineering and Protection Innovative Energy-Efficient Technologies – Utilization of Renewable Energy Sources, E3S Web Conf. 2018. – Vol 49. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900035>.
9. Yazdani Mehr, Shabnam. Analysis of 19th and 20th Century Conservation Key Theories in Relation to Contemporary Adaptive Reuse of Heritage Buildings / Shabnam Yazdani Mehr // Heritage. – 2019. – № 2 (1). – P. 920–937. – URL: <https://doi.org/10.3390/heritage2010061>.
10. Храм святителя Николая в п. Повенец Медвежьегорского района. – URL: <http://eparhia.karelia.ru/povenets.htm>.
11. Селютина, Л.Ф. Деревянные конструкции здания постройки 1914 года в поселке Эссойла / Л.Ф. Селютина. – Текст: электронный // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1. – С.119-125. ISSN 2072-2958. – URL: <http://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/3054>.
12. Макаревич, Е.А. Объект истории архитектуры и культурного наследия: часовня Николая Чудотворца в Мелойгубе (республика Карелия) / Е.А. Макаревич, Л.Ф. Селютина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 175–183. – URL: <https://library.pguas.ru/xmlui/handle/123456789/3127>.

References

1. Ovsyannikova, T.Yu. Assessment of risks of loss of immovable objects of cultural heritage of the society / T.Yu. Ovsyannikova, Yu.B. Skuridina, O.V. Kotova // Bulletin of Tomsk State University. – 2009. – No. 3 (7). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-riskov-utraty-nedvizhimyh-obektov-kulturnogo-naslediya-obschestva>.

2. GOST R 55567-2013. The procedure for organizing and conducting engineering and technical research at cultural heritage sites. Historical and cultural monuments. General requirements. – M.: Standartinform, 2014. – 35. p.
3. GOST 319374-2011. Rules of inspection and monitoring of technical condition: GOST 319374-2011. – Introduction. 2014-01-01. – M.: Standartinform, 2014. – 54 p.
4. Bezas, K. Structural Health Monitoring in Historical Buildings / K.Bezas, V. Komianos, G. Koufoudakis, G. Tsoumanis, K. Kabassi, K. Oikonomou // A Network Approach. – Heritage. – 2020. – No. 3 (3). – P.796–818. – URL: <https://doi.org/10.3390/heritage3030044>.
5. Fires in historical buildings in Russia in 2004-2021. – URL: <https://ria.ru/20210412/pozhary-1727935648.html>.
6. The Assumption Church, a unique monument of wooden architecture, burned down in Karelia XVIII v. – URL: <https://tverdyi-znak.livejournal.com/3617667.html>.
7. Figueiredo R. Understanding the Impacts of the October 2017 Portugal Wildfires on Cultural Heritage / R. Figueiredo, E. Paupério, X.Romão // Heritage. – 2021. – 4(4). – P.2580–2598. – URL: <https://doi.org/10.3390/heritage4040146>.
8. Gosztyła, M. Wooden architecture of sieve farmsteads in Biłgoraj on the example of the farmstead at Nadstawna 32 St./M.Gosztyła, M. Wazio // VII Conference SOLINA Sustainable Development: Architecture – Building Construction – Environmental Engineering and Protection Innovative Energy-Efficient Technologies – Utilization of Renewable Energy Sources, E3S Web Conf. 2018.–Vol. 49. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900035>.
9. Shabnam, Y. M. Analysis of 19th and 20th Century Conservation Key Theories in Relation to Contemporary Adaptive Reuse of Heritage Buildings/ Y. M. Shabnam // Heritage.– 2019, 2(1), 920-937. – URL: <https://doi.org/10.3390/heritage2010061>.
10. The church of St. Nicholas in the village of Povenets Medvezhegorsk district. – URL: <http://eparhia.karelia.ru/povenets.htm>.
11. Selutina, L.F. Wooden structures of the building built in 1914 on the village of Essoila /L.F. Selutina // Regional Architecture and engineering. – 2020. – No.1.– P.119–125. – URL: <http://library.pguas.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/3054>.
12. Makarevich, E.A. The object of the history of architecture and cultural heritage: the chapel of st. Nicholas the wonderworker in Meloy Guba (Republica Karelia)/ E.A. Makarevich, L.F. Selutina // Regional Architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P.175–183.

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

Сазонова Марина Алексеевна,
магистрант
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

Sazonova Marina Alekseevna,
Master student
E-mail: gsia@pguas.ru

ПЕРЕПЛАНИРОВКА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ: ОПТИМИЗАЦИЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.А. Сазонова

Приведены результаты сравнительного анализа проектов комплексной реконструкции жилых зданий по объемно-планировочным решениям с определением алгоритма разработки оптимального варианта перепланировки. Установлено, что конструктивные схемы существующих жилых зданий при перепланировке определяют возможность преобразования либо сохранения жилых площадей, конструктивно-планировочного остова, уровня благоустройства и инженерного обеспечения. Приведена последовательность действий для оптимизации перепланировки, дана компоновка этапов разработки варианта объемно-планировочного решения жилой ячейки, представлены варианты перепланировки и дифференциация реконструируемых жилых ячеек. Исследована зависимость между показателями комфорта при проектировании реконструкции и затратами на переустройство несущих конструкций. Предложен алгоритм перепланировки при реконструкции в максимально короткие сроки и варианты схем жилых ячеек при сплошной перепланировке. Показана возможность увеличения общей площади жилых ячеек на 25 % в зависимости от пропорциональных размеров получаемых при перепланировке помещений, позволяющая снизить затраты на устройство несущих конструкций и получить комфортабельное жильё в пределах существующих морально и физически устаревших зданий.

Ключевые слова: проектирование, жилое здание, реконструкция, физический и моральный износ, перепланировка, объемно-планировочное решение, функциональная зона, благоустройство

REDEVELOPMENT OF RESIDENTIAL BUILDINGS DURING RECONSTRUCTION: OPTIMIZATION AND SEQUENCE OF DESIGNING

M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.A. Sazonova

A comparative analysis of the projects of complex reconstruction of residential buildings according to space-planning solutions with the definition of the algorithm of the stages of development of the optimal variant is carried out. It is established that the structural schemes of the existing residential buildings, during redevelopment determine transformation and preservation of residential areas, preservation of structural and planning framework and indicators of landscaping and

engineering support. The sequence for the optimization of redevelopment, the layout of the stages of the development of a variant of spatial planning solution of a residential cell, redevelopment options and differentiation of reconstructed residential cells are given. The dependence between comfort indicators in the design of reconstruction and the cost of rebuilding load-bearing structures is investigated. The algorithm of redevelopment during reconstruction in the shortest possible time and variants of schemes of residential cells during continuous redevelopment are proposed. An increase in the total area of residential cells by 25 % is shown, depending on the proportional dimensions of the premises obtained during redevelopment, which allows reducing the cost of installing load-bearing structures and obtaining comfortable housing within the existing morally and physically obsolete buildings.

Keywords: design, residential building, reconstruction, physical and moral deterioration, redevelopment, spatial planning solution, functional area, landscaping

Проблема комплексной реконструкции жилых зданий не менее актуальна, чем строительство нового жилья, т.к. при реконструкции снижается процент не только физического, но и морального износа за счет перепланировки, повышается инженерное благоустройство зданий. Область архитектурно-строительного проектирования, занимающаяся разработкой проектно-сметной документации по реконструкции, эксплуатации и ремонту жилого фонда, решает комплексные задачи архитектуры и градостроительства, энергоэффективности и энергосбережения, технического обслуживания и санитарной очистки, технологии и организации ремонтно-строительных работ, автоматизации и экономики.

Реконструкция и ремонты всех типов стали частью технической эксплуатации городских объектов жилищно-коммунального комплекса. Воздействующие на существующие жилые здания факторы в полной мере учитываются при проектировании реконструкции, ремонта и разработке мероприятий по эксплуатации; при системном подходе к процессу реконструкции можно найти наиболее целесообразные варианты решений.

При системном проектировании реконструкции жилых зданий создается комфортная среда, а не только физический объект. Уровень комфорта в реконструируемых зданиях закладывается, как показал анализ, на уровне действующих нормативных требований. Однако некоторые показатели (размеры квартир и отдельных комнат, конструктивно-планировочный остов здания и др.) уже соответствуют действующим нормативам, а иногда и перспективным показателям. Рассмотрение проектной документации по реконструкции жилых зданий предполагает предварительное изучение представленной в ней системы графических и текстовых материалов, показывающих комплекс решаемых архитектурных, конструктивных, экономических и других вопросов.

Предполагается, что для максимально возможного сохранения существующих конструктивных и планировочных элементов целесообразно решать жилые ячейки с расчетом на перспективу, что позволит снизить затраты на переустройство несущих конструкций до 50 % и исключить последующие перепланировки. Комфортность при реконструкции следует определять с учетом прогнозируемых показателей планировки, благоустройства и инженерного обеспечения. При этом состав мероприятий, зависящих от конкретных градостроительных и технических условий и влияющих на перепланировку, может варьироваться в значимых пределах.

Известные для объектов нового строительства конструктивные схемы в реконструируемых жилых зданиях (при перепланировке) требуют особого решения с целью сохранения жилых площадей:

– во-первых, переустройство уже существующей стеновой конструкции возможно в виде разделения её на секции с лестничными клетками (новыми или прежними) или на секции с отдельными жилыми ячейками; а также на ячейки, разделенные на жилую и второстепенную зоны с организацией мест для размещения инженерных коммуникаций; такая последовательность стала основой алгоритма по оптимизации перепланировки при реконструкции (рис. 1, 2);

– во-вторых, в отличие от нового строительства, где часто выдерживаются параметры модульной системы, при реконструкции возможна разработка более разнообразных планировочных решений с учетом закладываемых в проект требований.

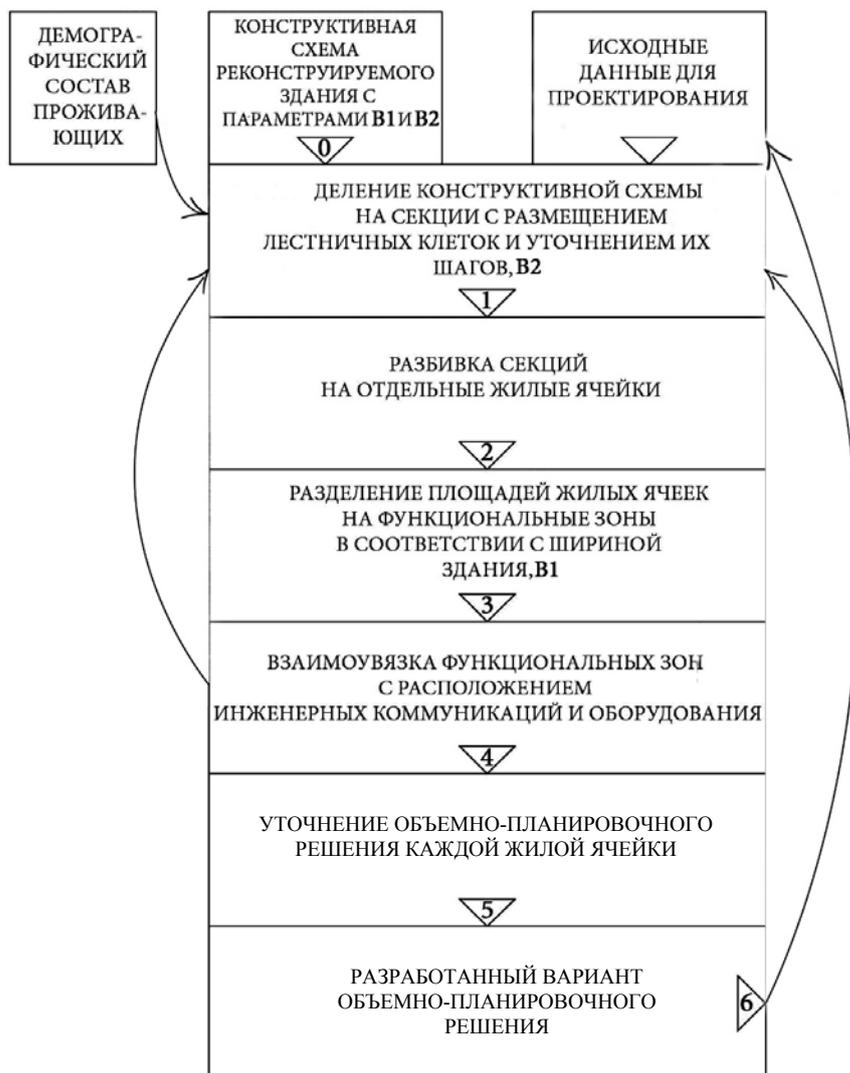


Рис. 1. Схема определения оптимального варианта объемно-планировочного решения

При этом следует обосновать преимущества преобразования реконструируемых зданий и точно установить состав и этапы реконструкции. Для этого были определены и систематизированы этапы выбора объемно-планировочного решения:

- 1 этап: определение варианта перепланировки реконструируемого здания;
- 2 этап: разработка функциональной схемы и объемно-планировочного решения здания;
- 3 этап: взаимоувязка объемно-планировочного решения и конструктивной схемы здания;
- 4 этап: определение параметров эксплуатации здания и работы эксплуатирующих организаций;
- 5 этап: расчет технико-экономических показателей принятого варианта перепланировки здания;
- 6 этап: программное обеспечение разработки вариантов перепланировки с целью оптимизации процесса реконструкции.

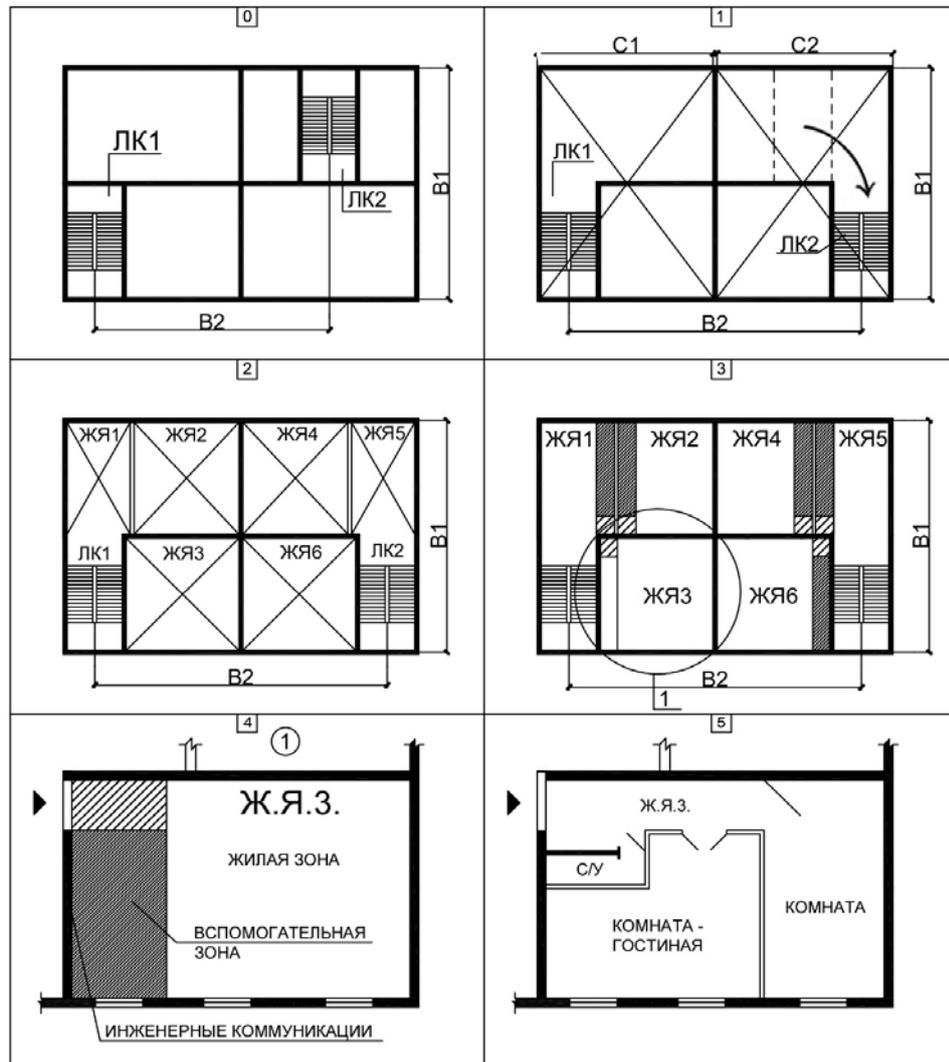


Рис. 2. Последовательность оптимизации перепланировки

В процессе анализа проектно-сметных материалов по реконструкции жилых зданий были определены два основных варианта перепланировки – выборочная и сплошная, выбор которых зависит от физического и морального износа здания, а также уровня благоустройства в зависимости от соответствия действующим нормативным требованиям.

Выборочная перепланировка выполняется при переустройстве отдельных помещений с обеспечением их инженерными коммуникациями и применяется при следующих показателях:

- существующее объемно-планировочное решение и благоустройство в большей степени соответствуют действующим нормам и требованиям; необходимы небольшие преобразования – такой случай имеет место в зданиях с небольшим сроком службы и физическим износом стен не более 35 %;

- геометрические показатели жилых ячеек могут быть изменены путем объединения или разделения существующих площадей с помощью перегородок, а структура вновь создаваемых помещений должна соответствовать функциональному зонированию и быть оснащена необходимыми инженерными коммуникациями и оборудованием; физический износ стен при этом составляет не более 35 %;

– физический износ стеновых конструкций реконструируемого здания более 50 % и остаточный срок службы невелик – выполнение сплошной перепланировки нецелесообразно.

Сплошная перепланировка выполняется при полной переработке объемно-планировочного решения с оснащением инженерным оборудованием, соответствующим действующим нормам и требованиям.

Целесообразным применение сплошной перепланировки становится возможным в случае, когда физический износ стен не более 35 %, перекрытия находятся в хорошем состоянии или небольшая часть их требует замены. При сплошной перепланировке может изменяться расположение лестничных клеток и функциональных элементов этажа, могут появляться новые конструктивные элементы (армопояса, стены, столбы и др.). Подобные мероприятия при сплошной перепланировке дают возможность получить жилые ячейки, соответствующие действующим или даже перспективным показателям, с высоким уровнем благоустройства.

При перепланировке здания объемно-планировочное решение квартир выполняется без четкого разделения на функциональные зоны (жилую и вспомогательную), а удобство полученных жилых ячеек оценивается площадью всех её помещений, наличием инженерных коммуникаций и соответствием действующим нормативам.

Влияние факторов, обуславливающих реконструкцию, определяет отличие пропорциональных размеров проектируемых помещений от стандартных, а увеличение общей площади жилых ячеек достигает 25 %. Поэтому анализ реконструируемых зданий позволил дифференцировать жилые ячейки (при одинаковых значениях общей площади) в зависимости от вида инженерного благоустройства:

- жилые ячейки в домах с полным инженерным благоустройством;
- жилые ячейки в жилом фонде с ограниченным уровнем благоустройства; здесь на 5-7 % общей площади предусматривается установка необходимого инженерного оборудования.

Изучив проектно-сметную документацию по полной реконструкции жилых зданий, были определены основные варианты объемно-планировочного решения, которые сведены в таблицу.

Варианты плана жилого здания с расположением жилых ячеек при сплошной перепланировке

Варианты расположения жилых ячеек	Оценка варианта	Рекомендуемое количество комнат в жилой ячейке
1	2	3
Одностороннее расположение жилых ячеек вдоль одного из фасадов	Преимущества – возможность разнообразных объемно-планировочных решений жилой ячейки, размещение в существующей конструктивной схеме ячеек разнообразной формы и геометрических параметров. Недостатки – иногда проходные комнаты, односторонняя инсоляция комнат	Неограниченный диапазон – 1-5
Двухстороннее расположение жилых ячеек вдоль противоположных фасадов	Преимущества – жилые ячейки расположены по всей ширине корпуса, двухсторонняя инсоляция и сквозное проветривание. Недостатки – применение в зданиях с ограниченной шириной корпуса	2-5

1	2	3
Угловое расположение жилых ячеек	Преимущества – комнаты в жилых ячейках из-за двухсторонней ориентации имеют достаточное проветривание, инсоляцию. Недостатки – избыточное охлаждение в зимний период	3-4
Торцевое расположение жилых ячеек	Преимущества – комнаты в жилых ячейках из-за двух- или трехсторонней ориентации имеют достаточное проветривание, инсоляцию. Недостатки – избыточное охлаждение угловых комнат в зимний период	3-5

Выводы:

1. При разработке проектов реконструкции приемы объемно-планировочного решения целесообразно выполнять комплексным методом с учетом региональных особенностей, что позволит точно подтвердить правильность окончательного варианта.

2. Автоматизацию процесса проектирования реконструкции рекомендуется внедрять на этапе принятия объемно-планировочного решения с использованием информационно-поисковых систем для выбора оптимального варианта.

3. На всех этапах проектирования необходимо использовать предлагаемый алгоритм перепланировки, что даст возможность получить оптимальный вариант в максимально короткие сроки.

Список литературы

1. Дерина, М.А. Сравнительный анализ технико-экономических показателей проектных решений жилых и общественных зданий / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.А. Чупряков // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №1. – С.75–79.

2. Дерина, М.А. Архитектурно-строительное проектирование: проблемы оценки качества / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2. – С.75–79.

3. Дерина, М.А. Оценка и расчет проектных решений зданий с использованием системы технико-экономических показателей / М.А. Дерина, Г.А. Семина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – №1(32). – С.75–79.

4. 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.

5. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.203–208.

6. Петрянина, Л.Н. Методика повышения эффективности использования городских территорий при реконструкции жилых районов / Л.Н. Петрянина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1–2(35).

7. 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.

8. Долаева, З.Н. О некоторых проблемах реконструкции жилых зданий / З.Н. Долаева, А.Р. Казиева // Молодой ученый. – 2016. – №27(131). – С. 68–70.

9. 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.
10. 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.
11. Абрамян, С.Г. Реконструкция зданий и сооружений: основные проблемы и направления / С.Г. Абрамян // Инженерный вестник Дона. – 2016. – №4. – С.1–9.
12. Петрянина, Л.Н. Реконструкция городской среды: новая и сложившаяся застройка / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, П.В. Монастырев // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №4. – С. 83–86.

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, M.A. Chupryakov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1. – P.75–79.
2. Derina, M.A. Architectural and construction design: problems of quality assessment / M.A. Derina, L.N. Petryanina, O.L. Viktorova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No.2. – P.75–79.
3. 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.
4. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina, M.A. Derina, Yu.S. Sergunina // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1(42). – P.212–217.
5. 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.
6. Petryanina, L.N. Methodology for improving the efficiency of the use of urban areas in the reconstruction of residential areas / L.N. Petryanina, A.V. Grechishkin // Regional Architecture and engineering. – 2018. – No.1–2(35).
7. 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.
8. Dolaeva, Z.N. On some problems of reconstruction of residential buildings / Z.N. Dolaeva, A.R. Kazieva // A young scientist. – 2016. – No.27(131). – P. 68–70.
9. Petryanina L.N., Buldygina A.A., Karpova O.V. Environmental management system in a project organization. Regional architecture and construction. 2017, No. 4, p.164.
10. 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.
11. Abrahamyan, S.G. Reconstruction of buildings and structures: the main problems and directions / S.G. Abrahamyan // Electronic scientific journal.Engineering Bulletin of the Don. – 2016. – No. 4. – P.1–9.
12. Petryanina, L.N. Reconstruction of the urban environment: new and established buildings / L.N. Petryanina, M.A. Derina, P.V. Monastyrev // Regional Architecture and engineering. – 2016. – No.4. – P. 83–86.