

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Главная редакция:

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

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

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 17.03.2020.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 27,125. Тираж 500 экз. Первый завод 100.
Заказ № 56.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

1(42)/2020

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

Королев Е.В., Гришина А.Н.
ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ
КАК УНИВЕРСАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ
И ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА 5

Дмитриев К.С.
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ
ПРИ СЖАТИИ АЭРИРОВАННЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ШИХТЫ 16

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ЧАСТНЫХ
КРИТЕРИЕВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 25

Береговой В.А., Лавров И.Ю.
3D-ПРИНТЕР ДЛЯ ПЕЧАТИ СТРОИТЕЛЬНОЙ
КЕРАМИКИ 32

**Вилкова Н. Г., Фокин Г.А., Мишина С.И.,
Мазурин Н.Н.**
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА СУСПЕНЗИЙ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ
ТРЕХФАЗНЫХ ПЕН И МАТЕРИАЛОВ
С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ..... 37

Черкасов В.Д., Смиркин А.С., Бородин А.В.
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА
СЛОЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ 45

**Черкасов В.Д., Волоцкой А.Н.,
Юркин Ю.В., Авдонин В.В.**
ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ НАПОЛНИТЕЛЕЙ
НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА..... 52

Гарькина И.А., Данилов А.М.
МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
В ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПОЗИТОВ..... 63

Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аласханов А.Х.
ВЯЖУЩЕЕ ИЗ ПЫЛЕВИДНОЙ ФРАКЦИИ
ФРАГМЕНТОВ РАЗРУШЕННЫХ ЗДАНИЙ
И СООРУЖЕНИЙ ИРАКА 69

© Авторы публикаций, 2020

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2020

© ПГУАС, 2020

Макридин Н.И., Максимова И.Н., Полубарова Ю.В. ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ОБЖИГА ОПОКИ НА ЕЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.....	77	Снежкина О.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕ- ТОННЫХ БАЛОК С ОТНОСИТЕЛЬНЫМ ПРОЛЕТОМ СРЕЗА a/h_0 ОТ 1 ДО 3.....	156
Логанина В.И., Сергеева К.А. К МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЯ АДГЕЗИИ ЛЬДА К ПОВЕРХНОСТЯМ	86	Гришин Б.М., Бикунова М.В., Кошев А.Н., Шенин А.И. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОАГУЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ПРИ БЕЗНАПОРНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ПУЗЫРЬКАМИ ВОЗДУХА РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРНОСТИ... 162	162
Фролов М.В. ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В СТЕНАХ ИЗ ГАЗОБЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНОГО ОТДЕЛОЧНОГО ПОКРЫТИЯ	90	Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Пикалов А.А. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОСАЖДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ФИЛЬТРУЮЩИМИ КАРТРИДЖАМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА	169
Логанина В.И., Сергеева К.А. ОЦЕНКА СУПЕРГИДРОФОБНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АКРИЛОВОЙ СМОЛЫ.....	98	Аверкин А.Г., Королева Т.И., Иващенко Н.Ю. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ КАНАЛЬНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ	176
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	104	Васин Л.А. КОНЦЕПЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСВЕЩЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЛЫМ ДОМОМ	181
Саргсян А.Е., Гукова Е.Г. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ	104	Королева Т.И., Мельников И.Е., Иващенко Н.Ю. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ	187
Гучкин И.С., Ласьков Н.Н., Колос В.С. СБОРНО-МОНОЛИТНЫЙ КАРКАС ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ СЕВЕРА	113	АРХИТЕКТУРА.....	195
Селютин Л.Ф. ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЯ ПОСТРОЙКИ 1914 ГОДА В ПОСЕЛКЕ ЭССОЙЛА	119	Гельфонд А.Л., Моисеенко В.А., Ерофеева И.В. ОЛИМПИЙСКИЙ КОМПЛЕКС МЮНХЕНА КАК ПРЕДВЕСТНИК ДЕКОНСТРУКТИВИЗМА	195
Гарькин И.Н., Саденко Д.С. ДЕФОРМАТИВНО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ.....	126	Петрянина Л.Н., Дерина М.А., Сергунина Ю.С. КОНЦЕПЦИЯ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕКОНСТРУКЦИИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ.....	212
Береговой А.М., Береговой В.А. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ЭНЕРГОАКТИВНУЮ КОНСТРУКЦИЮ НАРУЖНОЙ СТЕНЫ.....	130		
Шенин А.И., Зернов В.В., Зайцев М.Б. УСИЛЕНИЕ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕНДОВ СТРОПИЛЬНЫХ КРЫШ	135		
Бакушев С.В. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ИДЕАЛЬНО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЁННОМ СОСТОЯНИИ	140		

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Frolov M.V. ESTIMATION OF A MOISTURE REGIME IN WALLS FROM GAS CONCRETE DEPENDING ON THE CHARACTERISTICS OF THE EXTERNAL FINISHING	90
Korolev E.V., Grishina A.N. FRACTAL DIMENSION AS A UNIVERSAL CHARACTERISTIC OF PARAMETERS STRUCTURE AND COMPRESSIVE STRENGTH OF A MATERIAL	5	Loganina V.I., Sergeeva K.A. ASSESSMENT OF SUPERHYDROPHOBIC PROPERTIES OF COATINGS ON ACRYLIC RESIN BASIS	98
Dmitriev K.S. THE CALCULATIONAL METHODOLOGY OF COMPRESSIVE RESISTANCE UNDER COMPRESSION OF CHEMICALLY DRY MIX AERATED CERAMIC PRODUCTS	16	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	104
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. FORMALIZED DESCRIPTION OF PARTICULAR CRITERIA FOR BUILDING MATERIALS.....	25	Sargsyan A.E., Gukova E.G. ASSESSMENT IMPLEMENTATION OF PILE FOUNDATION EFFECTIVENESS	104
Beregovoy V.A., Lavrov I.Yu. 3D-PRINTER FOR PRINTING CONSTRUCTION CERAMICS	32	Guchkin I.S., Laskov N.N., Kolos V.S. PREFABRICATED MONOLITHIC FRAME OF A HIGH-RISE BUILDING FOR CONSTRUCTION IN THE NORTH.....	113
Vilkova N.G., Fokin G.A., Mishina S.I., Mazurin N.N. ULTRASONIC TREATMENT OF SUSPENSIONS FOR PRODUCING STABLE THREE PHASE FOAMS AND MATERIALS WITH IMPROVED PROPERTIES.....	37	Selutina L.F. WOODEN STRUCTURES OF THE BUILDING BUILT IN 1914 IN THE VILLAGE OF ESSOILA.....	119
Cherkasov V.D., Smirkin A.S., Borodin A.V. VIBRATION-ABSORBING PROPERTIES OF LAYERED MATERIALS	45	Garkin I.N., Sadenko D.S. DEFORMABLE PROPERTIES OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE FLOORS	126
Cherkasov V.D., Volotskoy A.N., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V. THE INFLUENCE OF FILLERS POLARITY ON DYNAMIC PROPERTIES OF DAMPING POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON ETHYLENE-VINYL ACETATE	52	Beregovoy A.M., Beregovoy V.A. HEAT TRANSMISSION THROUGH ENERGY-ACTIVE DESIGN OF EXTERIOR WALL.....	130
Garkina I.A., Danilov A.M. SYSTEM ANALYSIS METHODS IN DESIGN OF COMPOSITES.....	63	Shein A.I., Zernov V.V., Zaytsev M.B. REINFORCEMENT OF VALLEY BEARING ELEMENTS OF ROOF TRUSSES.....	135
Lesovik R.V., Ahmed A.A.A., Alaskhanov A.K. BINDER FROM THE DUST FRACTION FROM FRAGMENTS OF DESTROYED BUILDINGS AND STRUCTURES IN IRAQ ..	69	Bakushev S.V. DIFFERENTIAL EQUATIONS OF EQUILIBRIUM OF AXISYMMETRIC DEFORMATION OF ELASTIC-PERFECTLY-PLASTIC CONSTRUCTION ELEMENT AT COMBINED STRESS STATE.....	140
Makridin N.I., Maksimova I.N., Polubarova Y.V. THE INFLUENCE OF PHASE TRANSFORMATIONS IN THE PROCESS OF FLASK BURNING ON ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES.....	77	Snezhkina O.V. SIMULATION THE WORK OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH A RELATIVE SPAN OF THE CUT a/h_0 FROM 1 TO 3.....	156
Loganina V.I., Sergeeva K.A. TO THE METHOD OF MEASURING ICE ADHESION TO SURFACES	86	ENGINEERING SYSTEMS.....	162
		Grishin B.M., Bikunova M.V., Koshev A.N., Shein A.I. THE EFFECTIVENESS OF WATER COAGULATION TREATMENT WITH NON-PRESSURE MIXING BY AIR BUBBLES HAVING VARIOUS DISPERSION.....	162

<p>Usachev A.P., Shuraitis A.L., Biryukov A.V., Pikalov A.A. DEVELOPMENT THE METHODOLOGY FOR PREVENTION DEPOSITION OF MECHANICAL IMPURITIES IN THE GAP BETWEEN FILTER CARTRIDGES OF PRELIMINARY AND THIN CLEANING OF A TWO-STAGE GAS FILTER..... 169</p> <p>Averkin A.G., Koroleva T.I., Ivaschenko N.Y. PROCESSES MODELING AND IMPROVEMENT THE EQUIPMENT OF CHANNEL NATURAL VENTILATION..... 176</p> <p>Vasin L.A. MANAGEMENT OF ENGINEERING NETWORKS: INTELLECTUAL SYSTEM OF TERMOREGULATION OF A RESIDENTIAL HOUSE 181</p>	<p>Koroleva T.I., Melnikov I.E., Ivaschenko N.Y. ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF RESISTANCE OF HEAT TRANSFER OF AN AIR LAYER FOR A INHOMOGENEOUS PROTECTION STRUCTURE187</p> <p>ARCHITECTURE 195</p> <p>Gelfond A.L., Moiseenko V.A., Yerofeeva I.V. THE OLYMPIC COMPLEX OF MUNICH AS THE FORERUNNER OF DECONSTRUCTIVISM..... 195</p> <p>Petryanina L.N., Derina M.A., Sergunina Yu.S. A CONCEPT OF TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF URBAN DEVELOPMENT RECONSTRUCTION.....212</p>
--	--

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691: 51-74

*Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет*

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

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, врио ректора
E-mail: KorolevEV@mgsu.ru

Гришина Анна Николаевна,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник НОЦ «Наноматериалы
и нанотехнологии», доцент кафедры
«Строительные материалы и
материаловедение»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

*National Research Moscow State University of
Civil Engineering*

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

Korolev Evgeny Valer'evich,
Doctor of Sciences, Acting Rector
E-mail: KorolevEV@mgsu.ru

Grishina Anna Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Senior Researcher of
Scientific and Educational Center
«Nanomaterials and Nanotechnology»,
Associate Professor of the department
«Constriction materials and Materials
Science»
E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ КАК УНИВЕРСАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА

Е.В. Королев, А.Н. Гришина

Представлена апостериорная методика расчета фрактальной размерности по прочности и данным по пористости композитов. Показано, что анализ кинетических зависимостей изменения фрактальной размерности от изменения рассматриваемого технологического решения (введения дисперсной фазы, модифицирующей добавки и т.д.) позволяет выявить наличие особенностей в процессе структурообразования материала. Предложен критерий для оценки эффективности и классификации новых технологических решений, разрабатываемых для повышения эксплуатационных свойств строительных материалов. Этот критерий характеризует физико-химическую природу прочности материала: величина R_0 – прочность бездефектного материала – характеризует химические и физические свойства вещества (параметры кристаллов, энергия связи и т.д.), из которого изготовлен материал, а величина D_H – фрактальная размерность – физические параметры его структуры.

Ключевые слова: фрактальная размерность, строительные композиты, прочность, пористость, структурообразование, структура

FRactal Dimension as a Universal Characteristic of Parameters Structure and Compressive Strength of a Material

E.V. Korolev, A.N. Grishina

A posteriori method for calculating fractal dimension by strength and porosity data of composites is presented in the article. It is shown that analysis of kinetic dependences of fractal dimension change of the considered technological solution (admixture of dispersed phase, modifying additive, etc.) allows to find out some features in the process of structure formation of the material. A criterion for evaluating the efficiency and classification of new technological solutions was developed. Such criterion allows to improve building materials characteristics. The criterion characterizes physico-chemical nature of the material strength: parameter R_0 , is the strength of defect-free material, characterizes chemical and physical features of the material (crystals parameters, binding energy and so on), parameter D_H , is fractal dimension, shows physical structure of the material.

Keywords: fractal dimension, building composites, strength, porosity, structure formation, structure

Фракталы и фрактальная размерность, как лучшие модельные представления о структуре реальных природных тел, все чаще находят широкое применение в материаловедении (см. например, [1...11]). Часто их используют для получения большей информации о параметрах структуры и/или процессах структурообразования материала, в частности, фрактальная размерность позволяет оценить плотность упаковки отдельных структурных элементов, составляющих тело с некоторой топологической размерностью, или степень «шероховатости» поверхности. Эта дополнительная информация, как указывают авторы [1...3], может быть использована для получения материалов с заданными свойствами.

Разработано достаточно большое количество методик для определения фрактальной размерности, описание наиболее часто применяемых в материаловедении представлено в [1].

Для строительного материаловедения характерно использование фрактальной размерности для конструирования композитов и для анализа концентрационных зависимостей свойств (см., например, [4...7]) или для анализа прочности композита (см., например, [8, 9]). Существенными достижениями в этих областях являются сейчас уже хорошо известные факты [4...9]:

- формирование в неконцентрированных дисперсных системах агрегатов-кластеров, состоящих из смоченных или несмоченных вязущим веществом частиц наполнителя;

- выполнение этими агрегатами функции физических барьеров, тормозящих развитие трещин;

- установление факта протекания разрушения композита под действием статистического нагружения как непрерывного процесса, состоящего из дискретных актов разрушения отдельных структурных элементов (фракталов).

В работе [10] показано, что трещины имеют фрактальную размерность, а в [1] трещинообразование описывается как многоуровневый нелинейный процесс, точки бифуркации которого связаны с фрактальной размерностью и числами «золотого сечения».

Естественно предположение, что развитие трещины будет происходить между дефектами по кратчайшему расстоянию. В этом случае фрактальная размерность, вычисленная по результатам экспериментального определения прочности, будет характеризовать геометрическую плотность упаковки элементарных площадок, образующихся при росте трещины, вследствие разрывов физико-химических связей. В этой связи очевидно, что чем выше значение фрактальной размерности, тем больше масштабных уровней композита участвует в росте трещины. Отсюда закономерно предположить, что должна существовать прямо пропорциональная зависимость между прочностью и величиной фрактальной размерности.

Однако в работе [8] рассматривается зависимость прочности композита от величины фрактальной размерности (рис. 1). Представленные данные демонстрируют, что зависимость прочности от фрактальной размерности имеет два максимума – при величинах фрактальной размерности 2,0 (!?) и при 2,40...2,45. При дальнейшем увеличении фрактальной размерности прочность снижается. Представленные данные противоречат приведенному выше предположению о росте прочности при увеличении величины фрактальной размерности. Возможной причиной указанного могут являться как особенности определения величины фрактальной размерности, так и ее другая интерпретация, в частности, не как физической величины, характеризующей плотность упаковки элементарных структурных элементов в геометрически подобные разномасштабные объекты. В данном случае происходит последовательное объединение элементарных площадок разрывов в субмикро-, микро-, ..., макротрещины, а затем магистральную трещину.

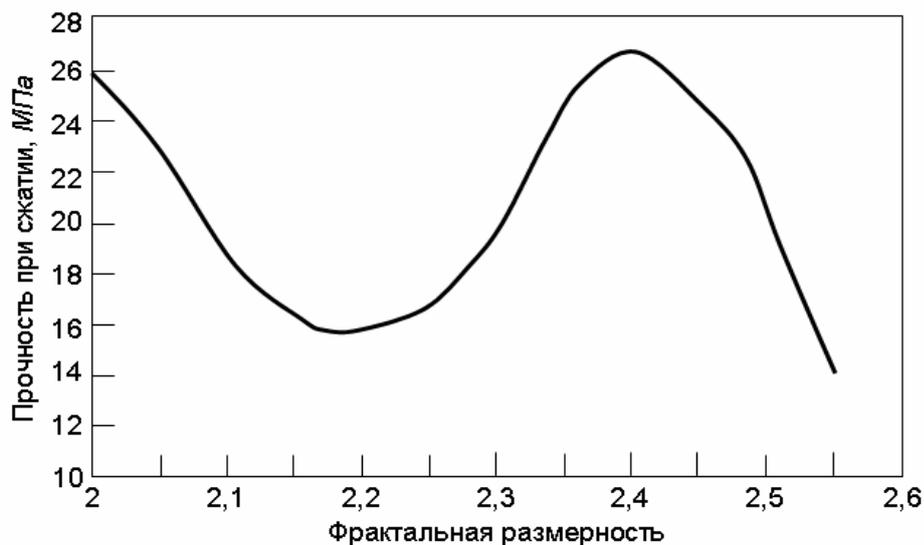


Рис. 1. Зависимость прочности материала от величины фрактальной размерности [8]

Существующие модели прочности, основанные на силовой или энергетической модели роста трещины, требуют экспериментального установления существенного объема дополнительной информации, а получаемые универсальные соотношения для фрактальной размерности имеют исключительно академический интерес, подтверждающий представление о разрушении как о процессе, протекающем на всех масштабных уровнях структуры материала. Однако получаемая дополнительная информация о фрактальной размерности, на наш взгляд, может быть использована для оценки предлагаемых новых технологических решений и их классификации по эффективности. В этой связи универсальной зависимостью для прочности материала R_c является уравнение, формально соответствующее уравнению Ребиндера:

$$R_c = R_0 (1 - v_h)^t, \quad (1)$$

где R_0 – прочность плотного (бездефектного) материала; v_h – объемная доля пор и других дефектов, нарушающих объемную сплошность композита.

Константа t по [6, 7] равна:

$$t = \frac{3 + D_H / D_{ag}}{3 - D_H}, \quad (2)$$

где D_H – фрактальная размерность структуры материала; D_{ag} – фрактальная размерность агрегата.

Для прочности композитов она может быть представлена в виде:

$$t = \frac{3}{3 - D_H} \quad (3)$$

Константа R_0 , характеризующая максимальную прочность композита, является весьма полезной величиной как для классификации композитов, так и для оценки эффективности предлагаемых технологических решений. В качестве критерия для классификации эффективности технологических решений целесообразно использовать комплекс:

$$R_0 \cdot D_H = \max.$$

Предлагаемый комплекс характеризует физико-химическую природу прочности материала: величина R_0 характеризует химические и физические свойства вещества (параметры кристаллов, энергия связи и т.д.), из которого изготовлен материал, а величина D_H – физические параметры его структуры.

Приближенный аналог (1) предложен И.А. Рыбьевым в [12]:

$$R_{л} = R^* \left(\frac{P_{\max} - P_x}{P_{\max}} \right)^b \quad (4)$$

где $R_{л}$ – показатель прочности в левой ветви кривой; p_x – величина пористости асфальтового вещества в любой точке левой ветви кривой $R_{л} = f(p_x)$.

Определение значений R_0 , t и D_H по экспериментальным данным. Для определения всех представленных констант достаточно произвести анализ зависимости прочности композита от объемной доли различных дефектов $R_c = f(v_h)$. В качестве исходных данных для построения зависимости $R_c = f(v_h)$ использованы экспериментальные данные для серных [13], жидкостекольных [14], цементных [15] и гипсовых [16] композитов.

Экспериментально-статистические зависимости прочности R_{sc} и пористости P_{sc} для указанных видов композитов имеют вид:

$$R_{sc} = \frac{a + bv_f}{1 + cv_f + dv_f^2}; \quad (5)$$

$$P_{sc} = a + bv_f + cv_f^2, \quad (6)$$

где a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1; v_f – объемная доля дисперсной фазы (наполнителя).

Т а б л и ц а 1

Значения эмпирических коэффициентов зависимостей $R_{sc} = f(v_f)$ и $P_{sc} = f(v_f)$ для различных видов композитов

№ п/п	Наименование наполнителя	$S_{уд}$, м ² /кг	Вид зависимости	Значения эмпирических коэффициентов			
				a	b	c	d
1	2	3	4	5	6	7	8
Серные композиты							
1	Сажа	100000	$R_{sc} = f(v_f)$	24,40	-23,49	-3,91	7,19
			$P_{sc} = f(v_f)$	17,56	-99,69	229,14	-
2	Ангидрит	500	$R_{sc} = f(v_f)$	20,86	-21,04	-4,96	9,21
			$P_{sc} = f(v_f)$	21,57	-117,74	209,57	-
3	Барит	250	$R_{sc} = f(v_f)$	16,37	-25,06	-3,11	2,60
			$P_{sc} = f(v_f)$	25,26	-88,63	123,76	-

1	2	3	4	5	6	7	8
Жидкостекольные композиты							
4	Борат цинка	660	$R_{sc} = f(v_f)$	3,86	-16,78	-9,40	23,30
			$P_{sc} = f(v_f)$	52,10	152,20	-	-
5	Свинцовый сурик	300	$R_{sc} = f(v_f)$	3,77	-10,26	-3,62	2,74
			$P_{sc} = f(v_f)$	52,10	81,14	-	-
6	Смесевой наполнитель (способ совмещения компонентов № 1)*	300	$R_{sc} = f(v_f)$	3,71	-7,94	-5,00	6,47
			$P_{sc} = f(v_f)$	52,10	69,20	-	-
7	Смесевой наполнитель (способ совмещения компонентов № 2)	300	$R_{sc} = f(v_f)$	3,30	-7,92	-4,96	6,19
			$P_{sc} = f(v_f)$	52,10	77,47	-	-
Гипсовые композиты							
8	Гидросиликаты цинка		$R_{sc} = f(v_f)$	13,87	30,46	0,60	0,64
			$P_{sc} = f(v_f)$	25,39	0,54	0,07	-
Цементные композиты							
9	Гидросиликаты бария	330	$R_{sc} = f(v_f)$	43,97	677,38	2,22	34,04
			$P_{sc} = f(v_f)$	17,26	0,19	-	-

П р и м е ч а н и е . S_{ud} – удельная поверхность наполнителя.

Для анализа были выбраны дисперсные фазы, различающиеся как по физико-химической активности (образуют на границе раздела фаз различные соединения), так и по дисперсности. По данным [13], к химически инертным наполнителям для серных композитов относятся ангидрит и сажа, к химически активным – барит; для жидкостекольных композитов, по данным [14], к химически инертным относится борат цинка, к химически активным – смесевой наполнитель на основе свинцового сурика; по данным [16, 17], для цементных и гипсовых композитов химически активными наполнителями являются гидросиликаты бария и цинка.

По $R_{sc} = f(v_f)$ и $P_{sc} = f(v_f)$ строится зависимость $\ln(R_{sc}) = f \ln(1 - P_{sc})$. Для примера на рис. 2...4 для разных наполнителей представлены $\ln(R_{sc}) = f \ln(1 - P_{sc})$ только для серных композитов.

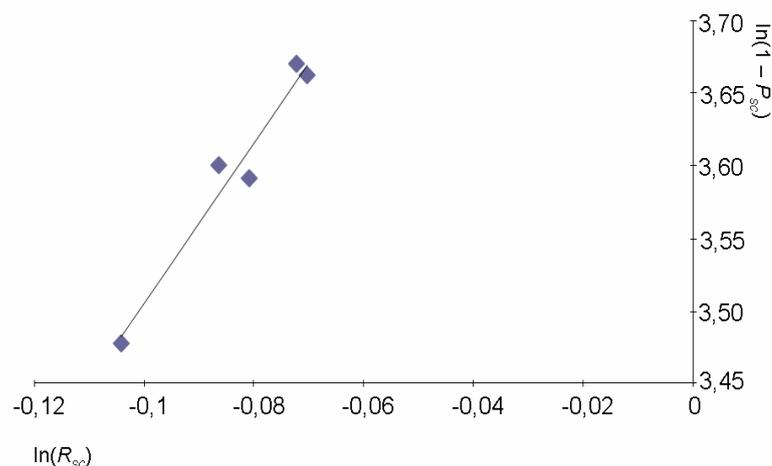


Рис. 2. Зависимость $\ln(R_{sc}) = f \ln(1 - P_{sc})$ для серных композитов на саже

* Смесевой наполнитель №1 на основе свинцового сурика изготовлен традиционным перемешиванием наполнителя с отвердителем хлоридом бария; смесевой наполнитель №2 на основе свинцового сурика изготовлен совместным помолком компонентов в течение 60 с в истирателе марки «ВТ-808.00.000.ЭЗ». Полный состав смесевых наполнителей представлен в [14].

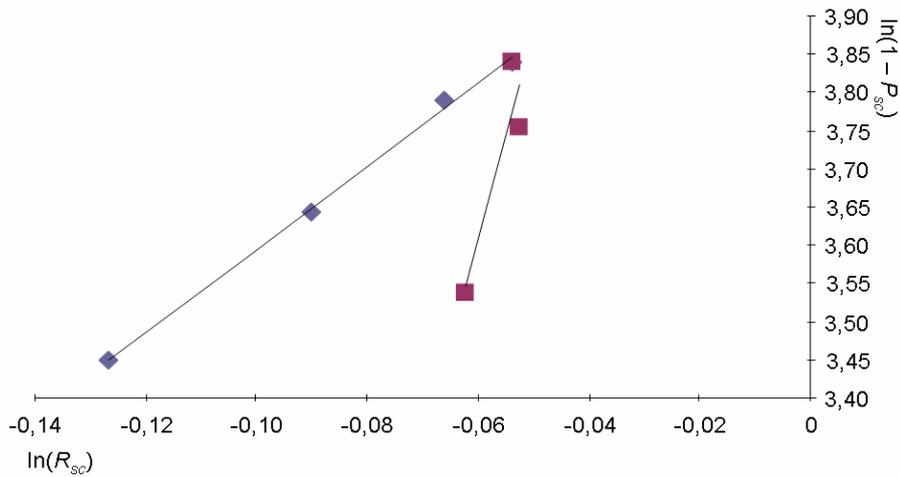


Рис. 3. Зависимость $\ln(R_{sc}) = f\ln(1 - P_{sc})$ для серных композитов на ангидрите

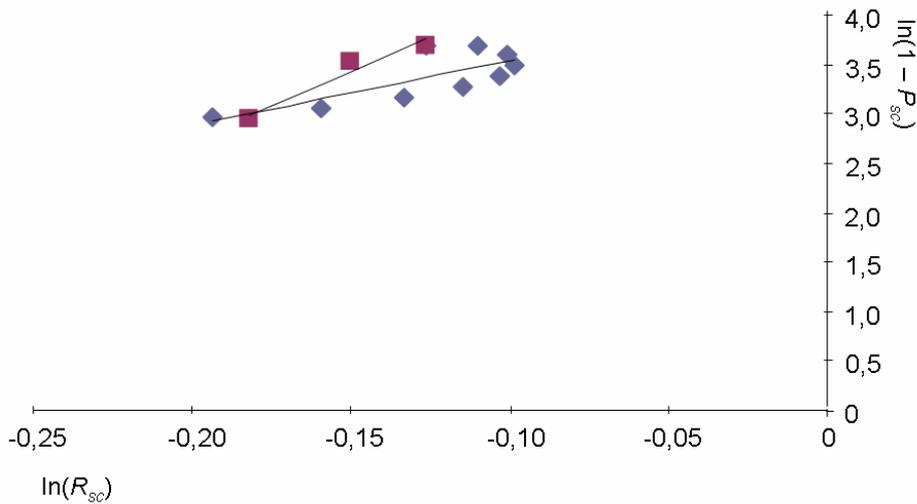


Рис. 4. Зависимость $\ln(R_{sc}) = f\ln(1 - P_{sc})$ для серных композитов на барите

Как видно из представленных рисунков, наиболее простой для анализа является зависимость $\ln(R_{sc}) = f\ln(1 - P_{sc})$ для серных композитов на саже. Для композитов на ангидрите и барите выделяются два участка:

- первый участок: $v_{f,\min} \leq v_f \leq v_{f,\text{opt}}$ – диапазон изменения объемной доли наполнителя от минимального количества до оптимального содержания, при котором прочность композита максимальна $R_{sc}(v_{f,\text{opt}}) = \max$;
- второй участок: $v_{f,\text{opt}} \leq v_f \leq v_{f,\max}$ – от оптимального содержания наполнителя до максимальной объемной доли наполнителя.

Наличие двух и более участков свидетельствует о протекании физико-химических и/или химических процессов, которые могут представлять научный интерес (указанное справедливо и для композитов на основе других вяжущих). В случае композита на ангидрите второй участок располагается под первым участком зависимости $\ln(R_{sc}) = f\ln(1 - P_{sc})$. Это указывает на формирование структуры, которая при одинаковых параметрах имеет меньшую прочность, но большую скорость изменения прочности* при варьировании пористости, то есть такой композит имеет большую чувствительность к изменениям параметров структуры (структурную чувствительность).

* Эта характеристика оценивается по тангенсу угла наклона $\ln(R_{sc}) = f\ln(1 - P_{sc})$ – значению коэффициента k в уравнении $\ln(R_{sc}) = k\ln(1 - P_{sc}) + b$ (табл. 2).

Для серного композита на основе барита второй участок располагается над первым участком зависимости $\ln(R_{sc}) = f \ln(1 - P_{sc})$. Такое расположение указывает на формирование структуры, для которой характерна большая прочность при одинаковой пористости материала. При этом важно также отметить, что структурная чувствительность композита на этом участке также более высокая, чем на первом участке.

Отсюда можно заключить, что физико-химические и/или химические процессы, протекающие в композите на границе раздела фаз, повышают структурную чувствительность и могут приводить как к повышению, так и к снижению прочности при одинаковых параметрах структуры. Вид и механизмы указанных процессов являются отдельной научно-исследовательской задачей.

Зависимость $\ln(R_{sc}) = f \ln(1 - P_{sc})$ аппроксимируется уравнением

$$\ln(R_{sc}) = k \ln(1 - P_{sc}) + b, \quad (7)$$

в котором эмпирические коэффициенты k и b равны:

$$k = t; \quad (8)$$

$$b = \ln(R_0). \quad (9)$$

Из (9) значения максимальной прочности R_0 равны:

$$R_0 = \exp(b), \quad (10)$$

а из (3) значения фрактальной размерности –

$$D_H = 3 \left(\frac{t-1}{t} \right). \quad (11)$$

Значения эмпирических коэффициентов R_0 и D_H для рассматриваемых композитов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Значения эмпирических коэффициентов k и b , значения параметров R_0 и D_H

№ п/п	Наименование наполнителя	Значения эмпирических коэффициентов $\ln(R_{sc}) = k \ln(1 - P_{sc}) + b$		Значения параметров композита	
		k	b	R_0 , МПа	D_H
Серные композиты					
1	Сажа	5,571	4,061	58,03	2,46
2	Ангидрит (участок №1)	5,457	4,140	62,78	2,45
	Ангидрит (участок №2)	26,837	5,217	184,38	2,89
3	Барит (участок №1)	6,571	4,203	64,14	2,54
	Барит (участок №2)	13,825	5,505	246,02	2,78
Жидкостекольные композиты					
4	Борат цинка	4,588	3,899	49,35	2,35
5	Смесевой наполнитель №1	4,210	4,500	89,84	2,29
	Смесевой наполнитель №2	4,422	4,660	105,64	2,32
Цементные композиты					
6	Гидросиликаты бария, синтезированные при $v(Ba) : v(Si) = 1,0$	6,913	5,623	276,72	2,57
Гипсовые композиты					
7	Гидросиликаты цинка, синтезированные при $v(Zn) : v(Si) = 1,0$	9,792	5,775	322,11	2,69

Анализ данных табл. 2 показывает, что для каждого вида композита характерен собственный диапазон изменения фрактальной размерности, связанный с особенностями структурообразования:

- Для жидкостекольных композитов диапазон изменения фрактальной размерности незначителен – от 2,3 до 2,4 – и из всех рассмотренных композитов имеет минимальные значения. Для указанной группы композитов это закономерно вследствие особенностей структурообразования таких материалов – формирование прочного искусственного камня происходит посредством формирования «сетки» из продуктов взаимодействия гидросиликатов натрия и отвердителя (хлорида бария) [18].

- Для серных композитов изменение фрактальной размерности варьируется в существенно более широком диапазоне – от 2,4 до 2,9. Указанное, очевидно, связано с формированием «пленочной фазы» на границе раздела фаз, характеризующейся более высокими физико-механическими свойствами [13].

- Для цементных и гипсовых композитов диапазон изменения фрактальной размерности для рассмотренных составов незначителен – $D_H = 2,5 \dots 2,7$. Введение в указанные композиты гидросиликатов металлов приводит к связыванию ионов кальция с образованием дополнительного количества гидросиликатов кальция [15-17]. Интенсивность этого процесса определяется составом вводимого модификатора.

Общий анализ данных табл. 2 позволяет построить зависимость $R_0 = f(D_H)$, которая для неполных представленных данных позволяет заключить, что с увеличением фрактальной размерности прочность композита возрастает (рис. 5). Указанное также позволяет заключить, что комплекс $R_0 \cdot D_H$ может быть использован для оценки предлагаемых технологических решений. Для оптимального технологического решения должно выполняться:

$$R_0 \cdot D_H = \max.$$

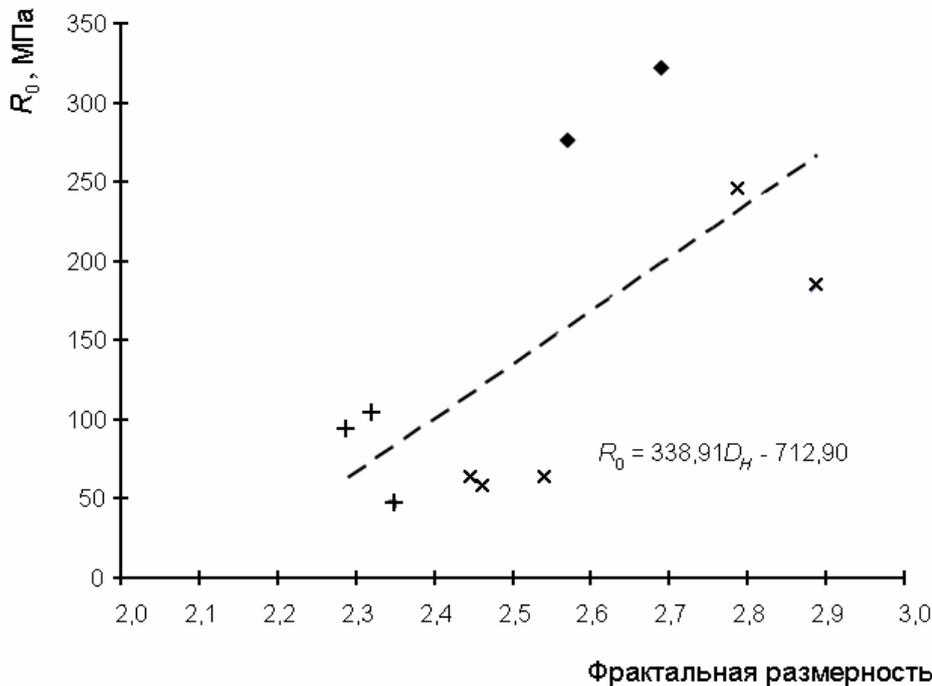


Рис. 5. Зависимость прочности бездефектного материала R_0 от фрактальной размерности D_H : + – жидкостекольные композиты; x – серные композиты; ♦ – цементные и гипсовые композиты

Таким образом, для рассмотренных композитных материалов, изготовленных на основе различных минеральных вяжущих веществ:

1. Показано, что фрактальная размерность, определяемая по результатам экспериментальных исследований прочности композитов, позволяет получить дополнительную информацию об их структурообразовании.

2. Выявлено, что наличие нескольких участков зависимостей $\ln(R_{sc}) = f(\ln(1 - P_{sc}))$ для исследуемого технологического решения (в рассматриваемых случаях введение наполнителей различной природы и дисперсности) указывает на протекание физико-химических процессов, установление природы и/или интенсивности которых является одной из ключевых задач научных исследований. Наличие высокой структурной чувствительности, оцениваемой коэффициентом k зависимости $\ln(R_{sc}) = k \ln(1 - P_{sc}) + b$, указывает на возможность существенного колебания качества материала при случайных изменениях рецептурных и технологических факторов, а следовательно, на ненадежность технологии.

3. Предложенный комплекс $R_0 \cdot D_H$ – рационально использовать для оценки эффективности технологических решений по повышению эксплуатационных свойств разрабатываемого композита.

4. Выявлена прямо пропорциональная зависимость прочности композита от величины фрактальной размерности, которая должна быть уточнена для более широкой группы материалов.

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-15-2019-1223 о предоставлении субсидий на реализацию федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (идентификатор проекта-RFMEFI58318X0072) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Иванова, В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
2. Иванова, В.С. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов / В.С. Иванова, М.М. Закирничная, И.Р. Кузеев. – Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 1998. – Ч. 1. – 144 с.
3. Иванова, В.С. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов / В.С. Иванова, М.М. Закирничная, И.Р. Кузеев. – Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 1998. – Ч. 2. – 226 с.
4. Бобрышев, А.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем / А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев, В.Н. Козомазов. – СПб.: Наука, 2012. – 476 с.
5. Бобрышев, А.Н. Прочность и долговечность полимерных композиционных материалов / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, Р.В. Козомазов, А.В. Лахно, В.В. Тучков. – Липецк: РПГФ «Юлис», 2006. – 170 с.
6. Урьев, Н.Б. Физико-химическая динамика дисперсных систем и материалов. Фундаментальные аспекты и технологические приложения / Н.Б. Урьев. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2013. – 232 с.
7. Урьев, Н.Б. Текучесть суспензий и порошков / Н.Б. Урьев, А.А. Потанин. – М.: Химия, 1992. – 252 с.
8. Селяев, В.П. Эволюция теории прочности бетонов. От простого к сложному / В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина // Строительные материалы. – 2016. – №12. – С.70–79.
9. Селяев, В.П. Фрактальные характеристики структуры теплоизоляционных материалов / В.П. Селяев, В.А. Неверов, П.В. Селяев, Е.Л. Кечуткина // АCADEMIA. Архитектура и строительство. – 2013. – №2. – С.121–124.
10. Луис, Э. Фрактальная природа трещин / Э. Луис, Ф. Гинеа, Ф. Флорес // Труды VI Международного симпозиума по фракталам в физике «Фракталы в физике» – М.: Мир, 1988. – С. 244–248.
11. Большаков, В.И. Фракталы в материаловедении / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров. – Пенза: ПГАСА, 2005. – 253 с.
12. Рыбьев, И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ (искусственные строительные конгломераты) / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1978. – 309 с.

13. Королев, Е.В. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, А.И. Альбакасов. – Пенза-Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. – 364 с.
14. Гришина, А.Н. Жидкостекольные строительные материалы специального назначения / А.Н. Гришина, Е.В. Королев. – М.: МГСУ, 2015. – 224 с.
15. Сатюков, А.Б. Наномодифицированное композиционное вяжущее для специальных строительных растворов: дис. ... канд. техн. наук / А.Б. Сатюков. – М.: МГСУ, 2015. – 228 с.
16. Grishina, A. Structure formation of gypsum binder with zinc hydrosilicates / A. Grishina, E. Korolev // E3S Web of Conferences. – 2019. – Т.91.– P. 02016.
17. Королев, Е.В. Химический состав наномодифицированного композиционного вяжущего с применением нано- и микроразмерных гидросиликатов бария / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.Б. Сатюков // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 90–103.
18. Королев, Е.В. Модель структуры жидкостекольных композиционных материалов специального назначения / Е.В. Королев, А.Н. Гришина // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 14–19.

References

1. Ivanova, V.S. Synergetics and fractals in materials science / V.S. Ivanova, A.S. Balankin, I.Zh. Bunin, A.A. Oksogoev. – М.: “Nauka” Publishers, 1994. – 383 p.
2. Ivanova, V.S. Synergetics and fractals. Universality of the materials’ mechanics / V.S. Ivanova, M.M. Zakirnichnaya, I.R. Kuzeev. – Ufa: Ufa State Oil Technical University, 1998. – Part 1. – 144 p.
3. Ivanova, V.S. Synergetics and fractals. Universality of the materials’ mechanics / V.S. Ivanova, M.M. Zakirnichnaya, I.R. Kuzeev. – Ufa: Ufa State Oil Technical University, 1998. – Part 2. – 226 p.
4. Bobryshev, A.N. Physics and synergetics of disordered disperse-filled condensed composites / A.N. Bobryshev, V.T. Erofeev, V.N. Kozomazov. – St. Petersburg: “Nauka” Publishers, 2012. – 476 p.
5. Bobryshev, A.N. Strength and durability of polymer matrix composites / A.N. Bobryshev, V.N. Kozomazov, R.V. Kozomazov, A.V. Lakhno, V.V. Tuchkov. – Lipetsk: “Yulis” Publishers, 2006. – 170 p.
6. Ur'ev, N.B. Physical-chemical dynamics of disperse systems and materials. Fundamental aspects and technological applications / N.B. Ur'ev. – Dolgoprudny: “Intellekt” Publishing house, 2013. – 232 p.
7. Ur'ev, N.B. The fluidity of suspensions and powders / N.B. Ur'ev, A.A. Potanin. – М.: “Khimiya” Publishers, 1992. – 252 p.
8. Selyaev, V.P. The evolution of concrete strength theory. From simple to complex / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.L. Kechutkina // Building materials. – 2016. – №12. – P. 70–79.
9. Selyaev, V.P. Fractal characteristics of the structure of heat-insulating materials / V.P. Selyaev, V.A. Neverov, P.V. Selyaev, E.L. Kechutkina // ACADEMIA. Architecture and construction. – 2013. – №2. – P. 121–124.
10. Luis, E. Fractal nature of cracks / E. Luis, F. Ginea, F. Flores // Proceedings of the VI International Symposium on Fractals in Physics “Fractals in Physics”. – М.: “Mir” Publishers, 1988. – P. 244–248.
11. Bol'shakov, V.I. Fractals in materials science / V.I. Bol'shakov, V.N. Volchuk, Yu.I. Dubrov. – Пенза: Пенза State Academy of Architecture and Construction, 2005. – 253 p.
12. Ryb'ev, I.A. Building materials based on binders (artificial constructional conglomerates) / I.A. Ryb'ev. – М.: “Vysshaya shkola” Publishers, 1978. – 309 p.
13. Korolev, E.V. Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials / E.V. Korolev, Yu.M. Bazhenov, A.I. Al'bakasov. – Пенза-Оренбург: “IPK OGU” Publishers, 2010. – 364 p.

14. Grishina, A.N. Special-purpose liquid glass based building materials / A.N. Grishina, E.V. Korolev. – M.: Moscow State University of Civil Engineering, 2015. – 224 p.
15. Satyukov A.B. Nanomodified composite binder for special-purpose mortars: PhD thesis (Nomenclature of the specialty of scientists 05.23.05) / Satyukov Anton Borisovich. – M., 2015. – 228 p.
16. Grishina, A.N. Structure formation of gypsum binder with zinc hydrosilicates / A.N. Grishina, E.V. Korolev // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 91. – P.02016.
17. Korolev, E.V. The chemical composition of nanomodified composite binder with nano- and micro-sized barium hydrosilicates / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.B. Satyukov // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. – 2014. – Vol.6, №4. – P. 90–103.
18. Korolev, E.V. Model of the structure of special-purpose liquid-glass composite materials / E.V. Korolev, A.N. Grishina // Regional architecture and engineering. – 2010. – №2. – P. 14–19.

УДК 666.3

ООО «ИНФОСМИТ»
(общество с ограниченной
ответственностью «Центр строительных
материалов и технологий «ИНФОСМИТ»)

Россия, 197760, Санкт-Петербург,
г. Кронштадт, пр. Ленина, д. 16, к.1,
литер А, офис 216,
тел: 8 800 505 70-43

Дмитриев Константин Сергеевич,
генеральный директор
E-mail: dm-konstantin@mail.ru

LLC «INFOSMIT»
(Centre of building materials and technologies
«INFOSMIT» Limited Liability Company)

Russia, 197760, Sankt-Peterburg,
g. Kronshtadt, pr. Lenina, d. 16, k.1, liter A,
ofis 216
tel: 8 800 505 70-43

Dmitriev Konstantin Sergeevich,
General Director
E-mail: dm-konstantin@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ АЭРИРОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ШИХТЫ

К.С. Дмитриев

Приведены результаты исследования технологии аэрирования керамических изделий на основе глинистых пород различных месторождений. Затронут вопрос о методах снижения средней плотности керамических материалов, и показана возможность дисперсного армирования керамической матрицы ячеистой структуры. Доказана эффективность использования в составе аэрированных керамических масс армирующих добавок на основе базальтовой фибры, определены их оптимальные составы. Обозначена взаимосвязь между прочностью керамических изделий и температурой огнеупорности исходного сырья. Приведена методика определения расчетной температуры огнеупорности глинистого сырья в зависимости от содержания в нем тугоплавких и легкоплавких оксидов. Установлена зависимость между химическим составом шихты и пределом прочности при сжатии аэрированных керамических изделий средней плотности от 0,4 до 0,8 г/см³, которая позволяет произвести расчетную оценку компонентного состава сырьевой смеси для производства аэрированных керамических изделий высокого качества. Определен критерий относительной прочности АКИ, позволяющий классифицировать изделия по категории и отнести их к соответствующей группе.

Ключевые слова: аэрированная керамика, температура огнеупорности, химический состав, дисперсное армирование, критерий относительной прочности, глина

THE CALCULATIONAL METHODOLOGY OF COMPRESSIVE RESISTANCE UNDER COMPRESSION OF CHEMICALLY DRY MIX AERATED CERAMIC PRODUCTS

K.S. Dmitriev

This article is dedicated to the research of the technology of aeration of ceramic products based on different deposits of argillaceous materials. The methods of average density decrease of ceramic materials were touched in question and the possibility of fiber reinforcement of ceramic matrix cellular construction was shown. The utilization efficiency of reinforcement additive based on basaltic fiber incorporated into the aerated ceramic mixture was proved and the optimal composition was defined. The interrelation between durability of ceramic products and refractoriness temperatures of raw material was specified. The test method of refractoriness specified temperature of argillous raw material depending on the content of heat-resistant and fusible oxides in it was given. The correlation between the chemical composition of dry mix and compressive resistance of the aerated ceramic products of average density from 0,4 to 0,8 g/cm³ which allows to make assessment of volume components of raw mix for the aerated high quality ceramic products production was established. The

relative criterion of resistance that allows to classify the aerated ceramic products by category and to assign them to the appropriate group was defined.

Keywords: aerated ceramic products, refractoriness temperatures, chemical composition, fiber reinforcement, relative criterion of resistance, clay

Стеновая керамика на основе глинистых пород является одним из самых востребованных строительных материалов в промышленном и гражданском строительстве. Конструкции из керамических изделий обладают рядом ключевых параметров, которые определяют их многовековую историю применения во многих странах мира: долговечность, архитектурная выразительность, экологичность и доступность. Широкая география глиняных месторождений на территории Российской Федерации и наличие современных керамических производств позволяют уверенно говорить о стабильном развитии данного направления путем снижения топливных издержек и материалоемкости при производстве, повышения коэффициента конструктивного качества, улучшения их теплофизических характеристик и т.д.

Современное строительное производство, соблюдая основные положения СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», осуществляет возведение стеновых конструкций преимущественно в многослойном исполнении, предусматривающем наличие несущих, теплоизолирующих и декоративных элементов. Несомненно, многообразие неоднородных строительных материалов в конструкции ведет к повышению издержек на строительство и последующую эксплуатацию зданий и сооружений. С целью оптимизации затрат и внедрения новых технологий производственный сектор строительных материалов и изделий постоянно развивается, научные государственные и частные институты ведут исследовательскую деятельность в области получения эффективных стеновых материалов с высокими прочностными характеристиками, что приводит к рациональной экономии энергетических и материальных ресурсов предприятий.

Технология пористой (ячеистой) керамики строительного назначения с показателями средней плотности от 0,4 до 0,8 г/см³ при значениях предела прочности при сжатии от 3,0 до 10,5 МПа и более является одной из перспективных направлений в керамической отрасли, промышленный выпуск которой составит конкуренцию изделиям из автоклавного газобетона. Кроме того, приемы получения пористой структуры керамической матрицы активно развиваются в производстве теплоизоляционных (легковесных) огнеупорных изделий на предприятиях огнеупорной промышленности.

Метод аэрирования керамических масс

Традиционно пористую структуру керамических изделий получают путем введения в состав глинистой смеси различных порообразователей, выгорающих добавок, пористых заполнителей, но одним из наиболее перспективных способов является метод аэрирования глинистого шликера с последующим закреплением ячеистой структуры сырца, основанный на использовании коагуляционных и тиксотропных свойств глин. Технология отличается достаточной простотой организации как в условиях существующих предприятий по выпуску керамических изделий, так и при новом проектировании отдельных линий, использующих в своей основе комплексное технологическое оборудование отечественного производства [1].

Установлено, что армирование строительных композитов волокнами различной степени модульности позволяет не только повысить прочность, трещиностойкость и вязкость разрушения готовых изделий, но и значительно улучшить их деформативные показатели в процессе твердения [2, 3, 4].

Технология аэрирования позволяет эффективно применять различные виды фибр, равномерно распределяя их по всему объему аэрированной керамической массы (АКМ). Дисперсное армирование снижает усадочные деформации при сушке аэрированных керамических сырцов (АКС), а также повышает их структурную прочность, позволяя интенсифицировать процесс обжига для получения аэрированных керамических изделий (АКИ) с минимальным количеством брака.

Результаты предварительных испытаний азрированных керамических изделий, армированных базальтовой фиброй, сведены в табл. 1.

Образцы изготавливались на основе глинистых пород различных месторождений: состав №1 – кембрийская глина (Ленинградская область), состав №2 – боровичско-любыйтинская глина (Новгородская область), состав №3 – каолиновая глина (Новгородская область), состав №4 – шабердинский суглинок (Удмуртская республика).

Т а б л и ц а 1

Предварительные результаты испытаний армированных АКИ

Наименование компонента / показателя	Содержание компонента, % по массе / значение показателя							
	Состав №1		Состав №2		Состав №3		Состав №4	
Глина	43,25		50,52		48,25		52,87	
Шамот	12,43		16,39		6,89		11,50	
Базальтовая фибра (сверх 100 %)	–	0,36	–	0,23	–	0,22	–	0,29
Жидкое стекло	0,49		0,76		0,88		0,69	
ПАВ	0,63		0,63		0,47		0,46	
Вода	42,56		31,70		43,28		34,48	
Средняя плотность, г/см ³	0,507	0,451	0,567	0,521	0,779	0,674	0,695	0,629
Общая усадка, %	12,84	9,73	12,23	9,41	13,41	10,38	12,09	9,52
Предел прочности при сжатии, МПа	4,02	4,18	3,95	4,32	7,46	7,85	5,52	5,71

Стоит отметить, что наличие базальтовой фибры в составах АКМ положительно сказывается на сушильных свойствах АКС, уменьшая значения общей усадки в среднем на 22,8 % по сравнению с контрольными составами.

Используемые материалы и методы исследований

Цель исследования заключалась в установлении зависимости между химическим составом керамической шихты и пределом прочности при сжатии армированных АКИ средней плотности от 0,4 до 0,8 г/см³.

Исследование предполагало использование современных методов и достижений в области снижения средней плотности керамических изделий, а также применение дисперсного армирования в составах различных строительных композитов. Физико-механические характеристики АКИ определялись в соответствии с действующими нормативными документами, указанными на основании ГОСТ 530 – 2012 «Кирпич и камень керамические».

Составы АКМ включают в себя следующие компоненты: глинистое сырье, вода, разжижающая, воздухововлекающая, армирующая и отошающая добавки.

В качестве разжижающей добавки использовалось натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078), воздухововлекающей добавки – синтетический углеводородный пенообразователь «ПБ – Формула 2012» (ТУ 2481-008-80824910-2012). Армирующая добавка представляет собой базальтовую фибру (ТУ 5952-036-05328981), характеристики которой представлены в табл. 2. Химический состав глинистого сырья, используемого в исследовании, приведен в табл. 3.

Т а б л и ц а 2

Характеристики базальтовой фибры

Диаметр волокна, мм	Длина волокна, мм	Плотность, г/см ³	Удлинение при разрыве, %	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, кг/мм ²
0,009	13,0	2,6	1,4 – 3,6	1600 – 3600	9100 – 11000

Химический состав глинистого сырья

Наименование глинистого сырья	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+ K ₂ O	п.п.п
Кембрийская глина	61,95	18,02	4,82	1,38	3,67	5,43	4,73
Боровичско-любытинская глина	55,34	17,70	7,29	4,53	2,42	4,32	8,40
Каолиновая глина	48,35	33,60	1,24	0,85	0,47	2,13	13,36
Шабердинский суглинок	66,32	13,85	5,36	1,41	2,64	4,45	5,97

Изготовление аэрированных керамических образцов осуществлялось следующим образом:

- получение глинистого шликера путем смешения подготовленных сырьевых компонентов в определенных пропорциях до достижения однородности шликера и значений относительной вязкости в интервале от 1,49 до 1,78, при этом воздуховывлекающую добавку добавляют последней. Отощачущая добавка (шамот) и глина используются в измельченном состоянии с максимальным размером частиц 0,16 мм;
- аэрирование сырьевой смеси с использованием лабораторной пропеллерной мешалки с частотой вращения лопастей 1000–1500 об/мин до получения АКМ требуемой плотности;
- формование АКМ в подготовленные бортовые формы с размерами 290×140×75 мм;
- осуществление предварительной выдержки АКМ в естественных условиях при температуре не более 30 °С до влажности сырца, равной 40 %;
- распалубка и дальнейшее снижение влажности АКС до 5 % в сушильном шкафу;
- термическая обработка АКС, где время подъема температуры до температуры обжига составляет 180 минут, изотермическая выдержка при 1000 °С – 150 минут, естественное охлаждение производят в камере печи;
- механическая обработка охлажденных АКИ до размеров стандартного кирпича 250×120×65 мм.

Для установления оптимальных составов различной плотности АКИ используется трехфакторный эксперимент с изменением значения каждого фактора на двух уровнях, позволяющий установить математические уравнения зависимости предела прочности при сжатии от содержания фибры (z_1), шамота (z_2) и плотности АКМ (z_3) в составе АКИ.

Результаты исследования

Комплексный анализ полученных уравнений регрессии позволил определить оптимальный компонентный состав для каждого диапазона значений средней плотности АКИ от 0,4 до 0,8 г/см³: $R_{сж}^1$, $R_{сж}^2$, $R_{сж}^3$, $R_{сж}^4$ – пределы прочности при сжатии АКИ на основе кембрийской, боровичско-любытинской, каолиновой глины и шабердинского суглинка соответственно, МПа (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Прочностные показатели оптимальных составов АКИ

z_1 , кг	z_2 , кг	z_3 , г/см ³	$\rho_{ср}$, г/см ³	$R_{сж}^1$, МПа	$R_{сж}^2$, МПа	$R_{сж}^3$, МПа	$R_{сж}^4$, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
25,0–32,1	0,84–0,90	0,494–0,502	0,408	3,54	3,02	4,68	3,32
		0,503–0,540	0,438	3,88	3,37	5,18	3,74
35,7–46,4	0,73–0,81	0,541–0,572	0,456	4,08	3,61	5,45	3,92
		0,573–0,602	0,485	4,49	4,12	5,94	4,28
75,0–85,0	1,41–1,50	0,603–0,628	0,504	4,83	4,29	6,22	4,58
		0,629–0,661	0,532	5,15	4,73	6,47	4,92

1	2	3	4	5	6	7	8
85,1–95,0	1,33–1,40	0,662–0,684	0,558	5,71	5,09	6,84	5,22
		0,685–0,714	0,586	5,92	5,37	7,32	5,71
145,0–153,6	1,84–1,90	0,715–0,733	0,604	6,07	5,65	7,61	5,84
		0,734–0,759	0,629	6,47	6,14	7,98	6,08
157,9–166,4	1,76–1,81	0,760–0,794	0,661	6,85	6,48	8,29	6,55
		0,795–0,828	0,694	7,36	6,84	8,81	7,11
205,0–212,1	2,24–2,30	0,829–0,858	0,718	7,67	7,18	9,15	7,27
		0,859–0,877	0,742	7,89	7,56	9,52	7,65
215,7–222,9	2,16–2,21	0,877–0,909	0,776	8,51	8,05	9,96	7,99
		0,910–0,944	0,789	8,62	8,23	10,16	8,28

Предел прочности при сжатии АКИ увеличивается прямо пропорционально изменению средней плотности на всем интервале ее значений.

Расчет зависимости между химическим составом исходного глинистого сырья и пределом прочности при сжатии АКИ основан на результатах диссертационной работы В.Б. Зверева в области методики определения расчетной температуры огнеупорности керамических материалов с использованием побочных продуктов промышленности по валовому химическому составу сырьевых компонентов (формулы (1)–(4)) и является ее логическим продолжением [5].

$$T_{\text{огн}}^{\text{расч}} = \left(\frac{2,92}{1 + 1,156K_{\text{пл}}} - 1 \right) \cdot 798 \pm \Delta t, \quad (1)$$

где $T_{\text{огн}}^{\text{расч}}$ – расчетная температура огнеупорности, °С; $K_{\text{пл}}$ – число плавкости; Δt – температурная поправка.

$$K_{\text{пл}} = \frac{a_1 n_1 + a_2 n_2 + a_3 n_3 + a_4 n_4 + a_5 n_5}{b_1 m_1 + b_2 m_2}, \quad (2)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – константы плавкости для оксидов железа, кальция, магния, калия и натрия соответственно ($a_1 = 0,8, a_2 = 0,5, a_3 = 0,6, a_4 = 1, a_5 = 1$); n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 – содержание в шихте оксидов железа, кальция, магния, калия и натрия соответственно, % по массе; b_1, b_2 – константы плавкости для оксидов кремния и алюминия соответственно ($b_1 = 1, b_2 = 1,2$); m_1, m_2 – содержание в шихте оксидов кремния и алюминия соответственно, % по массе.

$$\Delta t = 833,3e - 100, \quad (3)$$

где e – глиноземисто-щелочной модуль.

$$e = \frac{M_1}{M_2 + M_3 + M_4}, \quad (4)$$

где M_1, M_2, M_3, M_4 – содержание в шихте оксидов алюминия, кремния, калия и натрия соответственно, %/моль.

Пример определения расчетной температуры огнеупорности для боровичско-любыйтинской глины представлен ниже. Данный показатель для остальных глин рассчитывается аналогично.

$$K_{\text{пл}} = \frac{0,8 \cdot 7,29 + 0,5 \cdot 4,53 + 0,6 \cdot 2,42 + 1 \cdot 2,15 + 1 \cdot 2,17}{1 \cdot 55,34 + 1,2 \cdot 17,7} = 0,181;$$

$$e = \frac{\frac{17,70}{102}}{\frac{55,34}{60} + \frac{2,15}{94,2} + \frac{2,17}{62}} = 0,177;$$

$$\Delta t = 833,3 \times 0,177 - 100 \approx 47,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{огн}}^{\text{расч}} = \left(\frac{2,92}{1 + 1,156 \times 0,181} - 1 \right) \cdot 798 + 47,5 \approx 1177 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчетные температуры огнеупорности исследуемых глин сведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Расчетные температуры огнеупорности глинистого сырья

Глина	ϵ	$K_{\text{пл}}$	Δt , $^\circ\text{C}$	$T_{\text{огн}}^{\text{расч}}$, $^\circ\text{C}$
1	0,156	0,146	34,0	1227
2	0,177	0,181	47,5	1177
3	0,395	0,043	230	1651
4	0,116	0,133	- 3,3	1220

Очевидно, что существует определенная связь между прочностью керамического изделия и химическим составом исходного глинистого сырья. Так как свои основные свойства керамика приобретает в процессе обжига, то такие показатели, как интервал спекания и температура огнеупорности, являются одними из главных производственных критериев получения требуемых изделий заданного качества. Контроль за содержанием легкоплавких и тугоплавких оксидов в шихте позволяет регулировать не только режим обжига, но и физико-механические показатели готовых АКИ.

Значения предела прочности при сжатии оптимальных составов АКИ из табл. 4 используются для построения сглаживающих прямых методом наименьших квадратов. Полученные уравнения зависимости и шкала значений температур огнеупорности представлены на совмещенном графике (рис. 1).

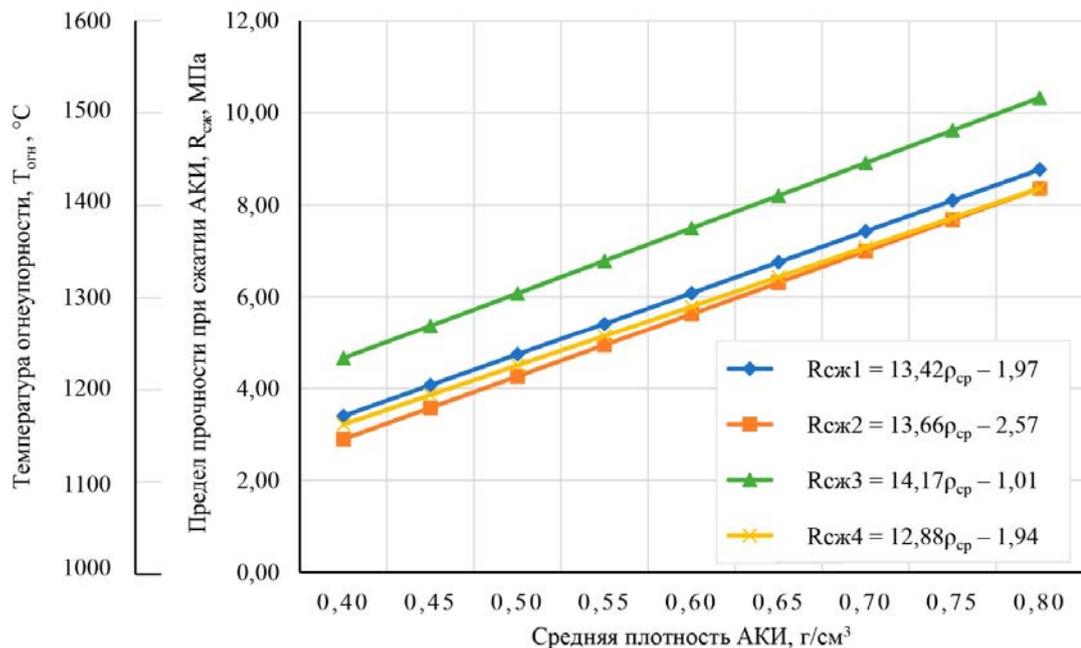


Рис. 1. Совмещенный график зависимости температуры огнеупорности, предела прочности при сжатии от значений средней плотности АКИ

Согласно представленному выше графику зависимость температуры огнеупорности от предела прочности при сжатии выражается общим уравнением

$$R_{сж} = 0,02T_{огн} - 20. \quad (5)$$

Значения $R_{сж}$ и $T_{огн}^{расч}$ имеют индивидуальный характер изменения для каждого компонентного состава АКМ на основе глинистого сырья конкретного месторождения, поэтому формула (5) дополняется общим (k_o) и температурным (k_t) коэффициентами соответствия, которые определяются формулами (6) и (7) соответственно. За основу определения коэффициентов k_o и k_t принимаются расчетные данные для кембрийской глины.

$$k_o = \frac{T_{огн}}{T_{огн}^{расч}} = \frac{50R_{сж} + 1000}{T_{огн}^{расч}} = \frac{50 \cdot (13,42\rho_{ср} - 1,97) + 1000}{1227} = 0,547\rho_{ср} + 0,735. \quad (6)$$

Температурный коэффициент соответствия отражает индивидуальную зависимость предела прочности при сжатии АКМ от расчётной температуры огнеупорности шихты, которая имеет линейный характер изменения. В данном случае функция вида $k_t = f(T_{огн}^{расч})$ определяется методом наименьших квадратов.

$$k_t = 1,627 - \frac{T_{огн}^{расч}}{1955,72}. \quad (7)$$

Значения температурных коэффициентов соответствия $k_t^1, k_t^2, k_t^3, k_t^4$ для кембрийской, боровичско-любыйтинской, каолиновой глины и шабердинского суглинка соответственно сведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Температурные коэффициенты соответствия исследуемых глин

k_t^1	k_t^2	k_t^3	k_t^4
0,9996	1,0252	0,7828	1,0032

Получаем итоговую общую зависимость между химическим составом шихты и пределом прочности при сжатии армированных АКМ средней плотности от 0,4 до 0,8 г/см³:

$$R_{сж} = 0,02k_t(0,547\rho_{ср} + 0,735)T_{огн}^{расч} - 20. \quad (8)$$

Проводя сравнительный анализ значений предела прочности при сжатии АКМ, рассчитанных по формуле (8), и экспериментальных значений из табл. 4, установлено, что среднее значение относительной погрешности ($\Delta R_{сж}$) составляет 5,07 %.

Разнообразие типов АКМ представлено на рис. 2.



Рис. 2. Фотография АКМ средней плотности 0,6 г/см³ в виде кирпичей и плитки облицовочной

Расчетное значение прочности при сжатии аэрированных керамических изделий средней плотности $0,5 \text{ г/см}^3$ обозначается автором как критерий относительной прочности АКИ ($R_{сж}^{отн}$). На основании данного критерия формируется оценка качества сырьевой смеси для производства керамических изделий по технологии аэрирования. Классификация АКИ представлена в табл.7.

Т а б л и ц а 7

Классификация АКИ по критерию относительной прочности

$R_{сж}^{отн}$, МПа	Категория изделий	Группа изделий по прочностным показателям
6,5 и более	R 65	Особой прочности
5,8–6,4	R 60	
5,1–5,7	R 55	Высокопрочные
4,5–5,1	R 45	
3,8–4,4	R 40	Повышенной прочности
3,1–3,7	R 35	
2,4–3,0	R 25	Стандартной прочности
1,7–2,3	R 20	
1,1–1,6	R 15	Низкой прочности
1,0 и менее	R 10	

Заключение

По итогам исследования установлена зависимость между химическим составом шихты и пределом прочности при сжатии армированных АКИ средней плотности от $0,4$ до $0,8 \text{ г/см}^3$, которая позволяет дать объективную оценку качества состава шихты для производства АКИ на основе глины конкретного месторождения, сокращая временные и денежные издержки для сотрудников заводских лабораторий, заказчиков и инвесторов.

Список литературы

1. Dmitriev, K.S. Innovative construction material based on aerated ceramics / K.S. Dmitriev // Architecture and Engineering. – 2017. – Vol. 2, No. 4. – P. 9–13.
2. Соков, В.Н. Создание огнеупорных бетонов и теплоизоляционных материалов с повышенной термостойкостью: монография / В.Н. Соков. – М.: МГСУ, 2015. – 288 с.
3. Жаворонков, М.И. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона / М.И. Жаворонков, Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1(60). – С. 172–176.
4. Pucharenko, Ju. Structural Model and Strength Predicting of Fiber-Reinforced Concrete / Ju., Pucharenko V. Morozov // World Applied Sciences Journal. – 2013. – No. 23 (Problems of Architecture and Construction). – P. 111–116.
5. Зверев, В.Б. Исследование строительно-технических свойств керамики с использованием побочных продуктов промышленности в зависимости от температуры огнеупорности сырьевых шихт: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Б. Зверев. – Ленинград, 1979. – 26 с.

References

1. Dmitriev, K.S. Innovative construction material based on aerated ceramics / K.S. Dmitriev // Architecture and Engineering. – 2017. – Vol. 2, No. 4. – P. 9–13.
2. Sokov, V.N. Creation of refractory concrete and heat-insulating materials with high heat resistance: monograph / V.N. Juice. – M.: MGSU, 2015. – 288 p.
3. Zhavoronkov, M.I. Determination of the contribution of fiber to the formation of strength of steel fiber concrete / M.I. Zhavoronkov, Yu.V. Pukharenko, D.A. Panteleev // Bulletin of civil engineers. – 2017. – No. 1 (60). – P. 172–176.

4. Pucharenko, Ju. Structural Model and Strength Predicting of Fiber-Reinforced Concrete / Ju., Pucharenko V. Morozov // World Applied Sciences Journal. – 2013. – No. 23 (Problems of Architecture and Construction). – P. 111–116.

5. Zverev, V.B. A study of the construction and technical properties of ceramics using industrial by-products depending on the refractoriness temperature of raw materials: Abstract. Dis. ... cand. of sciences / V.B. Zverev. – Leningrad, 1979. – 26 p.

УДК 519.7:691

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

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Производится формализованное описание ряда свойств строительных материалов в предположении их представления как сложных систем. Исходя из аperiodичности кинетических процессов и характерных точек дается методика их параметрической идентификации. Предлагаются принципы оценки риска разрушения материалов с позиций теории катастроф и гомеостатического подхода системного анализа.

Ключевые слова: композиты, сложные системы, кинетические процессы, аperiodичность, разрушение, оценка риска

FORMALIZED DESCRIPTION OF PARTICULAR CRITERIA FOR BUILDING MATERIALS

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

A formalized description of a number of properties of building materials is made of the assumption of their presentation as complex systems. Based on the aperiodicity of kinetic processes and characteristic points, a methodology of their parametric identification is given. The principles of assessing the risk of materials destruction from the standpoint of catastrophe theory and the homeostatic system analysis approach are proposed.

Keywords: composites, complex systems, kinetic processes, aperiodicity, destruction, risk assessment

Переход от описательного изложения синтеза композиционных материалов к теоретическим обобщениям обеспечивается принципом 100 %-й эффективности математики [1]. Так, в рамках полиструктурной теории [2] возможна поэтапная оптимизация структуры и свойств, если рассматривать каждый структурный уровень как новый материал с заданными показателями качества. Естественно, определяется и роль идентификации системы «рецептурно-технологические факторы –

структура – свойства – качество материала» с подходом к синтезу композиционных материалов как сложных систем [3] с использованием методов теории управления: синтез материала производится по формализованной оценке качества с использованием специально разработанных функционалов и идентификации каждого из частных критериев (осложняется их сложной иерархической структурой и противоречивостью). Отдельные части (подсистемы) материала как системы настолько сильно взаимосвязаны между собой множеством прямых и обратных связей, что изменение одной из них может повлечь за собой значительные изменения в других ее частях: материал надо оценивать и анализировать как целостную, или единую, систему; нельзя производить анализ и оценку системы после ее декомпозиции на более простые части (рис. 1; неизбежность использования системного подхода с решением задач многокритериальной оптимизации с использованием методов векторной оптимизации).

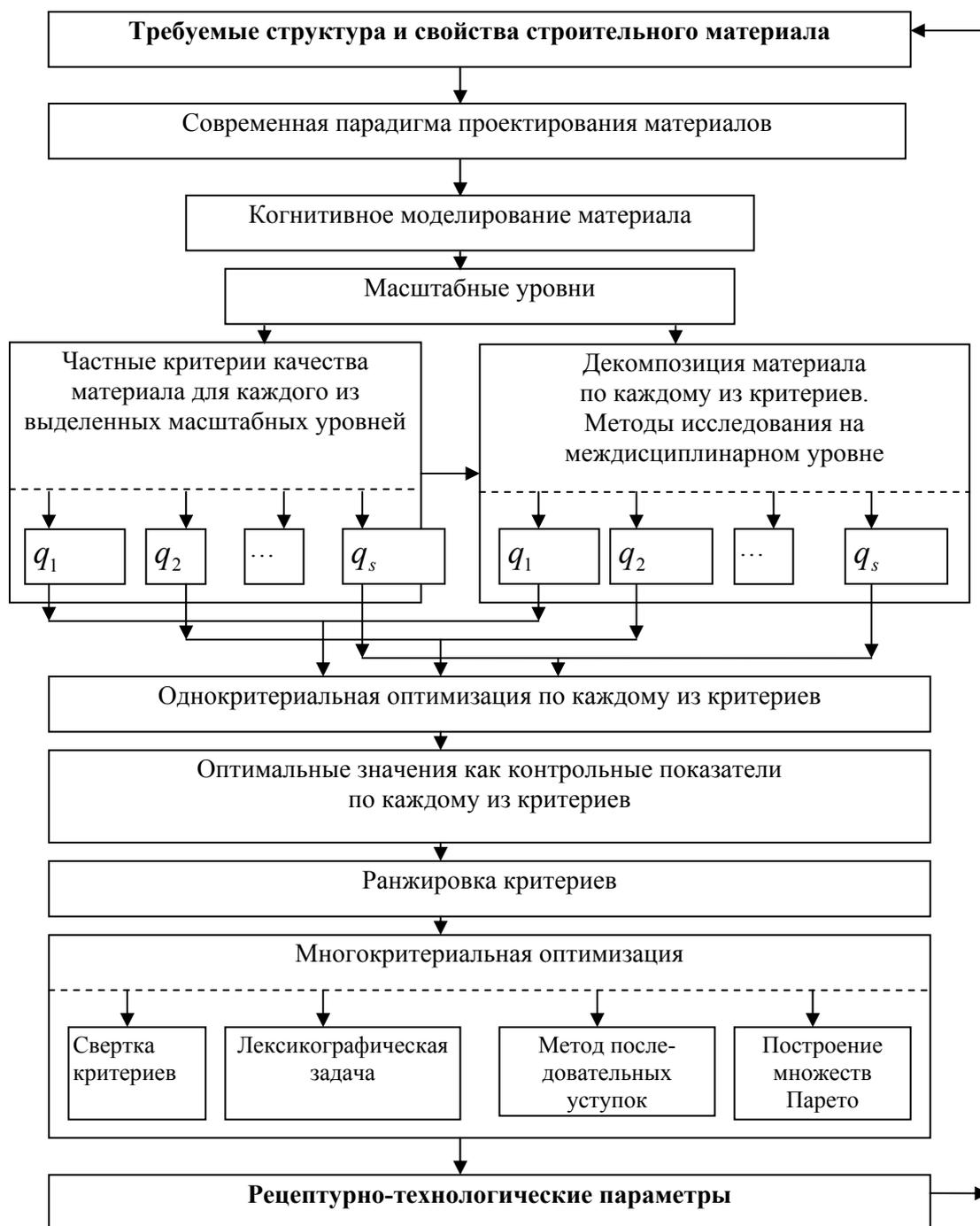


Рис. 1. Блок-схема проектирования строительного материала

Естественно, предполагается возможность итеративного подхода к синтезу.

1. Условия аperiodичности кинетических процессов

Если имеются экспериментальные данные о формировании основных физико-механических характеристик материала, то кинетические процессы [4...7] представимы в виде решения

$$z^{(4)} + a_3 z^{(3)} + a_2 z^{(2)} + a_1 z^{(1)} + a_0 z = 0;$$

$$z = x - x_m; \quad x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0, \quad \ddot{x}(0) = \ddot{x}_0, \quad \ddot{\ddot{x}}(0) = \ddot{\ddot{x}}_0;$$

$x_0, \dot{x}_0, \ddot{x}_0, \ddot{\ddot{x}}_0$ определяются требуемым видом кинетического процесса и заданным эксплуатационным значением x_m исследуемой характеристики материала. Из аperiodичности кинетических процессов вытекают нижеследующие утверждения.

1. Характеристический полином $P_4(x) = x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$ не имеет действительных корней, если его коэффициенты неотрицательны и $a_0 > a_1$; $4a_2 \geq a_1 + a_3^2$.

2. Если $a_1 < \frac{3}{8} a_3^2$ и $x_1 > x_2 > x_3$ – действительные корни многочлена $x^3 + 0,75a_3 x^2 + 0,5a_2 x + 0,25a_1$, то:

– при $P_4(x_2) < 0$ у полинома $P_4(x)$ два различных действительных корня;

– при $P_4(x_1) \leq 0, P_4(x_2) \geq 0, P_4(x_3) \leq 0$ у полинома $P_4(x)$ 4 действительных корня (возможно, кратные, если хотя бы одно из неравенств нестрогое).

3. Если $3a_3^2 \leq 8a_2$ и x_1 – действительный корень многочлена $x^3 + 0,75a_3 x^2 + 0,5a_2 x + 0,25a_1$ (здесь он единственный, возможно, кратный), то при $P_4(x_1) \leq 0$ у полинома $P_4(x)$ два различных действительных корня либо один кратный.

2. Параметрическая идентификация кинетических процессов по характерным точкам

Параметрическая идентификация каждого из кинетических процессов нами производилась по характерным точкам экстремума, перегиба, экстремальным значениям и др. Часто ограничивались и моделями второго порядка. Последовательно определялись:

– корень λ_2 характеристического полинома (по концу переходного процесса);

– абсцисса точки перегиба $t_n = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \left[\left(-\frac{c_1}{c_2} \right) \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^2 \right];$

– абсцисса точки экстремума $t_m = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \left[\left(-\frac{c_1}{c_2} \right) \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \right];$

– значение λ_1 (по уже известным λ_2 и δ);

– значение $\left(-\frac{c_1}{c_2} \right) = e^{t_m(\lambda_1 - \lambda_2)} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ (по известным λ_1 и λ_2);

– значение $\dot{x}_0 = \frac{\lambda_2 x_m + \frac{c_1}{c_2} \lambda_1 x_m}{1 + \frac{c_1}{c_2}}$ (по известным значениям $\lambda_1, \lambda_2, x_m, \left(-\frac{c_1}{c_2} \right)$);

– наконец, определится $x(t) = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + x_m$.

Отметим, большие значения λ_2 (определяет *макроструктуру* материала) приводят к чрезмерно быстрому увеличению контролируемого параметра (например, прочности) в начале процесса, а малые – к длительному выходу его на эксплуатационное значение. Качество композиционного материала определяется и значением λ_1 (определяет *микроструктуру* материала), которое также должно лежать в определенном диапазоне. Это учитывалось при выборе вида функционалов качества для каждого из частных критериев [8, 9]; в моделях второго порядка линии уровня функционала определялись в виде

$$\left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \omega_0 + \frac{a}{\left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \omega_0} + b \cdot \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}} + c \cdot \frac{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}} = d_k;$$

$$\lambda_1 = \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \omega_0, \quad \lambda_2 = \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}\right) \cdot \omega_0; \quad r = \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}.$$

При синтезе воспользовались тем, что качество материала (класс системы) растет при движении в антиградиентном направлении

$$-\mathbf{grad} (\xi, \omega_0) = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi}, \frac{\partial \Phi}{\partial \omega_0} \right).$$

3. Оценка риска разрушения материалов с позиций теории катастроф и гомеостатического подхода

Риск разрушения материала *принципиально* определяется в виде

$$R(P, C) = \sum_{i=1}^k P_i C_i,$$

где $A = (A_1, A_2, \dots, A_k)$ – перечень событий, которыми определяется разрушение материала как сложной системы; $P = (P_1, P_2, \dots, P_k)$ и $C = (C_1, C_2, \dots, C_k)$ – соответствующие им вероятности и последствия; $R(P, C)$ должно стремиться к минимуму; естественно, $R_{\min}(P, C) = R_0 \neq 0$ (R_0 – допустимый или приемлемый риск; $R > R_0$ определяет класс недопустимого риска). В общем случае выбор приемлемого риска производится для случая, когда функции $P = P(q_1, q_2, \dots, q_n, t)$, $C = C(c_1, c_2, \dots, c_m, t)$ являются неизвестными.

При составлении математической модели материала, выборе и обосновании типа случайного процесса, адекватно описывающего его состояние, могут использоваться марковские цепи, диффузионные процессы, ветвящиеся процессы, случайные процессы со стационарными приращениями и т.д. Для марковских процессов, задавая переходные вероятности с использованием уравнений Колмогорова – Смолуховского – Чепмена, можно получить нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных относительно плотности распределения вероятностей для непрерывных случайных процессов или распределение для дискретных случайных величин. Последствие $C = C(c_1, c_2, \dots, c_m, t)$ будет отображать физико-химические изменения в материале и, как правило, может определяться из решений уравнений математической физики. На основе описания объекта и последствий от *недопустимых изменений параметров* получим операторное нелинейное уравнение

$$L(C, P) = R$$

(по форме совпадает с уравнением теории упругости; R – внешняя нагрузка); часто представимо в виде двух операторных уравнений

$$L_1(R, P, C) = P;$$

$$L_2(R, P, C) = C.$$

Введением вектор-функции $X=(P,C)^T$ и нелинейного оператора A первое из них можно представить в виде операторного уравнения

$$A(R, X) = X.$$

Предполагается, физико-химические изменения в материале должны соответствовать нормативным значениям, а вероятность возникновения последствий близка к нулю. Тогда последнее уравнение имеет решение $X = 0$ при всех значениях риска R ; при некоторых значениях R может иметь ненулевые решения, которые соответствуют скачкообразным изменениям (*катастрофам*) в материале и изменению значений вероятностей аварий. Риск $R_{кр}$ будет *критическим*, если при некоторых значениях R , близких к $R_{кр}$, это уравнение имеет малые ненулевые решения ($R_{кр}$ – точка бифуркации оператора $A(R, X)$). Таким образом, анализ разрушения материала принципиально сводится к чисто математической задаче определения точек бифуркации $A(R, X)$ (в частности, линеаризацией нелинейного оператора: отыскание точек бифуркации сводится к определению характеристических значений соответствующего линейного оператора).

В случае нелинейного оператора упрощения возможны, если известны функции последствий аварий или вероятности распределения. При известном распределении вероятностей (или плотности распределения) можно построить случайный процесс и определить вероятности изменения состояния материала во времени, а также $R_{кр}$; затем определить значение *критического риска*, для которого *вероятность катастрофы наибольшая*. Составление математической модели аварий на основе марковских процессов, в частности, рассматривалось в [10, 11]. Здесь анализ процессов осуществлялся с использованием *производящих* функций $F(t, x) = Mx^{u(t)}$, M – математическое ожидание.

Выводы

1. Предлагаются методологические принципы построения моделей строительных материалов, основанные на их междисциплинарных исследованиях как сложных систем. На конкретных примерах иллюстрируется построение моделей частных критериев качества материалов с использованием методов системного анализа.
2. Исходя из апериодичности кинетических процессов формирования основных физико-механических характеристик материалов предлагается методика параметрической идентификации по экспериментально полученным характерным точкам.
3. Разработана методика оценки риска разрушения композитов на основе теории катастроф и гомеостатического подхода.

Список литературы

1. Бутковский, А.Г. К философии и методологии проблем управления / А.Г. Бутковский // Идентификация систем и задачи управления SICPRO` 03: пленарные доклады II Международной конференции, Москва, 29-31 января 2003 г. – М.: ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова, 2003.
2. Соломатов, В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Материалы юбилейной конференции. – М.: МИИТ, 2001. – С. 56–66.
3. Будылина, Е.А. Композиты с системных позиций / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 2 (39). – С. 5–10.

4. Garkina, I.A. Modeling of kinetic processes in composite materials / I.A. Garkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 421–425.
5. Данилов, А.М. Кинетические процессы формирования свойств материалов, идентификация / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – № 1 (36). – С. 63–67.
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. Гусев, Б.В. Модели полидисперсных систем: критерии оценки и анализ показателей эффективности / Б.В. Гусев, Е.В. Королев, А.Н. Гришина // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2018. – № 8. – С. 31–39.
8. Гарькина, И.А. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математического моделирования / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.
9. Гарькина, И.А. Полиномиальные модели в прогнозировании свойств композитов: состояние, перспективы / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2018. – № 2 (35). – С. 50–54.
10. Гарькина, И.А. Математическое моделирование аварий на объектах повышенной опасности / И.А., Гарькина А.М. Данилов // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. – 2019. – № 1 (8). – С. 64–67.
11. Гарькина, И.А. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Э.В. Лапшин, Н.К. Юрков // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – №1(9). – 2009. – С.3–11.
12. 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.

References

1. Butkovsky, A.G. Toward a Philosophy and Methodology of Management Problems / A.G. Butkovsky // *System Identification and Management Problems SICPRO` 03: Plenary Reports of the II International Conference. Moscow, January 29-31*. – 2003. – М.: Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences named after V.A. Trapeznikov, 2003.
2. Solomatov, V.I. Development of the multistructural theory of composite building materials / V.I. Solomatov // *Materials of the anniversary conference*. – М.: МИИТ, 2001. – P. 56–66.
3. Budylna, E.A. Composites from systemic positions / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – № 2 (39). – P 5–10.
4. Garkina, I.A. Modeling of kinetic processes in composite materials / I.A. Garkina // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 421–425.
5. Danilov, A.M. Kinetic processes of forming the properties of materials, identification / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – № 1 (36). – P. 63–67.
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. Gusev, B.V. Models of polydisperse systems: evaluation criteria and analysis of performance indicators / B.V. Gusev, E.V. Korolev, A.N. Grishina // *Industrial and civil engineering*. – 2018. – №. 8. – P. 31–39.

8. Garkina, I.A. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Construction.* – 2013. – №. 8 (656). – P. 28–33.
9. Garkina, I.A. Polynomial models in predicting the properties of composites: state, prospects / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering.* – 2018. – № 2 (35). – P. 50–54.
10. Garkina, I.A. Mathematical modeling of accidents at high hazard facilities / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *PGUAS Bulletin: construction, science and education.* – 2019. – №1 (8). – P. 64-67.
11. Garkina, I.A. Systemic methodologies, systems identification and control theory: industrial and aerospace applications / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Lapshin, N.K. Yurkov // *News of higher educational institutions. Volga region. Technical science.* – №1 (9). – 2009. – P.3–11.
12. Skachkov, Yu.P. Modification of the method pattern to the solution of architectural and construction problems / Yu.P. Skachkov, A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering.* – 2011. – №. 1. – P. 4–9.

УДК 666.6:681.625.9

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, зав. кафедрой
«Технологии строительных материалов
и деревообработки»
E-mail: vabereg@rambler.ru

Лавров Иван Юрьевич,
магистрант

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Head of the department
«Technology of building materials and wood
processing»
E-mail: vabereg@rambler.ru

Lavrov Ivan Yurievich,
Undergraduate

3D-ПРИНТЕР ДЛЯ ПЕЧАТИ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

В.А. Береговой, И.Ю. Лавров

Проанализированы существующие технические решения в технологии 3D-печати для быстрого прототипирования строительных изделий. Представлена спроектированная рабочая модель 3D-принтера, предназначенного для работы с керамическими массами, подробно описаны его основные узлы и компоновочная схема. Приведены результаты опытов по печати изделий из пластичных глин с использованием экструдера поршневого типа. Определены основные пути решения проблемы стабильного воспроизведения цифровых моделей с учетом реотехнологических свойств высоковязких минеральных масс при их послойном нанесении.

Ключевые слова: технология 3D-печати, принтеры, компоновочная схема, керамика, свойства масс для печати

3D-PRINTER FOR PRINTING CONSTRUCTION CERAMICS

V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov

The existing technical solutions in 3D-printing technology for rapid prototyping of construction products are analyzed. A working model of a 3D-printer designed for working with ceramic masses has been designed. Its main components and layout scheme are described in detail. The results of experiments on printing products made of plastic clays using a piston-type extruder are presented. The main way of solving the problem of stable reproduction of digital models taking into account the rheological properties of high-viscosity mineral masses during their layer-by-layer application are revealed.

Keywords: 3D-printing technology, printers, layout diagram, ceramic, properties masses for the printing

Введение. В строительном материаловедении все большую актуальность приобретают цифровые технологии, что вызывает необходимость проработки технических решений быстрого прототипирования строительных изделий сложной формы с заданными параметрами макроструктуры. В отличие от принтеров, печатающих пластиками, аналогичные устройства, работающие на минеральных составах, различаются по принципу действия и техническим характеристикам [1...2]. Общепринятого варианта компоновки и кинематической схемы таких устройств до настоящего времени не выработано [3...5].

Современной технологией печати глиной является LDM (Liquid Deposition Modeling) от компании-производителя 3D-принтеров WASP (Италия). В ней пластичная масса поступает к печатающей головке через шланг под давлением 0,4...0,6 МПа,

создаваемым компрессором. Процесс экструзии регулируется шнековым механизмом с помощью шагового мотора, обеспечивающего непрерывность подачи и дополнительное уплотнение сырьевой массы. В отличие от предшественников, основанных на использовании классической картезианской схемы (рис. 1, а), принтер WASP сконструирован по дельта-кинематической схеме (рис. 1, б) с неподвижной рабочей площадкой, обеспечивающей улучшение сохранности керамического сырца.

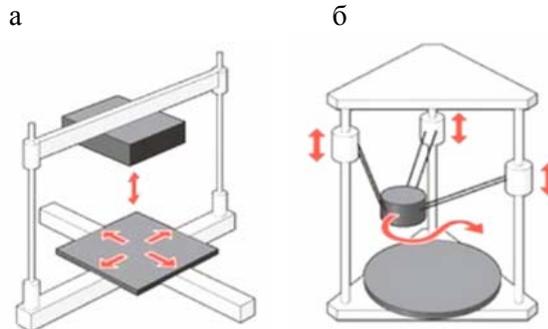


Рис. 1. 3D-принтеры различной кинематической схемы

Большинство промышленных принтеров, работающих на цементных «чернилах», используют технологические решения от компании Countour Crafting (США). Они предусматривают укладку бетонной смеси с помощью экструдера, установленного на подвижной порталной конструкции [4, 5].

Базовыми компонентами применяемых смесей являются портландцемент и среднеразмерный кварцевый песок, модифицирующие добавки (гиперпластификаторы, полимерные или минеральные микроволокна, активные минеральные порошки). Оценку качества бетонных смесей определяют по показателям пластической прочности (не менее $1,1 \text{ кгс/см}^2$) и началу схватывания (не более 30 мин) [5].

Методы и материалы.

В исследованиях применяли легкоплавкое среднепластичное глинистое сырье смешанного минералогического состава. Основные технические показатели глины: прочность до обжига – $1,2 \dots 1,3 \text{ МПа}$, после обжига – $7,7 \dots 8,5 \text{ МПа}$; усадка воздушная – $6,5 \%$, полная – $9,8 \%$; коэффициент водостойкости – $0,96$.

Для работы с глиной был спроектирован и изготовлен 3D-принтер оригинальной конструкции. Его кинематика выполнена по картезианской схеме перемещения печатающей головки, установленной на подвижном портале (рис. 2 и 3).

Для передвижения по оси «X» применяли цилиндрические направляющие диаметром 16 мм на линейных подшипниках. Перемещение портала по оси «Y» осуществлялось по профильным трубам сечением $40 \times 20 \text{ мм}$. Их выбор обусловлен стоимостью монтажа несущей конструкции необходимой длины. С целью устранения отклонения геометрических размеров опорных направляющих по длине их снабдили кареткой с узлом компенсации люфта (рис. 4). В ходе практических испытаний установлено, что спроектированная система обеспечивает требуемую точность печати.

В качестве ходовых винтов осей «X» и «Y» применены резьбовые шпильки М8 с шагом 1,25 мм, а оси «Z» – винт с трапецидальной резьбой и ходом резьбы 4 мм. Соединение валов шаговых двигателей с ходовыми винтами – через упругие муфты.

В таблице приведены основные технические характеристики принтера, полученные в ходе испытаний.

Показатель	Значение	Показатель	Значение
Перемещение экструдера (max), мм:		Скорость перемещения (max), мм/мин	
– по оси «X»	290	– по оси «X»	300
– по оси «Y»	460	– по оси «Y»	300
– по оси «Z»	150	– по оси «Z»	1500

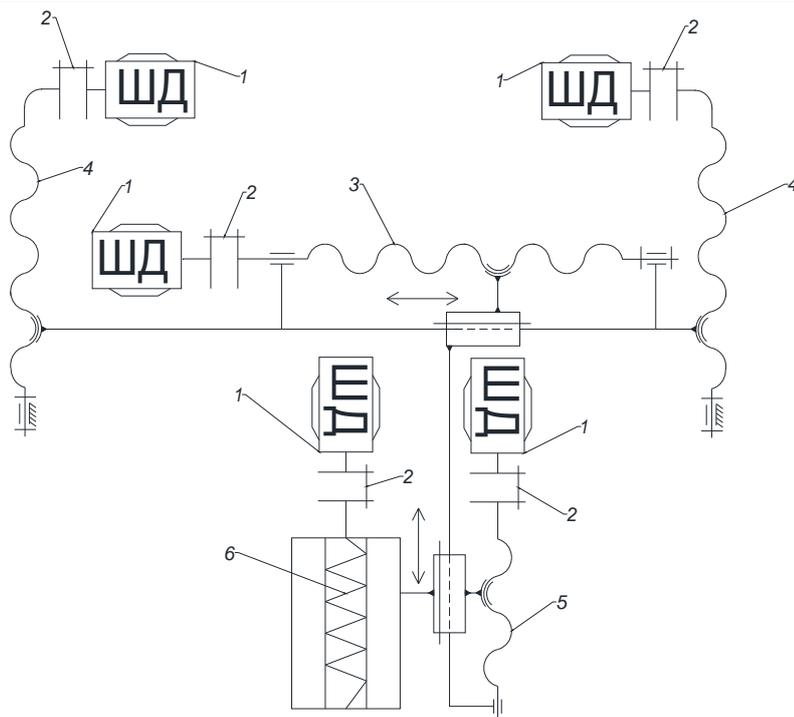


Рис. 2. Кинематическая схема 3D-принтера:
 1 – шаговые двигатели 17HS4401; 2 – муфты упругие; 3 – ходовой винт оси «X»;
 4 – ходовые винты оси «Y»; 5 – ходовой винт оси «Z»; 6 – поршневой экструдер



Рис.3. Общий вид принтера (без экструдера)

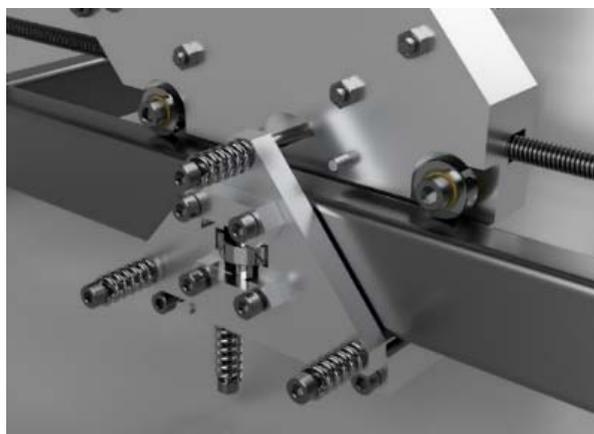


Рис. 4. Общий вид каретки портала с узлом компенсации люфта

Пакет программ для печати глиняными массами обеспечивает этапы компьютерного моделирования изделия (Autodesk Fusion 360), дефрагментацию модели на слои слайсер-программами (Simplify3D, Cura), отправку G-кода на перепрограммированный под печать минеральными смесями микроконтроллер.

Сокращение времени набора структурной прочности экструдированного сырца обычно достигается введением химических ускорителей, воздействием теплового или воздушного циркуляционного потока, а также его самоуплотнением за счет вибрационного воздействия.

В ранее проведенных исследованиях доказана возможность получения быстро схватывающихся тиксотропно-уплотняемых масс на основе высоковязких суспензий, вырабатываемых из химически модифицированных опок [6]. Разработанные составы силицитовых шликеров характеризуются быстрым восстановлением пластической прочности ($\tau_{\text{вост}}=250\dots300$ с) и предельно низким значением водотвердого отношения ($B/T_{(\text{min})}=0,42$; $B/T_{(\text{max})}=0,53$) [7]. Уникальное сочетание свойств обуславливает целесообразность адаптации этого способа к аддитивным технологиям на основе минеральных «чернил».

Для этого необходимо проведение дополнительных исследований процесса экструдирования пластичных минеральных составов из устройств различной конструкции с целью нахождения приемлемого сочетания их размерно-геометрических параметров и вязкопластичных свойств печатаемой массы. Применительно к технологии печати керамики целесообразно использовать поршневой (масса проталкивается плунжером через сопло мундштука) или шнековый (продавливание за счет вращения горизонтального винта со сплошной винтовой поверхностью вдоль продольной оси движения перемещаемой массы) их типы.

В настоящее время изготовлен и испытан первый вариант печатающего устройства с поршневым экструдером (рис. 5). Опыты показали удовлетворительную работоспособность всей системы и перспективность продолжения исследований.

Естественно, возникает и другой комплекс вопросов: корректировка управляющих программ во избежание эффекта переэкструзии на углах модели; увеличение адгезии первого минерального слоя к неподвижному основанию; выравнивание «бревенчатого» рельефа лицевой поверхности изделия; модификация составов минеральных «чернил» химическими добавками с целью повышения прочности напечатанного сырца и снижения его воздушной усадки.



Рис. 5. Цифровые модели поршневого экструдера и объекта печати, выполненные в Autodesk Fusion 360, и их материализованные копии

Выводы и рекомендации.

Разработана рабочая модель 3D-принтера для работы с керамическими массами. Результаты экспериментов с применением пластичных глин показали перспективность применения картезианской кинематической схемы принтера и его оснащения поршневым экструдером в качестве подающего и дозирующего устройства печатающей головки.

Разработка второго варианта 3D-принтера, снабженного шнековым экструдированным устройством для работы с высоковязкими минеральными массами, позволит минимизировать водотвердое отношение и улучшить качество печати.

Список литературы

1. Иноземцев, А.С. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев, Зыонг Тхань Куй // Вестник МГСУ. – 2018. – № 7. – С. 863-876.
2. Ватин, Н.И. 3D-печать в строительстве / Н.И. Ватин, Л.И. Чумадова, И.С. Гончаров [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 1 (52). – С. 27–46.
3. В России напечатали первый жилой дом. Apis Cor. We print buildings. – URL: <http://apis-cor.com/about/news/first-house>.
4. CyBe Construction: Redefining construction with 3D Concrete printing. – URL: <https://www.cybe.eu/>.
5. Kazemian, A. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture / A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevis // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 145. – P. 639–647.
6. Береговой, В.А. Псевдоразжижение сырьевых масс в технологии ячеистой керамики на основе природных силицитов / В.А. Береговой, Е.В. Снадин, Г.А. Фокин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2. – С. 26–31.
7. Береговой, В.А. Облегченная керамика повышенной прочности для энергоэффективных ограждающих конструкций / В.А. Береговой, Е.В. Снадин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4. – С. 54–60.
8. Береговой, В.А. Применение природных силицитов в технологии ячеистой керамики / В.А. Береговой, Е.В. Снадин // Известия вузов. Строительство. – 2018. – № 2. – С. 13.

References

1. Inozemtsev, A.S. Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction / A. S. Inozemtsev, E.V. Korolev, Zuong Than Kui // MGSU Bulletin. – 2018. – № 7. – P. 863–876.
2. Vatin, N.I. 3D-printing in construction / N.I. Vatin, L.I. Chumadova, I.S. Goncharov // Construction of unique buildings and structures. – 2017. – № 1 (52). – P. 27–46.
3. Apis Cor. We print buildings. – URL: <http://apis-cor.com/news/first-house>
4. CyBe Construction: Redefining construction with 3D Concrete printing. – URL: <https://www.cybe.eu/>
5. Kazemian, A. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture / A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevis // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 145. – P. 639–647.
6. Beregovoy, V.A. Fluidization of raw materials in the technology of cellular ceramics based on natural silicites / V.A. Beregovoy, G.A. Fokin, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 2. – P. 26–31.
7. Beregovoy, V.A. Lightweight ceramics of increased strength for energy-efficient enclosing structures / V.A. Beregovoy, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 4. – P. 54–60.
8. Beregovoy, V.A. The use of natural silicites in the technology of cellular ceramics / V.A. Beregovoy, E.V. Snadin // News of universities. Construction. – 2018. – No. 2. – P. 13.

УДК 69.691, 54.544.7, 53.53.044

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Вилкова Наталья Георгиевна, доктор химических наук, профессор кафедры «Физика и химия»
E-mail: ngvilkova@mail.ru**Фокин Георгий Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Физика и химия»
E-mail phisik @ pguas. ru**Мазурин Николай Николаевич**, аспирант кафедры «Физика и химия»
E-mail: kol29111992@yandex.ru*Пензенский государственный университет*

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

Мишина Светлана Ивановна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и теория и методика обучения химии»
E-mail: elancv@mail.ru*Penza State University of Architecture and Construction*

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

Vilkova Natalya Georgievna, Doctor of Chemical Sciences, Professor of the department «Physics and Chemistry»
E-mail: ngvilkova@mail.ru**Fokin Georgi Aleksandrovich**, Doctor of Sciences, Professor of the department «Physics and Chemistry»
E-mail phisik @ pguas. ru**Mazurin Nikolay Nikolaevich**, Postgraduate student of the department «Physics and Chemistry»
E-mail: kol29111992@yandex.ru*Penza State University*

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

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

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА СУСПЕНЗИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ПЕН И МАТЕРИАЛОВ С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ

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

Изучено влияние ультразвуковых воздействий на суспензии твердых частиц с целью получения устойчивых трехфазных пен и строительных материалов с улучшенными свойствами. Ультразвуковые волны получали с помощью технологического аппарата серии «Волна» (УЗТА – 0,4/22-Ом): выходная мощность 30 %, время обработки 5 минут. Показано, что ультразвуковое воздействие на суспензии различной химической природы (кремнезема и цемента) во всех исследованных случаях приводило к изменению распределения частиц по их размерам и возрастанию процентного содержания фракций со средним радиусом 8 мкм и менее. Диспергирование частиц кремнезема делало возможным повысить значение краевого угла смачивания кремнезема и получить устойчивые пены при высоких степенях гидрофобизации твердой поверхности – 3,04 ммоль/г и 4,6 ммоль/г. Ультразвуковое воздействие на раствор затворения (суспензию цемента) также приводило к измельчению частиц твердой фазы и возрастанию в 1,5–2 раза прочности полученного цементного камня.

Ключевые слова: пена, краевой угол смачивания, ультразвуковая обработка, кремнезем, цемент

ULTRASONIC TREATMENT OF SUSPENSIONS FOR PRODUCING STABLE THREE PHASE FOAMS AND MATERIALS WITH IMPROVED PROPERTIES

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

The effect of ultrasonic influences on suspensions of solid particles was studied to obtain stable three-phase foams and building materials with improved properties. Ultrasonic waves were obtained using the technological apparatus of the Volna series (UZTA – 0.4 / 22-Ohm): output power is 30 %, processing time – 5 minutes. It was shown that ultrasonic action on suspensions of various chemical nature (silica and cement) in all the cases led to a change in the distribution of particles by their size and an increase in the percentage of fractions with an average radius of 8 μm or less. The dispersion of silica particles made it possible to increase the value of the contact angle of silica and to obtain stable foams with high degrees of hydrophobization of a solid surface of 3.04 mmol/g and 4.6 mmol/g. Ultrasonic action on the solution of mixing water (cement suspension) also led to the grinding of particles of the solid phase and an increase by 1.5-2 times the strength of the resulting cement stone.

Keywords: foam, contact angle, ultrasonic treatment, silica, cement

Известно, что тонкодисперсные порошки различной химической природы могут служить хорошими стабилизаторами дисперсных систем. Обычно наиболее распространенными твердыми стабилизаторами являются нерастворимые ни в воде, ни в органических жидкостях вещества: глина, уголь, кремнезем, стекло, оксиды и гидроксиды многих металлов. Научные исследования таких дисперсных систем [1-10] в настоящее время обусловлены новыми возможностями их применения: удаление из водной суспензии частиц нанометрических размеров (например углеродных нанотрубок, представляющих собой полые цилиндрические структуры углерода диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров); использование пен в процессах нефтеотдачи EOR (enhanced oil recovery); проявление ярко выраженного антивирусного эффекта нанокompозитами на основе оксида титана; пена, стабилизированная SiO_2 и додецилбензолсульфонатом натрия (SDBS) или наночастицами и SDS, была исследована в качестве потенциальных жидкостей для гидроразрыва. Пены, стабилизированные микро- и наночастицами, также представляют собой перспективные заменители полимеров, которые часто используют для стабилизации дисперсных систем.

Волновые методы применяются при изготовлении строительных материалов [11–15]. Было установлено, что электромагнитные колебания, вихревые магнитные поля, ультразвуковые волны различной частоты создают условия для получения структуры строительного материала, которая характеризуется изотропией определенных свойств. Особую роль играет подготовка маточного (затравочного) раствора с использованием ультразвуковой технологии [12]. Были проведены исследования [12–15] по активации воды затворения ультразвуковым методом в докавитационный период, а также получены активированные маточные растворы волновым методом, показавшие хорошие результаты по улучшению физико-механических характеристик материалов на основе цементного вяжущего. Отмечено, что все виды волновых воздействий на раствор затворения приводят к диспергированию частиц дисперсионной среды, в результате структура полученного материала становится однородной, увеличивается прочность на сжатие. В связи с этим перспективным является применение волновых технологий для получения устойчивых дисперсных систем, а в дальнейшем для получения материалов с улучшенными свойствами.

Целью работы является изучение и анализ влияния ультразвуковой обработки суспензий на формирование трехфазных пен и строительных материалов.

Методы исследования

1. Обработка суспензии ультразвуком

Суспензия кремнезема (Аэросил-380) была обработана ультразвуковым технологическим аппаратом серии «Волна» (УЗТА – 0,4/22-Ом; вариант исполнения №1). Назна-

чение данного аппарата: интенсификация процессов в жидких и жидкодисперсных средах (экстракция, растворение, диспергирование и другие процессы), возможна установка прибора в технологическую линию. Аппарат состоит из электронного генератора с таймером и регулятора выходной мощности (30-100 %), пьезоэлектрической колебательной системы в металлическом корпусе с принудительным воздушным охлаждением. Технические характеристики прибора: мощность – не более 400 ВА, частота ультразвуковых колебаний – 22 кГц, интенсивность ультразвукового воздействия – не менее 10 Вт/см².

2. Определение устойчивости пены

Навеску аэросила массой 3 г добавляли к 150 мл дистиллированной воды для получения суспензии с массовым содержанием твердой фазы 2 %. Полученную суспензию обрабатывали ультразвуковым технологическим аппаратом (мощность – 30 %, длительность – 5 минут). Брели 3 пробы обработанной суспензии по 10 мл и добавляли гидрофобизатор (гексилламин): к первой – 0,06 мл; ко второй – 0,08 мл; к третьей – 1,2 мл. Встряхивали в закрытых пробирках до образования пены. Устойчивость полученной трехфазной пены определяли по изменению высоты столба (H, см) в гравитационном поле.

3. Седиментационный метод

По скорости седиментации частиц (V) в гравитационном поле рассчитывают радиус агрегатов микрометрического размера. Для динамической вязкости воды $\eta=10^{-3}$ Па·с, плотности воды $\rho_w=10^3$ кг/м³ и кремнезема $\rho_p=2,2 \cdot 10^3$ кг/м³ (если скорость седиментации выражена в см/мин) средний радиус агрегатов ($R_{\text{агр}}$) квазисферической формы в микрометрах равен:

$$R_{\text{агр}} = \sqrt{\frac{9\eta \cdot v}{2 \cdot (\rho_p - \rho_w) \cdot g}} = \sqrt{63,7 \cdot v}.$$

В случае полидисперсных агрегатов, когда наблюдается постепенное осветление золя без резкой границы седиментации, распределение агрегатов по размерам рассчитывают методом дисперсионного анализа [16].

Как отмечалось, твердые частицы различной химической природы (оксиды железа, титана, кремния) активно используются в настоящее время для разработки новых и совершенствования существующих технологических процессов. При этом сам процесс получения устойчивых дисперсных систем может служить основой для получения материалов с новыми физико-химическими свойствами (повышенная прочность, высокая удельная поверхность, малая масса) [16-18]. Кроме того, пены, стабилизированные микро- и наночастицами, представляют собой перспективные заменители полимеров, которые часто используют для стабилизации дисперсных систем. Например, в работе [3] стабильность пены повышается с помощью наночастиц, таких, как SiO₂ и Fe₂O₃, в сочетании с полимером гуаровой камедью. Экспериментальные результаты этой работы показывают, что добавление наночастиц к растворам альфа-олефинсульфоната (АОС) и гуаровой камеди может значительно повысить стабильность пены. Причем растворы полимера в сочетании поверхностно-активным веществом, такие, как гуаровая камедь и АОС, образуют пены со временем жизни, значительно более коротким, чем дисперсии поверхностно-активного вещества в присутствии наночастиц (например АОС-SiO₂). Известно, что при определенной концентрации поверхностно-активного вещества и степени гидрофобизации микро- и наночастицы адсорбируются на границе раздела газ – жидкость, повышая таким образом стабильность дисперсных систем (пен и эмульсий) [17, 18]. Необходимо отметить, что агрегирование частиц-стабилизаторов в дисперсной системе или в исходной суспензии может служить причиной понижения устойчивости пены или невозможности ее образования. В частности, наночастицы (Fe₂O₃) в растворах на основе гуара имели тенденцию к агломерации из-за высокой поверхностной энергии этих наночастиц. Коалесценция является величайшим дестабилизирующим механизмом. Это вовлекает меньшие наночастицы, коллапсирующие друг с другом, формируя более крупные.

Наночастицы (Fe_2O_3) в растворах на основе гуара имели тенденцию к агрегации из-за высокой поверхностной энергии этих наночастиц, изменяя при этом устойчивость и свойства дисперсной системы (рис. 1, данные работы [3]). При высоком значении дзета-потенциала системы, содержащие кремнезем и ПАВ (0,5 мас. % АОС + 0,1 мас. % SiO_2), показали высокую стабильность для суспензий наночастиц. Однако, когда дзета-потенциал суспензии был низким (-20,5 мВ и сила притяжения превышала силу отталкивания), например в АОС с полимером и твердым Fe_2O_3 , наночастицы начинали агрегировать.

Показаны изменения свойств пен, содержащих АОС-гуар и оксид железа (III), в начальный момент их формирования (а) и через несколько дней (б) [3].

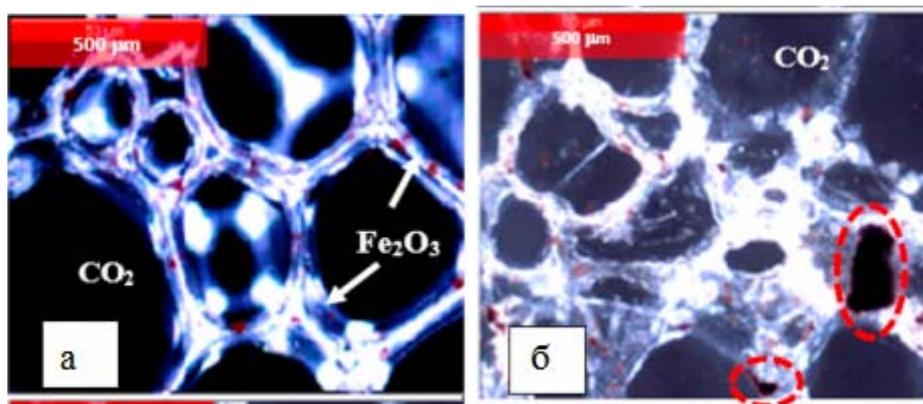


Рис. 1. Изменение структуры пен, содержащих АОС-гуар и оксид железа (III), в результате агрегации наночастиц

Влияние природы и концентрации частиц-стабилизаторов на формирование твердых пеноматериалов было отмечено в работе [16]. В частности, тонкие слои пены из суспензии аэросила с массовым содержанием кремнезема 6 % и сульфата алюминия 10 % могут формировать на стеклянной пластине твердые структуры (рис. 2, б, в). Пены, полученные из 1 % суспензий аэросила, подобных структур не формируют (рис. 2,а).

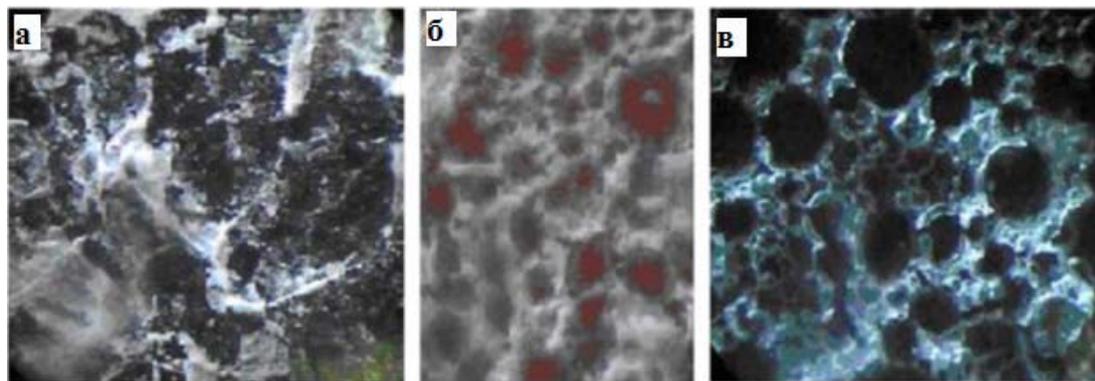


Рис. 2. Структуры тонких слоёв пен:
а – 1 % аэросил; б – 10 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; в – 6 % аэросил

Отмечалось также, что важным фактором образования трехфазных пен является степень гидрофобизации твердых частиц в исходных суспензиях. Показано, что существует определенное значение краевого угла смачивания кремнезема, выше которого получение дисперсных систем было невозможно. В частности, увеличение концентрации гидрофобизатора гексиламина до краевого угла смачивания твердых частиц, равного 50–54°, формировало устойчивые трехфазные пены. Дальнейшее увеличение концентрации гидрофобизатора приводило к агрегации частиц и сопровождалось ростом радиусов образующихся агрегатов. То есть при достижении определенных

максимальных радиусов стабилизация дисперсных систем, обусловленная выходом твердых стабилизаторов на границу раздела фаз, становится невозможной.

Нами проведена ультразвуковая обработка исходной водной суспензии аэросила. Наблюдаемое изменение фракционного состава исходной суспензии представлено в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Фракционный состав аэросила до и после ультразвуковой обработки

Исходная суспензия	4 мкм и менее	4-8	8-12	12-16	16-20
Аэросил-380 0,33 % с обработкой	20 %	30 %	15,2 %	5,2 %	20 %
Аэросил-380 0,33 % без обработки	10 %	14 %	32 %	15,2 %	17,2 %
Аэросил-380 1 % + 8,3 ммоль/л гексилamina	75,2 %	15,2 %	5,2 %	2 %	1 %

Как видно из табл. 1, ультразвуковая обработка суспензии аэросила уменьшала долю частиц радиусом 12-20 мкм и увеличивала их содержание радиусом от 4 до 8 мкм. Отметим, что частицы таких радиусов могут участвовать в формировании пленок бислойной структуры. Добавление к обработанной ультразвуком исходной суспензии 1 % аэросила 8,3 ммоль/л гексилamina не приводило к заметному агрегированию частиц. Как следует из табл. 1, в суспензии находится 90 % частиц радиусом 4-8 мкм.

Отметим, что влияние воздействия ультразвука на процесс диспергирования частиц цемента было рассмотрено в работе [15]. Для этого суспензию цемента с высотой слоя 10 см обрабатывали ультразвуком и проводили послойное изучение изменения размеров частиц при волновом воздействии. В результате анализа получено следующее распределение частиц в слоях по размерам (табл. 2, данные работы [15]).

Т а б л и ц а 2

Седиментационные характеристики суспензий цемента, обработанных ультразвуком

Виды воздействия	Радиус частиц, мкм	1	2	3	4	5
Гравитационное поле	R_{cp} , мкм	-	-	25	45	85
	содержание фракции, %	0	0	38,5	28,4	33,1
Ультразвуковое воздействие	R_{cp} , мкм	2,25	7,5	20	40	85
	содержание фракции, %	23,1	4,98	15,9	32,23	23,8

В табл. 2 показано послойное распределение частиц цемента в воде по величине среднего радиуса (R_{cp}) и высоте слоя под действием гравитационного поля и в маточном растворе под воздействием ультразвука. Как видно из табл. 2, под воздействием ультразвуковых колебаний крупные фракции цемента диспергируют на более мелкие, появляются новые фракции с размерами 2,25 и 7,5 мкм. Происходит изменение радиусов фракций и их процентного содержания. Повышается процентное содержание частиц среднего радиуса 4,8 мкм. При этом использование обработанных ультразвуком маточных растворов с частицами среднего радиуса 8 мкм и менее приводило к увеличению относительной прочности полученного строительного материала в 1,5–2 раза.

Как отмечалось, агрегирование частиц в суспензиях кремнезема протекает интенсивно при достижении некоторого максимального краевого угла смачивания, превышение которого более указанных значений было невозможно, а формирующиеся пены теряли устойчивость или не образовывались совсем.

В данной работе в обработанную ультразвуком 2 % суспензию аэросила добавляли гексилamin. Установлено повышение краевого угла до $69,4^{\circ}$ и $\approx 80^{\circ}$ в суспензиях 2 % аэросила + 25,3 ммоль/л гексилamina и 2 % аэросила + 45,5 ммоль/л гексилamina соответственно.

Устойчивость трехфазных пен, стабилизированных 2 % аэросилом,
после обработки суспензий ультразвуком

Концентрация гексилamina, ммоль/ л	Степень гидрофобизации, ммоль/г	Высота слоя, см, через		
		1-2 мин	3 суток	7 суток
45,5	2,28	5,2	5,2	5,0
60,7	3,04	4	4	3,8
92	4,6	4,1	4,1	3,9

Исходная высота полученной в закрытых пробирках пены составляла 8 см, 9 см, 10,5 см при концентрации модификатора 45,5 ммоль/ л, 60,7 ммоль/ л, 92 ммоль/ л и изменялась за 1-2 минуты до 5,2 см, 4 см, 4,1 см. Дальнейшее уменьшение высоты столба не превышало 5 % в течение 7 суток.

Таким образом, ультразвуковое воздействие на суспензии различной химической природы (кремнезема и цемента) во всех исследованных случаях приводило к изменению распределения частиц по их размерам и возрастанию процентного содержания фракций со средним радиусом 8 мкм и менее. Диспергирование частиц кремнезема делало возможным повысить значение краевого угла смачивания кремнезема и получить устойчивые пены при степени гидрофобизации твердой поверхности 3,04 ммоль/г и 4,6 ммоль/г. Ультразвуковое воздействие на раствор затворения также приводило к измельчению частиц твердой фазы и возрастанию в 1,5-2 раза прочности полученного цементного камня.

Список литературы

1. Apichay, B. Cutting oil removal by continuous froth flotation with packing media under low interfacial tension conditions / B. Apichay, P. Orathai, N. Suchaya, C. Jittipan // *Separation and Purification Technology*. – 2013. – Vol. 107. – N 2. – P. 118–128.
2. Blanco, E. Stability and viscoelasticity of magneto-pickering foams / E. Blanco, S. Lam, S.K. Smoukov, K.P. Velikov, S.A. Khan, O.D. Veleev // *Langmuir*. – 2013 – № 29. – P. 10019–10027.
3. Emrani, A. S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO₂ foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017 – V. 524. – P. 17–27.
4. Karhu, M. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions / M. Karhu, T. Leiviskä, J. Tanskanen // *Separation and Purification Technology*. – 2014 – Vol. 122. – P. 231–241.
5. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S. I. Elaneva, N. G. Vilkoва, S. I. Karakashev // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol. 165. – N 2. – P. 108–116.
6. Lili, G. Separation of dispersed carbon nanotubes from water: effect of pH and surfactants on the aggregation at oil/ water interface / G. Lili, Y. Huayi, Z. Hua, M. Xuhui // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol. 129. – N 29. – P. 113–120.
7. Vilkoва, N. G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox / N. G. Vilkoва, S. I. Elaneva, S. I. Karakashev // *Mendeleev Communication*. – 2012. – Vol. 22. – N 4. – P. 227–228.
8. Zhao, G. Stability mechanism of a novel three-phase foam by adding dispersed particle gel / G. Zhao, C. Dai, D. Wen, J. Fang // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2016. – Vol. 497. – P. 214–224.
9. Zhao, Y.Y. A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams / Y.Y. Zhao, D. X. Sun // *Scripta Materialia*. – 2001. – № 44 (1). – P. 105–110.
10. Вилкова, Н.Г. Влияние гидрофобности частиц кремнезема на устойчивость пен и пенных пленок / Н.Г. Вилкова, С.И. Еланева // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 62–66.

11. Баженов, Ю.М. Цементные композиты на основе магнитно- и электрохимически активированной воды затворения: монография / Ю.М. Баженов [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2011. – С. 126.
12. Ерофеев, В.Т. Активированная вода затворения, как особый жидкий компонент для строительных материалов / В.Т. Ерофеев, Е.А. Митина, Д.В. Емельянов [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2008. – №1(4). – С. 41–45.
13. Фокин, Г.А. Акустические и вихревые поля в водных растворах: монография / Г.А. Фокин, О.В. Тетюшева, А.С. Гуськов. – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 259.
14. Фокин, Г.А. Ультразвук в строительстве / Г.А. Фокин, Н.Г.Вилкова, А.С. Гуськов. – Пенза: ПГУАС, 2017. – С. 317.
15. Фокин, Г.А. Ускорение реакции твердения вяжущего низкочастотным ультразвуковым полем / Г.А. Фокин, А.С. Гуськов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №17. – С. 62–66.
16. Мишина, С.И. Исследование устойчивости и синерезиса пен, стабилизированных частицами коллоидального кремнезема и гидроксида алюминия: дис. ... канд. хим. наук / С.И. Мишина; Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова. – М., 2013.
17. Нуштаева, А.В. Определение угла избирательного смачивания полидисперсных изоморфных твердых частиц / А.В. Нуштаева // Успехи современного естествознания. – 2019. – №1. – С.13–17.
18. Нуштаева, А.В. Стабилизация эмульсий микрочастицами талька / А.В. Нуштаева // Коллоидный журнал. – 2019 – Т.81, № 4. – С. 487–492.

References

1. Apichay, B. Cutting oil removal by continuous froth flotation with packing media under low interfacial tension conditions / B. Apichay, P. Orathai, N. Suchaya, C. Jittipan // Separation and Purification Technology. – 2013. – Vol. 107. – N 2. – P. 118–128.
2. Blanco, E. Stability and viscoelasticity of magneto-pickering foams / E. Blanco, S. Lam, S.K. Smoukov, K.P. Velikov, S.A. Khan, O.D. Velev // Langmuir. – 2013 – № 29. – P. 10019–10027.
3. Emrani, A. S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO₂ foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2017 – V. 524. – P. 17–27.
4. Karhu, M. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions / M. Karhu, T. Leiviskä, J. Tanskanen // Separation and Purification Technology. – 2014 – Vol. 122. – P. 231–241.
5. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S. I. Elaneva, N. G. Vilkova, S. I. Karakashev // Advances in Colloid and Interface Science. – 2011. – Vol. 165. – N 2. – P. 108–116.
6. Lili, G. Separation of dispersed carbon nanotubes from water: effect of pH and surfactants on the aggregation at oil/ water interface / G. Lili, Y. Huayi, Z. Hua, M. Xuhui // Separation and Purification Technology. – 2014. – Vol. 129. – N 29. – P. 113–120.
7. Vilkova, N. G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox / N. G. Vilkova, S. I. Elaneva, S. I. Karakashev // Mendeleev Communication. – 2012. – Vol. 22. – N 4. – P. 227–228.
8. Zhao, G. Stability mechanism of a novel three-phase foam by adding dispersed particle gel / G. Zhao, C. Dai, D. Wen, J. Fang // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2016. – Vol. 497. – P. 214–224.
9. Zhao, Y.Y. A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams / Y.Y. Zhao, D. X. Sun // Scripta Materialia. – 2001. – № 44 (1). – P. 105–110.
10. Vilkova, N.G. The influence of the hydrophobicity of silica particles on the stability of foams and foam films / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva // Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. – 2013. – Vol. 56, N 9. – P. 62–66.

11. Bazhenov, Y.M. Cement composites based on magnetically and electrochemically activated mixing water: monograph / Y.M. Bazhenov [et al.]. – Saransk: Publishing House of Mordovia University, 2011. – P. 126.
12. Erofeev, V.T. Activated mixing water as a special liquid component for building materials / V.T. Erofeev, E.A. Mitina, D.V. Emelyanov [et al.] // Regional Architecture and engineering. – 2008. – N 1 (4). – P. 41–45.
13. Fokin, G.A. Acoustic and vortex fields in aqueous solutions: monograph / G.A. Fokin, O.V. Tetyusheva, A.S. Guskov. – Penza: PGUAS, 2013. – P. 259.
14. Fokin, G.A. Ultrasound in construction / G.A. Fokin, N.G. Vilkova, A.S. Guskov. – Penza: PGUAS, 2017. – P. 317.
15. Fokin, G.A. Acceleration of the binder hardening reaction with a low-frequency ultrasonic field / G.A. Fokin, A.S. Guskov // Regional architecture and engineering. – 2013 – N 17. – P. 62-66.
16. Mishina, S. I. Investigation of the stability and syneresis of foams stabilized by particles of colloidal silica and aluminum hydroxide: diss. cand. chemical sciences / S.I. Mishina; Moscow State University of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov. – M., 2013.
17. Nushtaeva, A.V. Determination of the angle of selective wetting of polydisperse isomorphic solid particles / A.V. Nushtaeva // Successes in modern science. – 2019. – N 1. – P.13–17.
18. Nushtaeva, A.V. Emulsion stabilization with talc microparticles / A.V. Nushtaeva // Colloid Journal. – 2019. – Vol.81, N 4. – P. 487–492.

УДК 691.175.2

УДК 691.175.2

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

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

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

Смиркин Андрей Сергеевич,
аспирант

Бородин Александр Владимирович,
аспирант
E-mail: Sas-borodin@yandex.ru

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.

Cherkasov Vasily Dmitrievich,
Doctor of Science, Professor,
Head of the department «Applied mechanics»
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Smirkin Andrey Sergeevich,
Postgraduate student

Borodin Alexander Vladimirovich,
Postgraduate student

ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА СЛОЕНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Д. Черкасов, А.С. Смиркин, А.В. Бородин

Представлены результаты исследований по выбору соотношения толщин слоев в слоеной вибропоглощающей конструкции с вязкоупругим слоем из битумно-каучуковой мастики и его свойствами. В качестве объекта исследования выбран слоеный материал, состоящий из двух стальных листов, соединенных самоклеящейся битумно-каучуковой мастикой. Представлена зависимость вибропоглощающих свойств слоеной конструкции от толщины вязкоупругого слоя, частоты колебаний.

Ключевые слова: слоеный вибропоглощающий материал, демпфирование, конструкция, частота

VIBRATION-ABSORBING PROPERTIES OF LAYERED MATERIALS

V.D. Cherkasov, A.S. Smirkin, A.V. Borodin

The article presents the results of studies on the choice of the ratio of the layers thicknesses in a layered vibration absorbing structure with a visco-elastic layer of bitumen-rubber mastic and its properties. As the object of study, a layered material consisting of two steel sheets connected by a self-adhesive bitumen-rubber mastic was selected. The dependence of the vibration-absorbing properties of the puff structure on the thickness of the visco-elastic layer and the oscillation frequency is presented.

Keywords: layered vibration-absorbing material, damping, design, frequency

В России и за рубежом проводятся работы по созданию вибродемпфирующих конструкционных материалов, из которых можно изготавливать детали инженерных конструкций пониженной вибровозбудимости [1, 2, 9, 10]. К ним относятся панели электронных приборов, работающих в условиях повышенной вибрационной нагрузки, звукоизолирующие кожухи, малонагруженные элементы корпусных конструкций транспортных средств: автомобилей, вагонов, самолетов, судов. К вибропоглощающим конструкционным материалам относятся слоеные вибропоглощающие материалы, состоящие из двух металлических пластин (обычно одинаковой толщины), соединенных вязкоупругим клейким слоем с высокими внутренними потерями [1].

В иностранной технической литературе они называются «сэндвичами» [19]. Конструкция слоеного вибропоглощающего материала приведена на рис. 1.

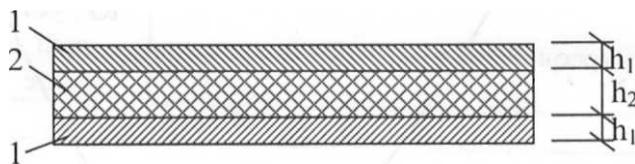


Рис. 1. Конструкция слоеного вибропоглощающего материала:
1 – металлические пластины; 2 – вязкоупругий материал

Вибродемпфирующие свойства таких конструкций связаны с вязкоупругими параметрами материалов, из которых состоят слои конструкции, и зависят от соотношения толщин слоев [3, 16]. Многочисленные исследования вибропоглощающих свойств таких материалов показали, что значение коэффициента потерь слоеной конструкции не может превышать (0,3-0,5) коэффициента потерь вязкоупругого слоя [2]. Таким образом, для получения высоких значений коэффициента потерь конструкции необходимо применять вязкоупругий материал с большими внутренними потерями [13, 14].

По типу вибропоглощающей прослойки различают два вида конструкций слоеного материала: с клеенной листовой пластмассой и с самоклеящейся постоянно вязкой мастикой. Наиболее перспективными слоеными материалами являются материалы с самоклеящейся постоянно вязкой мастикой.

В отечественной практике применяется несколько видов слоеных вибропоглощающих материалов [1, 2]. Металлические слои в этих материалах изготавливаются из дюралюминия или стали.

Вязкоупругий слой выполняется из модифицированной битумной или поливинилацетатной мастики. Вибропоглощающие свойства таких материалов имеют максимальное значение при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ [1]. Еще одним недостатком таких материалов является низкая адгезия к металлу. Для её увеличения в мастики добавляют эпоксидную смолу.

Из зарубежных слоеных вибропоглощающих материалов известен немецкий материал «Бондаль». Максимальное значение коэффициента потерь этого материала $\eta_{\max} = 0,5$ при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ [4].

Для расширения температурного диапазона эффективной работы вибропоглощающего слоеного материала вместо клейкой и мягкой пластмассы в качестве вязкоупругого слоя применяют стеклоткань, присоединенную к металлическим листам с помощью эпоксидного клея [5]. Такая конструкция имеет низкое значение коэффициента потерь, но её эффективность практически не зависит от температуры.

Известен [6] слоеный вибропоглощающий материал из двух стальных листов с термопластовой прослойкой, соединенных механическим путем либо точечной сваркой. Этот материал имеет низкий коэффициент потерь.

В работе [7] приводятся сведения о слоистом вибропоглощающем материале, состоящем из двух листов алюминиево-магниевого сплава, склеенных друг с другом слоем мастики на основе хлоропренового каучука. Коэффициент потерь такой конструкции не превышал 0,4. Температурный диапазон эффективной работы находился в пределах от -10°C до $+30^{\circ}\text{C}$. Кроме того, процесс изготовления таких материалов занимает много времени. Мастика готовится растворением каучука. Растворителем служит смесь этилацетата и бензина (1:1). Полученная мастика наносится на металлические поверхности и выдерживается до «отлипа». Затем металлические листы складываются друг с другом клеящими поверхностями и помещаются под пресс для получения нужной толщины промежуточного слоя.

Известны слоеные материалы [17], состоящие из алюминиевой фольги, скрепленной композицией на основе полиэфирной смолы, катализатора, наполнителей и изоцианата. Эти материалы также имеют недостаточный коэффициент потерь и коэффициент звукоизоляции не превышает 0,61.

В ВИАМ проводятся исследования в области разработки слоистых вибропоглощающих материалов [11, 15, 18]. К ним относится вибропоглощающий алюмотер-

моэластопласт, представляющий собой «сэндвич», состоящий из двух наружных листов алюминиевого сплава и внутреннего слоя термоэластопласта, который предназначен для изготовления демпфирующих шайб и прокладок для крепления панелей интерьера и бортовой электронной аппаратуры с целью снижения вибрации и шума в салоне и кабине пассажирских самолетов.

Существующие слоеные вибропоглощающие материалы имеют узкий температурный диапазон работы, сложную технологию изготовления и низкий коэффициент потерь.

Современной промышленности необходимы слоеные вибропоглощающие материалы, эффективные в температурном интервале от -70°C до $+100^{\circ}\text{C}$, обладающие маслостойкостью и относительной негорючестью [12, 16].

Коэффициент потерь слоеного вибропоглощающего материала вычисляется по следующей формуле [2]:

$$\eta = \frac{2\eta_2 g \gamma}{1 + 2g(2 + \gamma) + 4g^2(1 + \gamma)}, \quad (1)$$

где η_2 – коэффициент потерь вязкоупругого материала; $g = \frac{G_2}{E_1 h_1 h_2 k_u^2}$ – сдвиговой параметр; G_2 – модуль сдвига вязкоупругого материала; h_1, h_2 – толщина металлических и вязкоупругого слоев; E_1 – модуль Юнга металлических пластин; k_u – волновое число изгибных колебаний конструкции; $\gamma = 3(\alpha_2 + 1)^2$ – геометрический параметр; $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$.

Приведенная формула справедлива при условии $E_1 h_1 \gg E_2 h_2$.

Таким образом, актуальной проблемой является прежде всего создание вязкоупругого слоя, обладающего высокими внутренними потерями, высокой адгезией, маслостойкостью и широким температурным интервалом эффективной работы.

В связи с этим представляется перспективным получение слоистых материалов с применением в качестве вязкоупругого слоя мастики на основе бутилкаучука и битума [11, 8]. Достоинством такой мастики является высокая адгезия к металлическим поверхностям (прочность связи с металлом при отслаивании 650 Н/м), широкий температурный диапазон работы (от «минус» 40°C до «плюс» 80°C) и высокий коэффициент потерь.

Задачи проводимого исследования:

- 1) изучить влияние соотношения толщин металлических листов и вязкоупругого слоя на демпфирующие свойства слоеной конструкции;
- 2) установить зависимость вибропоглощающих свойств слоеной конструкции от частоты колебаний.

Экспериментальная часть

Для решения поставленных задач в качестве объекта исследования были изготовлены слоистые материалы из стальных листов толщиной 0,55 мм, шириной 20 мм и длиной 240 мм. Толщина вязкоупругой прослойки изменялась от 0,55 до 2,75 мм. Вязкоупругий слой – это смесь двух материалов (бутилкаучук БК-1675Н ТУ2294–034–05766801–2002 и битум БН 90/10 ГОСТ 6617-76), пластифицированная индустриальным маслом И-20А ГОСТ 20799-88. Коэффициент потерь материала определяли резонансным методом по ГОСТ 19873-74 на установке Briel & Kjaer 08-13-10.

Результаты и их обсуждение

Как показали теоретические исследования, вибропоглощающие свойства слоеных материалов зависят от демпфирующих свойств вязкого слоя и соотношения толщин слоев. В связи с этим проведены экспериментальные исследования влияния демпфирующих свойств вязкого слоя и соотношения толщин слоев на вибропоглощающие свойства слоеного материала. Результаты исследований приведены на рис. 2. Как видно из рис. 2, с увеличением коэффициента потерь вязкого слоя пропорционально возрастают демпфирующие свойства слоеного материала. Большое влияние на демп-

фирующие свойства слоеного материала оказывает соотношение толщин слоев (см. рис. 2). Увеличение соотношения толщин слоев $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$ приводит к увеличению демпфирующих свойств слоеного материала. Максимального значения демпфирующие свойства слоеного материала достигают при соотношении толщин $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1} = 4$.

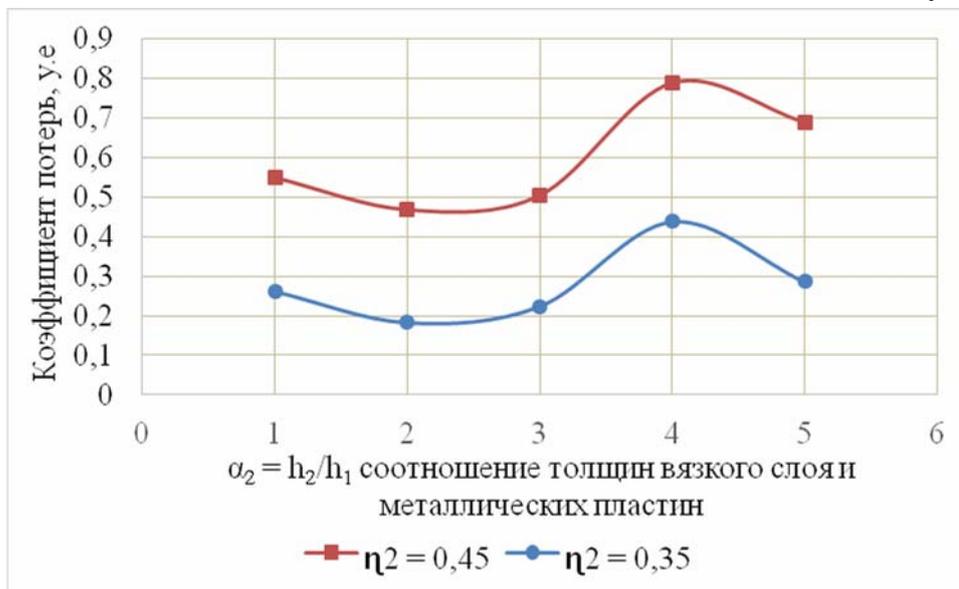


Рис. 2. Влияние соотношения толщин слоев на вибропоглощающие свойства слоеных материалов при: $\eta_2 = 0,45$, $\eta_2 = 0,35$

При этом коэффициент потерь слоеного материала увеличивается при $\eta_2 = 0,35$ в 1,8 раза, а при $\eta_2 = 0,45$ в 1,5 раза.

Демпфирующие свойства слоеного материала зависят от частоты колебаний. Проведены исследования влияния частоты колебаний на образцы с соотношением толщин слоев $\alpha_2 = 4$. Результаты исследований приведены на рис. 3.

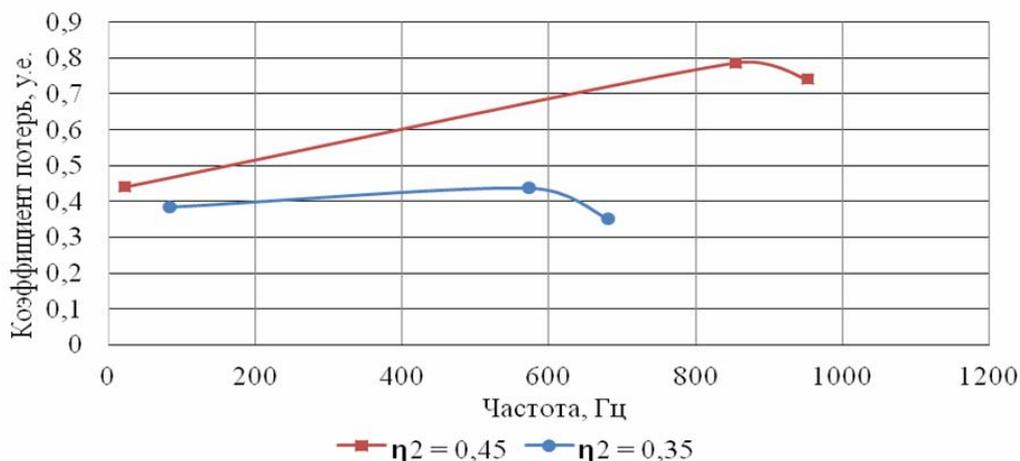


Рис. 3. Влияние частоты колебаний на вибропоглощающие свойства слоеных материалов $\alpha_2 = 4$ при: $\eta_2 = 0,45$, $\eta_2 = 0,35$

У слоеных образцов, имеющих коэффициент потерь вязкого слоя $\eta_2 = 0,35$, максимальное демпфирование наблюдается на частоте 573 Гц, а у образцов с $\eta_2 = 0,45$ — на частоте 854 Гц (см. рис. 3). Таким образом, применение вязкого слоя с более

высоким коэффициентом потерь смещает пик демпфирования в область более высоких частот.

Выводы

1. Установлено, что на демпфирующие свойства слоеного материала оказывают влияние демпфирующие свойства вязкого слоя. Увеличение коэффициента потерь вязкого слоя приводит к пропорциональному увеличению коэффициента потерь слоеного материала.

2. Показано, что с увеличением соотношения толщин слоев материала $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$

возрастают демпфирующие свойства, которые достигают максимального значения при $\alpha_2 = 4$.

3. Демпфирующие свойства слоеного материала зависят от частоты колебаний. Повышение коэффициента потерь вязкого слоя приводит к смещению демпфирующих свойств в область высоких частот.

Список литературы

1. Гуляев, В.А. Конструкционные слоеные материалы с высокими потерями / В.А. Гуляев, Н.И. Наумкина, М.И. Палей. – М.: Наука, 1973. – С. 212–218.
2. Никифоров, А.С. Вибропоглощение на судах / А.С. Никифоров. – Л.: Судостроение, 1979. – 184 с.
3. Нашиф, А. Демпфирование колебаний: пер. с англ. / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. Хендерсон. – М.: Мир, 1988. – 448 с.
4. Koch, P. Konstruktionshinweise und Verarbeitungsrichtlinien vongedampften verbundllechen / P. Koch // Schiff und Hafen. – 1971. – Iss. 23, №4. – P. 291–292.
5. Эффрусси, М.И. Вибродемпфирующий слоеный материал: а.с. № 261829 МнКФ16f / М.И. Эффрусси // Бюллетень изобретений. – 1970. – №5. – С. 125.
6. Verbunwerkstoffe für die Schalldämpfung // Jnd. – Anz. – 1975. – Iss. 97, №101. – P. 2127–2129.
7. Авилова, Г.М. Низкотемпературная вибропоглощающая конструкция / Г.М. Авилова, Н.И. Наумкина, Б.Д. Тартаковский // Колебания, излучение и демпфирование упругих структур. – М.: Наука, 1973. – С. 219–222.
8. Черкасов, В.Д. Битумно-каучуковое вяжущее для эффективных вибропоглощающих покрытий / В.Д. Черкасов, Ю. В. Юркин, В.В. Авдонин // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 8 (43). – С. 7–13.
9. Пат. 2043377 Российская Федерация, МПК6 C09D131/04, C09D131/04, C09D113:00, C09D161:24. Вибропоглощающая мастика / Бочарова Е.Г., Михеев А.О., Дувакина Н.И. [и др.]; заявитель и патентообладатель Институт проблем машиноведения РАН–№ 5048321/05; заявл. 03.06.92; опубл. 10.09.95.
10. Пат. 2375398 Российская Федерация, МПК C09D131/04. Вибропоглощающая мастика / Родионов А.Г., Волков В.Н., Капцан А.С.; заявитель и патентообладатель Родионов А.Г., Волков В.Н., Капцан А.С. – № 2007148964/04; заявл. 25.12.2007; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34. – 14 с.
11. Муромцев, Д.Н. Оценка вибродемпфирующих свойств мастики на основе этиленпропиленового каучука / Д.Н. Муромцев, С.Я. Пичхидзе // Вестник СГТУ. – 2013. – № 2 (70). – Вып. 1. – С. 114–118.
12. Сытый, Ю.В. Вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов / Ю.В. Сытый, В.А. Сагомонова, В.И. Кислякова, В.А. Большаков // Труды ВИАМ. – 2013. – №3. – URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/19.pdf>, свободный.
13. Сагомонова, В.А. Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь / В.А. Сагомонова, В.И. Кислякова, Т.Ю. Тюменева, В.А. Большакова // Труды ВИАМ. – 2015. – №10–10. – URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/878.pdf>, свободный.

14. Мякин, С.В. Повышение вибропоглощающих свойств композитов на основе поливилацетата и графита электронно-лучевой обработкой наполнителя / С.В. Мякин, М.М. Сычев, Н.Б. Шейко [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – Т. 17. – № 4. – С. 470–478.
15. Платонов, М.М. Акустические полимерные материалы нового поколения (обзор) / М.М. Платонов, Е.М. Шульдешов, Т.А. Нестерова, В.А. Сагомонова // Труды ВИАМ. – 2016. – № 4 (40). – URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/949.pdf>, свободный.
16. Сагомонова, В.А. Основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения / В.А. Сагомонова, Ю.В. Сытый // Труды ВИАМ. – 2013. – № 11. – URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/452.pdf>, свободный.
17. Соколова, Ю.А. Многослойные полимерные композиционные материалы с повышенными виброзвукопоглощающими свойствами в строительстве / Ю.А. Соколова, Д.Е. Жарин, А.Ф. Гумеров // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. – Сер.: Стр-во и архит, 2013. – Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. – С. 168–173.
18. Сытый, Ю.В. Новые вибропоглощающие материалы / Ю.В. Сытый, В.А. Сагомонова, В.И. Кислякова, В.А. Большаков // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 2. – С. 51–54.
19. Butaud, P. Sandwich structures with tunable damping properties / P. Butaud, E. Foltete, M. Ouisse // On the use of Shape Memory Polymer as viscoelastic core Composite Structures. – 2016. – Vol. 153. – P. 401–408.

References

1. Gulyaev, V.A. Structural layered materials with high losses / V.A. Gulyaev, N.I. Naumkina, M.I. Paley. – M.: Nauka, 1973. – P. 212–218.
2. Nikiforov, A.S. Vibration absorption on ships / A.S. Nikiforov. – L.: Shipbuilding, 1979. – 184 p.
3. Nashif, A. Damping oscillations: TRANS. from English / A. Nashif, D. Jones, J. Henderson. – M.: Mir, 1988. – 448 p.
4. Koch, P. Konstruktionshinweise und Verarbeitungsrichtlinien vongedampften verbundllechen / P. Koch // Schiff und Hafen. – 1971. – Iss. 23, №4. – P. 291–292.
5. Effrusi, M.I. Vibrodamping puff material: Auth. certificate No. 261829 MnKF16f / M.I. Effrusi // Bulletin of inventions. – 1970. – No. 5. – P. 125.
6. Verbunwerkstoffe fur die Schalldampfung // Jnd. – Anz. – 1975. – Iss. 97, №101. – P. 2127–2129.
7. Avilova, G.M. Low-temperature vibration-absorbing design / G.M. Avilova, N.I. Naumkina, B.D. Tartakovsky // Oscillations, study and damping of elastic structures. – M.: Nauka, 1973. – P. 219–222.
8. Cherkasov, V.D. Bituminous-rubber binder for effective vibration-absorbing coatings / V.D. Cherkasov, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin // Journal of Civil Engineering. – 2013. – No. 8 (43). – P. 7–13.
9. Pat. 2043377 Russian Federation, IPC6 C09D131 / 04, C09D131 / 04, C09D113: 00, C09D161: 24. Vibration-absorbing mastic / Bocharova E.G., Mikheev A.O., Duvakina N.I., [and all.]; Applicant and Patent Holder Institute for Problems in Engineering Science RAS No. 5048321/05; declared 06/03/92; publ. 09/10/95.
10. Pat. 2375398 Russian Federation, IPC C09D131 / 04. Vibro-absorbing mastic / Rodionov A.G., Volkov V.N., Kaptan A.S; Applicant and patent holder A.G. Rodionov, V.N. Volkov, A.S. Kaptan – No. 2007148964/04; declared 12/25/2007; publ. 12/10/2009, bull. No. 34. – 14 p.
11. Muromtsev, D.N. Assessment of vibration-damping properties of mastic based on ethylene-propylene rubber / D.N. Muromtsev, S.Ya. Pichkhidze // Bulletin of SSTU. – 2013. – No. 2 (70). – Iss. 1. – P. 114–118.

12. Well-fed, Yu. V. Vibration-absorbing materials based on thermoplastic elastomers / Yu.V. Well-fed, V.A. Sagomonova, V.I. Kislyakova, V.A. Bolshakov // VIAM Works. – 2013. – No. 3. – URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/19.pdf>, free.
13. Sagomonova, V. A. Influence of the composition of vibration-absorbing materials on the coefficient of mechanical losses / V.A. Samogonova, V.I. Kislyakova, T.Yu. Tyumeneva, V.A. Bolshakova // VIAM Works. – 2015. – No. 10–10. – URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/878.pdf>, free.
14. Myakin, S.V. Improving the vibration-absorbing properties of composites based on polyvyl acetate and graphite by electron-beam processing of the filler / S.V. Myakin, M.M. Sychev, N.B. Sheiko and others // Condensed media and interphase boundaries. – 2013. – Vol. 17, No. 4. – P. 470 – 478.
15. Platonov, M.M. Acoustic polymer materials of a new generation (review) / M.M. Platonov, E.M. Shuldeshov, T.A. Nesterova, V.A. Sagomonova // Transactions of VIAM. – 2016. – No. 4 (40). – URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/949.pdf>, free.
16. Sagomonova, V.A. Fundamental principles for the creation of vibration-absorbing materials for aviation purposes / V.A. Samogonova, Yu.V. Satyky // VIAM Works. – 2013. – No. 11. – URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/452.pdf>, free.
17. Sokolova, Yu.A. Multilayer polymer composite materials with enhanced vibration and sound absorption properties in construction / Yu.A. Sokolova, D.E. Zharin, A.F. Gumerov // Bulletin of the Volgogr. state architect-build, un-that. – Ser.: Building and architects. – 2013. – Iss. 31 (50). Part 2. Building sciences. – P. 168–173.
18. Fed, S.Yu. New vibration-absorbing materials / Yu.V. Sytiy, V.A. Sagomonova, V.I. Kislyakova, V.A. Bolshakov // Aviation materials and technologies. – 2012. – No. 2. – P. 51–54.
19. Butaud, P. Sandwich structures with tunable damping properties / P. Butaud, E. Foltete, M. Ouisse // On the use of Shape Memory Polymer as viscoelastic core Composite Structures. – 2016. – Vol. 153. – P. 401–408.

УДК 691.175.2

*Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева*

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

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

Вятский государственный университет

Россия, 610000, г. Киров,
ул. Московская, д. 36,
тел.: (8332) 74-25-65; (8332) 74-27-15

Волоцкой Алексей Николаевич,
ассистент кафедры «Строительные
конструкции и машины»
E-mail: alexeyqwerty@mail.ru

Юркин Юрий Викторович,
кандидат технических наук,
зав. кафедрой «Строительные конструкции
и машины»
E-mail: yurkin@vyatsu.ru

Авдонин Валерий Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Строительные
конструкции и машины»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

*Mordovian State University
named after N.P. Ogarev*

Russia, 430005, Saransk, 68,
Bolshevistskaya St.

Cherkasov Vasily Dmitrievich,
Doctor of Science, Professor,
Head of the department «Applied mechanics»
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Vyatka State University

Russia, 610000, Kirov, 36, Moskovskaya St.,
tel.: (8332) 74-25-65; (8332) 74-27-15

Volotskoy Alexey Nikolaevich,
Assistant of the department «Building
Structures and Machines»
E-mail: alexeyqwerty@mail.ru

Yurkin Yuriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Head of the
department «Building Structures and
Machines»
E-mail: yurkin@vyatsu.ru

Avdonin Valeriy Viktorovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Building Structures and
Machines»
E-mail: avdoninvalerii@bk.ru

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА*

В.Д. Черкасов, А.Н. Волоцкой, Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин

Благодаря установленным экспериментальным зависимостям определен тип наполнителя, расширяющий температурный участок эффективного вибропоглощения и повышающий жесткость композитов на основе этиленвинилацетата. Проведен анализ влияния полярного наполнителя на динамические свойства неполярных и полярных полимеров.

Ключевые слова: этиленвинилацетат, мел, технический углерод, динамические свойства, наполнитель

THE INFLUENCE OF FILLERS POLARITY ON DYNAMIC PROPERTIES OF DAMPING POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON ETHYLENE-VINYL ACETATE

V.D. Cherkasov, A.N. Volotskoy, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin

Due to the established experimental dependencies the authors have determined the type of filler, expanding the temperature range of effective damping and increasing the stiffness of composites based on ethylene-vinyl acetate. The influence of the polar filler on the dynamic properties of non-polar and polar polymers is analyzed.

Keywords: ethylene-vinyl acetate, calcium carbonate, carbon black, dynamic properties, filler

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации (МК-1960.2018.8, Соглашение № 075-15-2019-516 от 15 ноября 2018 г.).

Введение

Вибрация зачастую приводит к нежелательным последствиям, таким, как неприятный звук, динамические напряжения, которые, в свою очередь, вызывают усталость и разрушение конструкции, снижают надежность и прочностные характеристики [1, 2]. Наиболее эффективными материалами, снижающими вибрацию в конструкциях, являются полимерные композиционные материалы. Наивысшие демпфирующие свойства у таких материалов проявляются при температурах, при которых полимер, из которого состоит композит, находится вблизи температуры стеклования [3, 4]. В пределах данной температуры у полимеров ярко выражена диссипация механической энергии в тепло из-за наступления координированного движения молекулярных цепей [5, 6]. Эффективность полимерных композиционных материалов, поглощающих энергию колебаний, по сравнению с другими типами композиционных материалов (керамические, металлические и т.д.) обусловлена тем, что у полимеров наблюдается более широкая переходная область от высокоэластичного состояния к стеклообразному, в которой наблюдаются максимальные механические потери. Этот интервал температур определяет диапазон наиболее эффективного применения вибропоглощающих полимерных композиционных материалов. Однако высокомолекулярные соединения проявляют данные свойства в недостаточно широком диапазоне температур (20-30°C) вблизи их температуры стеклования (T_c). Поэтому полимеры не используются в чистом виде для производства вибропоглощающих композиционных материалов. Существует несколько методов модифицирования динамических свойств полимеров [7-9, 10]. Например, одним из таких методов является добавление различных видов наполнителей к полимерной матрице [11-13].

На динамические механические свойства наполненных композитов сильное влияние оказывает межфазное взаимодействие на границе «полимер – наполнитель». В результате такого взаимодействия образуется фаза (граничный слой), отличающаяся по свойствам от полимерной матрицы и способствующая повышению прочности композита. Выделяют два основных фактора, которые могут оказывать влияние на образование межфазного взаимодействия [14, 15]:

1) химическую реакцию между наполнителем и матрицей, например ковалентные связи, которые редко образуются спонтанно, но могут быть созданы за счет специальной обработки поверхности;

2) физическое взаимодействие – водородные связи и вторичные силы Ван-дер-Ваальса, действующие всегда между компонентами.

Полимер и наполнители имеют большие различия в физической и химической структуре. С учетом вышерассмотренных факторов можно сделать вывод, что одним из важнейших параметров, оказывающих влияние на процессы образования межфазного слоя, является полярность полимера и наполнителя. Таким образом, межфазное взаимодействие зависит как от полимера, используемого в качестве матрицы в дисперсно-наполненных композитах, так и от вида наполнителя. В вибропоглощающих полимерных композиционных материалах наполнители вводят также с целью упрочнения и удешевления композита. Среди усиливающих наполнителей самым распространенным является технический углерод, а среди удешевляющих – мел. Основное отличие мела от технического углерода заключается в том, что его поверхность более полярна и гидратирована [16].

Правильный выбор компонентов, в данном случае наполнителей, для разработки композиционных материалов является важнейшим техническим этапом. Данный выбор влияет на свойства и стоимость конечной продукции, а также на технологический процесс. В связи с этим целью работы является исследование динамических свойств в широком диапазоне температур (-70°C до +20°C) композитов на основе этиленвинилацетата (ЭВА) при добавлении наполнителей различной полярности (мел, технический углерод).

Материалы и методы исследования

В качестве полимерной основы использовались следующие материалы: этиленвинилацетат марки LG EVA ES 28005 (LG Chem, Южная Корея), содержание

винилацетатных звеньев составляет 28 %; бутилкаучук БК-1675 (БК) ТУ 2294-021-48158319-2012.

В качестве пластификатора при изготовлении экспериментальных образцов использовались: хлорпарафин ХП-470 (ХП) ТУ 2493-379-05763441-2002; масло индустриальное И-40 (МИ) ГОСТ 20799-88. Процентное содержание полимер/пластификатор по объему составляет 60/40.

В качестве наполнителей были выбраны мел и технический углерод. Степень наполнения композита оказывает существенное влияние на процессы, возникающие на границе «полимер – наполнитель». С ростом объемной доли наполнителя (v) в композите возникает бесконечный кластер из цепочек частиц наполнителя, связанных между собой через пленочные слои матрицы и образующих каркас, напоминающий пространственную сеть. При дальнейшем увеличении v каркас преобразуется в пространственную решетчатую структуру. Это преобразование происходит примерно при $v = 0,3$, поэтому композиты с дискретным наполнителем с $v = 0 \div 0,3$ называются малонаполненными, а с $v = 0,3 \div 0,7$ – высоконаполненными [17]. Первые обладают повышенной деформативностью, вторые имеют более высокие модуль упругости и соответственно прочность относительно ненаполненного полимера. Исходя из вышесказанного, были приняты следующие объемные доли наполнителя: 30 % по объему (малонаполненные композиты), 40 % и 50 % по объему (высоконаполненные композиты), где 40 % по объему – максимальная степень наполнения этиленвинилацетата техническим углеродом, 50 % по объему – максимальная степень наполнения этиленвинилацетата мелом.

Полимерные смеси изготавливали с помощью лабораторного смесителя периодического действия с тангенциальными роторами. Первоначально перемешивали полимер при температуре 120°C при числе оборотов 44 об/мин в течение 20 минут. Далее полимер совмещали с пластификатором при аналогичных параметрах смешения и добавляли наполнитель. Полученную смесь затем раскатывали на вальцах до получения материала в виде листов толщиной 2 мм.

Составы и марки исследуемых композитов приведены в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1

Составы и марки исследуемых композитов на основе этиленвинилацетата

Марка композита	Структурообразующий компонент			
	ЭВА	ХП	Мел	Технический углерод
	Содержание в процентах по объему			
Без наполнителя	60	40	-	-
Мел 30 %	42	28	30	-
Технический углерод 30 %	42	28	-	30
Мел 50 %	30	20	50	-
Технический углерод 40 %	36	24	-	40

Т а б л и ц а 2

Составы и марки исследуемых композитов на основе бутилкаучука

Марка композита	Структурообразующий компонент		
	БК	МИ	Мел
	Содержание в процентах по объему		
Мел 30 %	42	28	30
Мел 50 %	30	20	50

Для получения динамических свойств исследуемых композитов применяли динамический механический анализ (ДМА). ДМА экспериментальных образцов был вы-

полнен в соответствии с ASTM D4065-12 «Стандартная методика для пластмасс: динамико-механические свойства: определение и отчет о процедурах». Динамический модуль упругости и тангенс угла механических потерь определяли в диапазоне температур от -70°C до $+20^{\circ}\text{C}$ при частоте 1Гц.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты изменения тангенса угла механических потерь ($\text{tg}\delta$) и динамического модуля упругости (E') от температуры для различных наполненных композитов и пластифицированной смеси на основе ЭВА показаны на рис. 1-2.

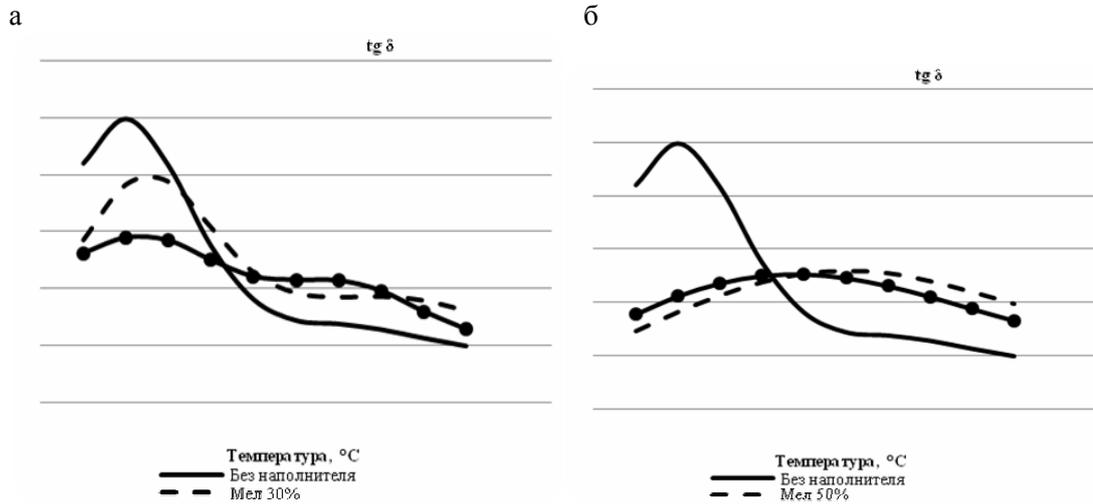


Рис. 1. Тангенс угла механических потерь композитов на основе ЭВА:
а – малонаполненных; б – высоконаполненных

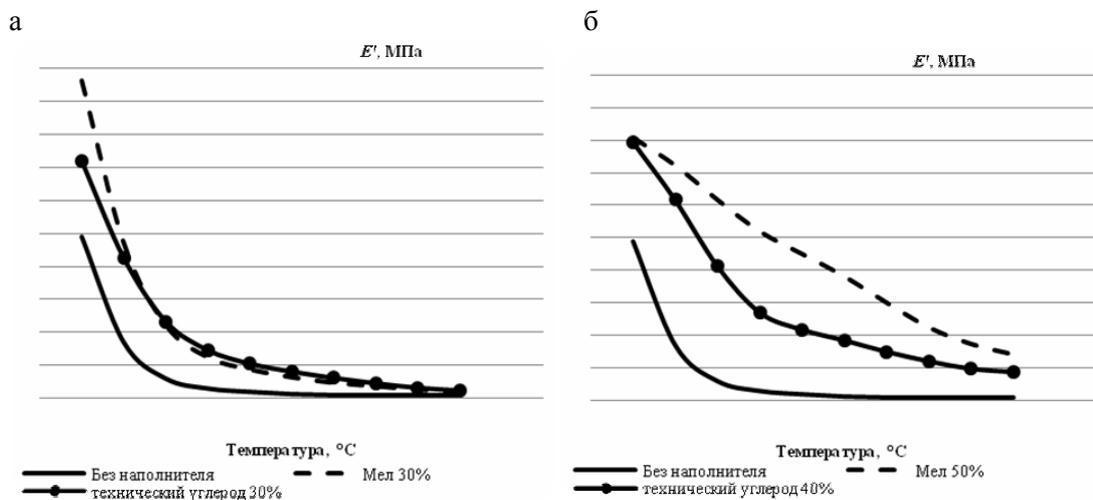


Рис. 2. Динамический модуль упругости композитов на основе ЭВА:
а – малонаполненных; б – высоконаполненных

С точки зрения полиструктурной теории композиционных материалов [17] вибропоглощающие полимерные материалы можно представить в виде трехкомпонентной модели композита, в которой большое значение на релаксационные переходы оказывает межфазный слой на границе «полимер – наполнитель» [18]. В процессе формирования такого слоя часть полимера принимает ограниченную подвижность, что приводит к смещению температуры стеклования композита в сторону положительных температур. Величина смещения температуры стеклования пропорциональна площади поверхности наполнителя и возрастает с уменьшением размеров его частиц или увеличением степени активности [19].

Из рис. 1 видно, что все наполнители закономерно смещают максимум тангенса угла механических потерь композитов на основе ЭВА в сторону положительных

температур независимо от степени наполнения. Например, при частоте 1 Гц максимум $\text{tg}\delta$ этиленвинилацетата, пластифицированного хлорпарафином, находится при температуре минус 60°C , а максимум $\text{tg}\delta$ композитов, наполненных мелом и техническим углеродом с содержанием 30 % по объему, находится при температуре минус 54°C и минус $56,5^\circ\text{C}$ соответственно (см. рис. 1,а). Кроме того, на кривой зависимости «тангенс угла механических потерь – температура» видно, что малонаполненные композиты имеют второй пик $\text{tg}\delta$ при переходе к температуре 0°C (см. рис. 1,а). Это может быть обусловлено наличием адсорбированных слоев на поверхности наполнителя [15]. При высокой степени наполнения релаксационные процессы в композите проявляются наиболее сильно. Добавление наполнителя в виде мела содержанием 50 % по объему смещает максимум тангенса угла механических потерь на 40°C относительно ненаполненного ЭВА, а добавление технического углерода содержанием 40 % по объему – на 26°C (см. рис. 1,б). Введение наполнителей приводит к снижению максимума $\text{tg}\delta$ полимерной смеси ЭВА/ХП. В малонаполненных композитах с мелом и техническим углеродом максимум $\text{tg}\delta$ составляет 0,396 и 0,29 соответственно (см. рис. 1,а). Однако при этом существенно расширяется температурный участок эффективного демпфирования за счет увеличения $\text{tg}\delta$ в области высокоэластического состояния полимера. Данное явление особенно заметно при переходе к наполнителям с их максимальным содержанием в композите, где кривая $\text{tg}\delta$ принимает более пологий вид (см. рис. 1,б). В высоконаполненных композитах с мелом и техническим углеродом максимум $\text{tg}\delta$ составляет 0,260 и 0,255 соответственно (см. рис. 1,б).

Из графиков на рис. 2,а видно, что введение любого из наполнителей приводит к повышению динамического модуля упругости (E') композита относительно ненаполненного ЭВА. В малонаполненных композитах наибольшие значения динамического модуля упругости в высокоэластической области наблюдаются при добавлении технического углерода (см. рис. 2,а). Увеличение содержания наполнителя в композите закономерно приводит к росту динамического модуля упругости, при этом наибольшие значения динамического модуля упругости имеет ЭВА, наполненный мелом (см. рис. 2,б).

По способу взаимодействия с полимерной матрицей все наполнители условно делятся на активные (усиливающие) и инертные. Технический углерод по сравнению с мелом имеет наименьший размер частиц, наибольшую удельную поверхность (см. табл. 3), и его относят к усиливающим наполнителям.

Т а б л и ц а 3

Характеристики наполнителей

Показатель		Наполнитель	
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	Источник	Технический углерод	Мел
		Метод газопроницаемости Козени и Кармана*	4,65
Средний размер частиц, мкм		0,9	2,3

*Измерения проводились Белгородским государственным технологическим университетом им. В.Г. Шухова с помощью прибора ПСХ-12. Дата проведения 11.07.2018 г.

В области максимума $\text{tg}\delta$ диссипация энергии происходит за счет молекулярного трения в полимерной матрице. Введение усиливающего наполнителя содержанием 30 % по объему приводит к значительному снижению максимума $\text{tg}\delta$ по сравнению с введением мела того же объема (см. рис. 1,а). Это объясняется тем, что $V_{\text{сл}}^2 > V_{\text{сл}}^1$ и $V_{\text{н}}^2 < V_{\text{н}}^1$ (см. рис. 3). При увеличении содержания усиливающего наполнителя и мела до 40 и 50 % по объему соответственно максимумы $\text{tg}\delta$ на кривых «Мел 50 %» и

«Технический углерод 40 %» имеют близкие значения (см. рис. 1,б). Это объясняется тем, что при максимальном наполнении композита $V_n^2 = V_n^1 = 0$ (см. рис. 3).

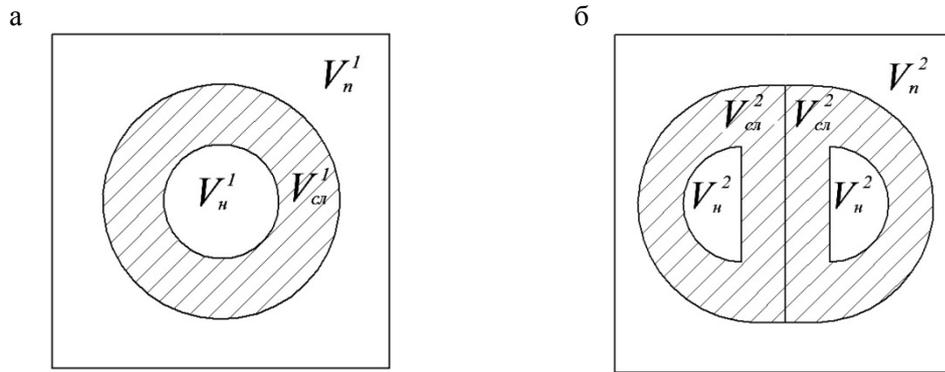


Рис. 3. Модели композитов наполненных:

а – мелом; б – техническим углеродом;

V_n^1, V_n^2 – объем наполнителя; $V_{сл}^1, V_{сл}^2$ – объем межфазного слоя;

V_n^1, V_n^2 – объем полимерной матрицы

Мел по своей структуре относится к инертным наполнителям. Однако из графика на рис. 1,б видно, что добавление мела содержанием 50 % по объему приводит к значительным смещениям температуры стеклования. Таким образом, мел при максимальной концентрации 50 % оказывает влияние на динамические свойства полимерной смеси, аналогичное влиянию технического углерода максимальной концентрацией 40 %. Этиленвинилацетат относится к полярным полимерам. В композициях с полярными фрагментами эффект полярности оказывает определяющее влияние на усиливающие свойства мела [20]. Мел относится к полярным наполнителям, и, по нашему мнению, такое поведение мела может быть обусловлено возникновением большого числа физических связей между молекулами наполнителя и полярными ацетатными группами этиленвинилацетата, что, в свою очередь, приводит к росту системы «полимер – наполнитель» и повышению вязкости композита, вызывая значительные смещения температуры стеклования и увеличение динамического модуля упругости (см. рис. 1, 2).

Для сравнения был проведен дополнительный анализ влияния мела на динамические свойства неполярных полимеров. На рис. 4 представлены результаты экспериментального исследования степени взаимодействия мела с неполярной смесью бутилкаучука с индустриальным маслом. Откуда видно, что увеличение доли наполнителя приводит к незначительному изменению динамических свойств: смещение $T_c = 8^\circ\text{C}$ (см. рис. 4,а). Это означает, что мел оказывает слабое влияние на изменение подвижности полимерных цепей. В свою очередь, увеличение доли мела в полярной системе ЭВА/ХП приводит к существенному изменению динамических свойств: смещение $T_c = 34^\circ\text{C}$ (см. рис. 1). С точки зрения теории адсорбционного взаимодействия на границе «полимер – наполнитель» возникает смачивание, которое приводит к межфазной адгезии. Прочность адгезионной связи допускается принимать пропорционально обратимой работе адгезии W_{AB} (1), которая необходима для разделения двух фаз с образованием новых поверхностей раздела [14, 21]:

$$W_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}, \quad (1)$$

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

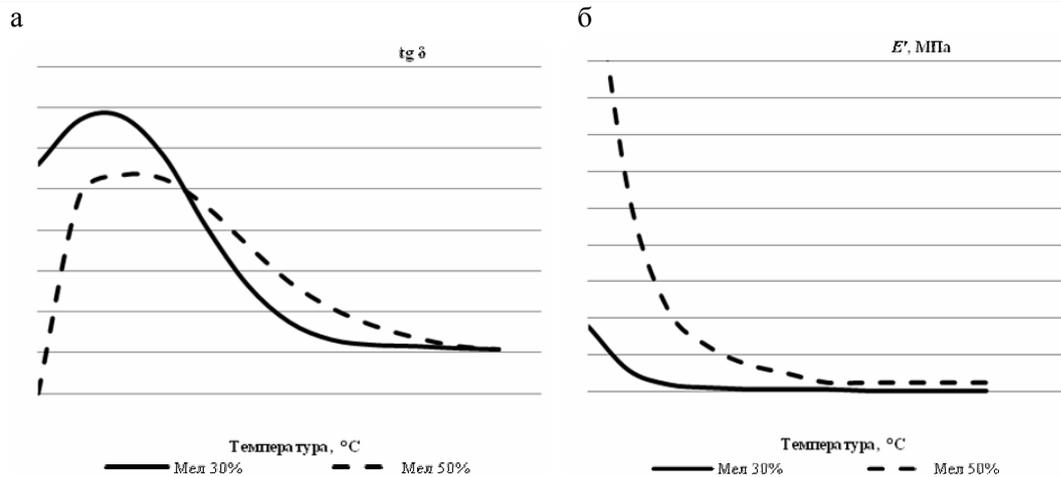


Рис. 4. Динамические свойства наполненных мелом композитов на основе бутилкаучука: а – tgδ; б – E'

Из уравнения (1) видно, что чем больше СПЭ компонентов и меньше свободная поверхностная энергия на границе раздела фаз, тем больше работа адгезии и соответственно сильнее взаимодействие «полимер – наполнитель». Данные в табл. 4 показывают различия в адгезии между полярными и неполярными полимерами по отношению к поверхности полярного наполнителя.

Т а б л и ц а 4

Свободная поверхностная энергия компонентов [22-24]

Параметр	Компонент		
	Этиленви- ниацетат	Бутил- каучук	Мел
Составляющая Лифшица – Ван-дер-Ваальса γ^{LW} , мДж/м ²	37	≈18,79	≈48
Мера поверхностной основности γ^- , мДж/м ²	8,8	0	≈79
Мера поверхностной кислотности γ^+ , мДж/м ²	0	0	0
Свободная поверхностная энергия γ , мДж/м ²	37	≈18,79	≈48

Свободная поверхностная энергия любого материала включает в себя три компонента [23, 25]:

- 1) неполярный компонент: γ^{LW} – составляющая Лифшица – Ван-дер-Ваальса;
- 2) два полярных компонента: γ^- – мера поверхностной основности, γ^+ – мера поверхностной кислотности.

Согласно методу ван Осса-Чодери-Гуда работа адгезии между двумя компонентами (А и В) может быть определена по формуле [23, 25]

$$W_{AB} = 2 \left(\sqrt{\gamma_A^{LW} \cdot \gamma_B^{LW}} + \sqrt{\gamma_A^+ \cdot \gamma_B^-} + \sqrt{\gamma_A^- \cdot \gamma_B^+} \right) \quad (2)$$

Таким образом, работа адгезии между ЭВА и мелом без учета влияния пластификатора составит:

$$\begin{aligned} W_{AB} &= 2 \left(\sqrt{\gamma_{\text{эва}}^{LW} \cdot \gamma_{\text{мел}}^{LW}} + \sqrt{\gamma_{\text{эва}}^+ \cdot \gamma_{\text{мел}}^-} + \sqrt{\gamma_{\text{эва}}^- \cdot \gamma_{\text{мел}}^+} \right) = \\ &= 2 \left(\sqrt{37 \cdot 48} + \sqrt{0 \cdot 79} + \sqrt{8,8 \cdot 0} \right) = 84,285 \text{ мДж/м}^2. \end{aligned}$$

Работа адгезии между БК и мелом без учета влияния пластификатора составит:

$$\begin{aligned} W_{AB} &= 2 \left(\sqrt{\gamma_{\text{БК}}^{LW} \cdot \gamma_{\text{мел}}^{LW}} + \sqrt{\gamma_{\text{БК}}^+ \cdot \gamma_{\text{мел}}^-} + \sqrt{\gamma_{\text{БК}}^- \cdot \gamma_{\text{мел}}^+} \right) = \\ &= 2 \left(\sqrt{18 \cdot 48} + \sqrt{0 \cdot 79} + \sqrt{0 \cdot 0} \right) = 58,789 \text{ мДж/м}^2. \end{aligned}$$

Информация в табл. 4 и результаты динамического анализа композитов, наполненных мелом, свидетельствуют о том, что мел плохо смачивается и взаимодействует с неполярными каучуками, такими, как бутилкаучук. В полярной системе ЭВА/ХП введение мела оказывает значительное влияние на увеличение динамического модуля упругости по сравнению с неполярной системой БК/МИ (см. рис. 2, 4,б). Таким образом, чем полярнее матрица, тем сильнее происходит взаимодействие с мелом, что приводит к существенным смещениям температуры стеклования полимерной смеси на основе ЭВА и увеличению динамического модуля упругости.

Выявленные закономерности позволяют сделать заключение, что предпочтительно с точки зрения расширения температурной области эффективного демпфирования и удешевления материала использовать в качестве наполнителя мел содержанием 50 % по объему, так как он легко диспергируется в полярном этиленвинилацетате и способствует увеличению динамического модуля упругости композита.

Заключение

Установлены экспериментальные зависимости тангенса угла механических потерь и модуля упругости в зависимости от типа и полярности наполнителя для полимерных композитов на основе ЭВА, что дает возможность выбрать наполнитель для этиленвинилацетата исходя из эксплуатационных и других требований, предъявляемых к вибропоглощающему материалу.

Показано, что введение любого из рассмотренных наполнителей приводит к расширению температурного участка эффективного демпфирования за счет увеличения тангенса угла механических потерь в высокоэластическом состоянии полимерной смеси на основе ЭВА. Композиты на основе ЭВА с добавлением мела содержанием 50 % по объему имеют самые большие значения динамического модуля упругости.

Обнаружено, что добавление мела максимальным содержанием 50 % по объему к полярной системе ЭВА/ХП оказывает аналогичное влияние на динамические свойства, что и добавление технического углерода максимальным содержанием 40 % по объему.

Установлено, мел лучше диспергируется в полярной системе и тем самым способствует повышению прочностных характеристик композитов.

Установлено, что для разработки вибропоглощающих полимерных материалов на основе ЭВА, эффективных в широком диапазоне температур, предпочтительно использовать в качестве наполнителя мел содержанием 50 % по объему. У таких композитов наиболее сильно выражено адгезионное взаимодействие между наполнителем и полимером. Кроме того, данный наполнитель оказывает существенное влияние на изменение динамического модуля упругости и имеет низкую стоимость по сравнению с техническим углеродом.

Полученные зависимости могут быть использованы в качестве исходных данных для аналитического прогнозирования динамических механических свойств полимерных композиционных материалов, а также для разработки вибропоглощающих полимерных композиционных материалов на основе ЭВА, эффективных в широком диапазоне температур.

Список литературы

1. Wu, C.Y. Dynamic mechanical properties of acrylic rubber blended with phenolic resin / C.Y. Wu, C.Y. Wei, W.H. Guo, C.F. Wu // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 109, № 4. – P. 2065–2070.
2. Ratna, D. Novel epoxy compositions for vibration damping applications / D. Ratna, N.R. Manoj, L. Chandrasekhar, B. C. Chakraborty // *Polymers for advanced Technologies*. – 2004. – Vol. 15, № 10. – P. 583–586.
3. Shi, X.Y. Study on the damping of EVM based blends / X.Y. Shi, W.N. Bi, S.G. Zhao // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2011. – Vol. 120, № 2. – P. 1121–1125.
4. Shih, H.H. Peel adhesion and viscoelasticity of poly(ethylene-co-vinyl acetate)-based hot melt adhesives. I. The effect of tackifier compatibility / H.H. Shih, G.R. Hamed // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1997. – Vol. 63, № 3. – P. 323–331.

5. Shi, X.Y. Damping properties of blends based on EVM / X.Y. Shi, W.N. Bi, S.G. Zhao // *Journal of Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – 2011. – Vol. 50, № 10. – P. 1928–1938.
6. Shi, X. Effects of fillers on the damping property of ethylene vinyl-acetate/polylactic acid blends / X.Shi, L. Jia, Y. Ma, C. Li // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 4, № 2. – P. 89–96.
7. Su, C. Effects of chemical structure of phenolic resin on damping properties of acrylate rubber-based blends / C. Su, C. Zhao, L. Xu, C.Zhang // *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – 2015. – Vol. 54, № 2. – P. 177–189.
8. He, X.Z. Damping properties of ethylene-vinyl acetate rubber/polylactic acid blends / X.Z. He, M. Qu, X.Y. Shi // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 4, № 3. – P. 15–22.
9. Xiang, P. The structure and dynamic properties of nitrile-butadiene rubber/poly(vinyl chloride)/hindered phenol crosslinked composites / P.Xiang, X.Y. Zhao, D.L. Xiao, Y.L. Lu, L.Q. Zhang // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 109, № 1. – P. 106–114.
10. Wang, Y. Mechanical, dynamic mechanical and electrical properties of conductive carbon black/piezoelectric ceramic/chlorobutyl rubber composites / Y. Wang, H. Yan, Z. Huang, T. Zhang // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2012. – Vol. 51, № 1. – P. 105–110.
11. Zhang, R. Effect of some inorganic particles on the softening dispersion of the dynamics of butyl rubber / R. Zhang, X. He, Z. Lai // *Polymer Bulletin*. – 2017. – Vol. 74, № 4. – P. 1031–1043.
12. Valentova, H. Dynamic mechanical and dielectric properties of ethylene vinyl acetate/carbon nanotube composites / H. Valentova, M. Ilcikova, K. Czanikova, Z. Spitalsk, M. Slouf, J. Nedbal, M. Omastova // *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – 2014. – Vol. 53, № 3. – P. 496–512.
13. Ma, J. H. Characterization of filler-rubber interaction, filler network structure and their effects on viscoelasticity for styrene-butadiene rubber filled with different fillers / J.H. Ma, L.Q. Zhang, Y.P. Wu // *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – 2013. – Vol. 52, № 8. – P. 1128–1141.
14. Rotheron, R. Fillers for polymer application / R. Rotheron. – Switzerland: Springer, 2017. – 489 p.
15. Wypych, G. Handbook of fillers. Fourth edition / G. Wypych. – Toronto: ChemTec Publishing, 2016. – 922 p.
16. Surya, I. Effect of epoxidised natural rubbers on calcium carbonate-filled natural rubber compounds. / I. Surya, S. Maulina, H. Ismail // *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. – 2018. – Vol 22, № 6. – P. 1014–1022.
17. Соломатов, В.И. Полимерные композиционные материалы в строительстве / В.И. Соломатов, А. Н. Бобрышев, К.Г. Химмлер. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.
18. Черкасов, В.Д. Прогнозирование демпфирующих свойств композита с учетом температурной зависимости свойств полимера / В.Д. Черкасов, Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин // *Вестник ТГАСУ*. – 2012. – №. 4. – С. 216–225.
19. Нильсен, Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсен. – М.: Химия, 1978. – 301 с.
20. Перова, М.С. Зависимость свойств неотверждаемых герметиков на основе бутилкаучука, наполненных мелом, от природы термопласта / М.С. Перова, Л.Р. Галимова, Ю.Н. Хакимуллин // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – №. 6. – С. 230–235.
21. Żenkiewicz, M. Methods for the calculation of surface free energy of solids / M. Żenkiewicz // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2007. – Vol. 24, № 1. – P. 137–145.
22. Ucar, I.O. Combined XPS and contact angle studies of ethylene vinyl acetate and polyvinyl acetate blends / I.O. Ucar, M.D. Doganci, C.E. Cansoy, H.Y. Erbil, I. Avramova, S. Suzer // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, № 22. – P. 9587–9594.

23. Al-Assi, M. Evaluation of adhesion and hysteresis friction of rubber–pavement system / M. Al-Assi, E. Kassem // *Applied Sciences*. – 2017. – Vol, 7. № 10. – P. 1–13.
24. Holysz, L. Surface free energy components of calcium carbonate and their changes due to radiofrequency electric field treatment / L. Holysz, E. Chibowski // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1994. – Vol. 164, № 1. – P. 245–251.
25. Старостина, И.А. Оценка кислотного и основного параметров свободной поверхностной энергии с помощью полимерных поверхностей / И.А. Старостина, Н.В. Махрова, О.В. Стоянов, И.В. Аристов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2011. – № 14. – С. 150–157.

References

1. Wu, C.Y. Dynamic mechanical properties of acrylic rubber blended with phenolic resin / C.Y. Wu, C.Y. Wei, W.H. Guo, C.F. Wu // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 109, № 4. – P. 2065–2070.
2. Ratna, D. Novel epoxy compositions for vibration damping applications / D. Ratna, N.R. Manoj, L. Chandrasekhar, B. C. Chakraborty // *Polymers for advanced Technologies*. – 2004. – Vol. 15, № 10. – P. 583–586.
3. Shi, X. Y. Study on the damping of EVM based blends / X. Y. Shi, W.N. Bi, G. Zhao // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2011. – Vol. 120, № 2. – P. 1121–1125.
4. Shih, H. H. Peel adhesion and viscoelasticity of poly(ethylene-co-vinyl acetate)-based hot melt adhesives. I. The effect of tackifier compatibility / H. H. Shih, G. R. Hamed // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1997. – Vol. 63, № 3. – P. 323–331.
5. Shi, X.Y. Damping properties of blends based on EVM / X.Y. Shi, W.N. Bi, S.G. Zhao // *Journal of Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – 2011. – Vol. 50, № 10. – P. 1928–1938.
6. Shi, X. Effects of fillers on the damping property of ethylene vinyl-acetate/polylactic acid blends / X. Shi, L. Jia, Y. Ma, C. Li // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 4, № 2. – P. 89–96.
7. Su, C. Effects of chemical structure of phenolic resin on damping properties of acrylate rubber-based blends / C. Su, C. Zhao, L. Xu, C. Zhang // *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – 2015. – Vol. 54, № 2. – P. 177–189.
8. He, X.Z. Damping properties of ethylene-vinyl acetate rubber/polylactic acid blends / X.Z. He, M. Qu, X.Y. Shi // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 4, № 3. – P. 15–22.
9. Xiang, P. The structure and dynamic properties of nitrile-butadiene rubber/poly(vinyl chloride)/hindered phenol crosslinked composites / P. Xiang, X.Y. Zhao, D.L. Xiao, Y.L. Lu, L.Q. Zhang // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2008. – Vol. 109, № 1. – P. 106–114.
10. Wang, Y. Mechanical, dynamic mechanical and electrical properties of conductive carbon black/piezoelectric ceramic/chlorobutyl rubber composites / Y. Wang, H. Yan, Z. Huang, T. Zhang // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2012. – Vol. 51, № 1. – P. 105–110.
11. Zhang, R. Effect of some inorganic particles on the softening dispersion of the dynamics of butyl rubber / R. Zhang, X. He, Z. Lai // *Polymer Bulletin*. – 2017. – Vol. 74, № 4. – P. 1031–1043.
12. Valentova, H. Dynamic mechanical and dielectric properties of ethylene vinyl acetate/carbon nanotube composites / H. Valentova, M. Ilcikova, K. Czanikova, Z. Spitalsk, M. Slouf, J. Nedbal, M. Omastova // *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – 2014. – Vol. 53, № 3. – P. 496–512.
13. Ma, J. H. Characterization of filler-rubber interaction, filler network structure and their effects on viscoelasticity for styrene-butadiene rubber filled with different fillers / J.H. Ma, L.Q. Zhang, Y.P. Wu // *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. – 2013. – Vol. 52, № 8. – P. 1128–1141.
14. Rothon, R. Fillers for polymer application / R. Rothon. – Switzerland: Springer, 2017. – 489 p.

15. Wypych, G. Handbook of fillers. Fourth edition / G. Wypych. – Toronto: ChemTec Publishing, 2016. – 922 p.
16. Surya, I. Effect of epoxidised natural rubbers on calcium carbonate-filled natural rubber compounds. / I. Surya, S. Maulina, H. Ismail // Malaysian Journal of Analytical Sciences. – 2018. – Vol 22, № 6. – P. 1014–1022.
17. Solomatov, V.I. Polymeric composites in building / V.I. Solomatov, A.N. Bobryshev, K.G. Khimmler. – M.: Stroyizdat, 1988. – 312 p.
18. Cherkasov, V.D. Prediction of the damping properties of a composite taking into account the temperature dependence of the properties of the polymer / V.D. Cherkasov, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin // Bulletin of TGASU. – 2012. – №. 4. – P. 216–225.
19. Nielsen, L. Mechanical properties of polymers and polymer composites / L. Nielsen. – M.: Chemistry, 1978. – 301 p.
20. Perova, M.S. Dependence of properties of non-curing sealants based on butyl rubber filled with calcium carbonate on the nature of thermoplastic / M.S. Perova, L.R. Galimova, Yu.N. Khakimullin // Bulletin of Kazan technological university. – 2010. – №. 6. – P. 230–235.
21. Żenkiewicz, M. Methods for the calculation of surface free energy of solids / M. Żenkiewicz // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 24, № 1. – P. 137–145.
22. Ucar, I.O. Combined XPS and contact angle studies of ethylene vinyl acetate and polyvinyl acetate blends / I.O. Ucar, M.D. Doganci, C.E. Cansoy, H.Y. Erbil, I. Avramova, S. Suzer // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257, № 22. – P. 9587–9594.
23. Al-Assi, M. Evaluation of adhesion and hysteresis friction of rubber–pavement system / M. Al-Assi, E. Kassem // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7, № 10. – P. 1–13.
24. Holysz, L. Surface free energy components of calcium carbonate and their changes due to radiofrequency electric field treatment / L. Holysz, E. Chibowski // Journal of Colloid and Interface Science. – 1994. – Vol. 164, № 1. – P. 245–251.
25. Starostina, I.A. Assessment of the acid and basic parameters of free surface energy using polymer surfaces / I.A. Starostina, N.V. Makhrova, O.V. Stoyanov, I.V. Aristov // Bulletin of Kazan technological university. – 2011. – № 14. – P. 150–157.

УДК 519.7:691

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

Penza State University of Architecture
and Construction

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

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

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

МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПОЗИТОВ

И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Приводится положительный опыт аналитического конструирования композитов на основе междисциплинарного когнитивного моделирования. Даются рекомендации по формализации свойств материала (аналитическое описание частных критериев, совокупностью которых определяется структура материала): структурная идентификация (выбор класса моделей), решение общей задачи идентификации в выбранном классе моделей, а также решение частной задачи (параметрической идентификации). Каждый элемент на определенном уровне иерархии рассматривается как модуль. Объединение отдельных подсистем в единую систему производится с учетом межсистемных связей.

Ключевые слова: композиты, сложные системы, синтез, методы системного анализа, аналитическое конструирование

SYSTEM ANALYSIS METHODS IN DESIGN OF COMPOSITES

I.A. Garkina, A.M. Danilov

The positive experience of analytical design of composites based on interdisciplinary cognitive modeling is presented. Recommendations are given on the formalization of material properties (an analytical description of particular criteria, which combination determines the structure of the material): structural identification (choice of model class), solution of the general identification problem in the selected class of models, and also solution of a particular problem (parametric identification). Each element at a certain level of the hierarchy is considered as a module. Separate subsystems are combined into a single system taking into account intersystem connections.

Keywords: composites, complex systems, synthesis, methods of system analysis, analytical design

Класс математических моделей для оптимизации структуры и свойств композитов (отдельные фрагменты рассматриваются как подсистемы) нами определялся на основе *когнитивного моделирования* (к сожалению, здесь *возможен пропуск некоторых связей*, которыми нередко и определяется рассматриваемое свойство: причинно-следственные связи производятся с *нарушением принципа транзитивности*). Возникает необходимость определения достаточного количества *частных критериев*, которыми определяются требуемые эксплуатационные характеристики материала при справедливости гипотезы о *существовании математической модели*. При много-

уровневой иерархической структуре материала ее получение *практически* не достижимо). Структура определяется *совокупностью свойств*: структурная идентификация (*выбор класса моделей*) осуществляется на основе решения общей задачи идентификации в выбранном классе моделей. *Параметрическая идентификация есть результат решения частной задачи*; одно из главных требований к моделям – *простота интерпретации физического смысла входящих в модели коэффициентов* [1...5]. В частности, регрессионные модели в основном носят иллюстративный характер и, по существу, не используются при прогнозе и целенаправленном изменении значений факторов).

Известно, задача идентификации относится к классу *некорректных задач*. Каждая из эксплуатационных характеристик материала представляется в виде асимптотического значения решения (кинетический процесс формирования физико-механической характеристики) некоторого дифференциального уравнения. Такое представление не является единственным (при необходимости возможна замена пробного класса). В ряде случаев возможна корректная постановка задачи с *привлечением дополнительной информации об искомом решении*, либо можно воспользоваться управлением *классическими алгоритмами* для некорректно поставленной задачи. В качестве такой информации могут быть результаты сравнения данных экспериментальных исследований с теоретическими. Разработка ряда композиционных материалов показала возможность моделирования основных кинетических процессов в классе обыкновенных дифференциальных уравнений. В большинстве случаев удалось ограничиться обобщенными моделями второго порядка. Кинетические процессы оценивались по специально разработанному функционалу [6]. Для моделей второго порядка, представленных в нормальной форме, области равных оценок материала определялись в виде

$$\Omega_k = \{(\xi, \omega_c) | \Phi(S) < k\};$$

$$\xi = -\frac{\sigma}{2\sqrt{\Delta}}, \quad \omega_c = \sqrt{\Delta - \frac{\sigma^2}{4}};$$

σ – след матрицы A ; $trA = \sum_i a_{ii}$, $\Delta = |A|$; $\xi > 0$, $\Delta > 0$, $\xi < 1$ (колебательность);

$\lambda_i = \alpha_i \pm j\beta_i$ – корни характеристического полинома; a, b, c – положительные весовые константы, k – класс материала в принятой шкале.

При $\Phi(S) < k$ справедливо:

$$\omega_c^2 - \frac{k - b\alpha}{c} \omega_c + \frac{a}{c} \alpha < 0, \quad \alpha = \sqrt{\frac{1}{\xi^2} - 1};$$

$$D_1 = \Omega_1, D_k = \Omega_k - \bar{\Omega}_{k-1}, k = 2, 3, \dots$$

$\bar{\Omega}_k$ определяется системой неравенств:

$$0 < \xi < 1,$$

$$k - b\alpha > 0,$$

$$(k - b\alpha)^2 \geq 4ac\alpha,$$

$$\omega_1 \leq \omega_c \leq \omega_2.$$

Из $(\omega_1)'_k = \frac{1}{2c} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4ac\alpha}{(k - b\alpha)^2}}} \right) > 0, k \geq 1;$

$$(\omega_2)'_k = \frac{1}{2c} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4ac\alpha}{(k - b\alpha)^2}}} \right) > 0, k \geq 1$$

следует:

$$\Omega_k \supset \Omega_{k-1}.$$

Нижняя граница области Ω_k возрастает с возрастанием \varkappa (убывает с возрастанием ξ):

$$(\omega_1)'_{\varkappa} = \frac{b}{2c} \left(-1 + \frac{1 + \frac{2ac}{b(k-b\varkappa)}}{\sqrt{1 - \frac{4ac\varkappa}{(k-b\varkappa)^2}}} \right) > 0; \quad (\omega_2)'_{\varkappa} = -\frac{b}{2c} \left(1 + \frac{1 - \frac{2ac}{b(k-b\varkappa)}}{\sqrt{1 - \frac{4ac\varkappa}{(k-b\varkappa)^2}}} \right).$$

Можно показать, если для функционала $2\frac{2ac}{b} \gg 2$, то при малых \varkappa и при k таких, что $\frac{2ac}{bk} > 2$ (то есть при ξ , близких к 1), справедливо $(\omega_2)'_{\varkappa} > 0$, и верхняя граница Ω_k возрастает по \varkappa (убывает по ξ) при \varkappa , близких к нулю (при ξ , близких к 1). При \varkappa , близких к корню \varkappa_{k1} (при ξ , близких к корню ξ_{k2}), имеет место $(\omega_2)'_{\varkappa} < 0$.

Линии равного уровня функционала качества и соответствующие области Ω_k равного качества материала представлены на рис. 1.

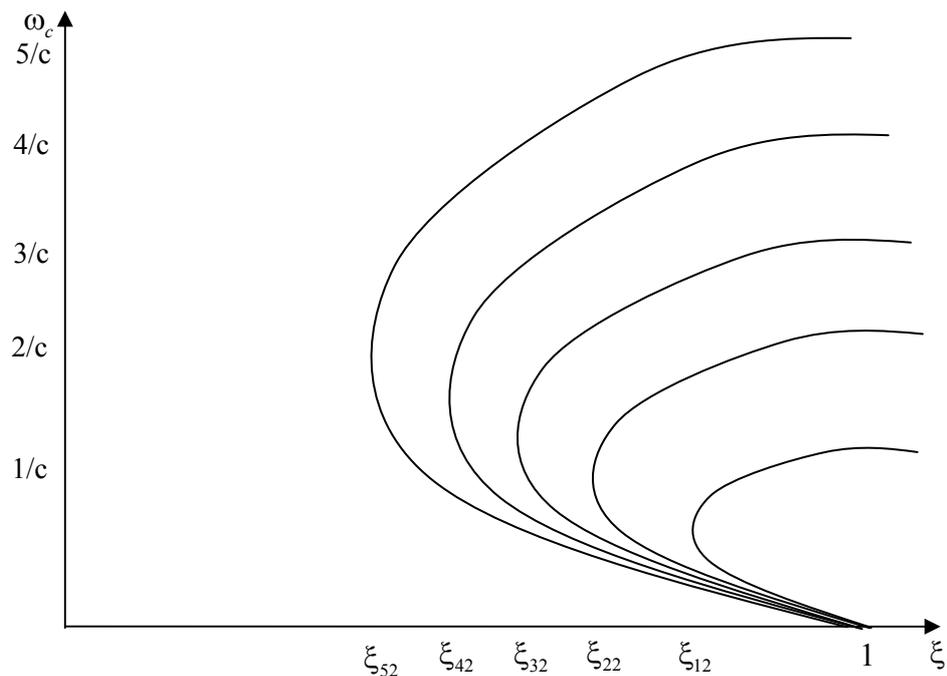


Рис. 1. Линии равного уровня функционала качества

Для апериодических систем ($\sigma^2 - 4\Delta \geq 0$) для каждой из компонент $x = (\omega_z, \alpha)^T = (x_1, x_2)^T$ справедливо:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i - \sigma \dot{x}_i + \Delta x_i &= 0; \quad i = 1, 2, \\ \ddot{x}_i + 2n\dot{x}_i + \omega_0^2 x_i &= 0, \quad T^2 \ddot{x}_i^2 + 2\xi T \dot{x}_i + x_i = 0; \\ T = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{\Delta}}, \quad \xi &= \frac{n}{\omega_0} = -\frac{\sigma}{2\sqrt{\Delta}}, \quad \Delta = \omega_0^2, \quad \sigma = -2\xi\omega_0. \end{aligned}$$

Определим области равных оценок относительно инвариантов ξ и $\omega_0 = T^{-1}$.

Здесь справедливо:

$$2a - 2k\xi\omega_0 \leq 0; \omega_0^2 \geq \frac{a}{k} 2\xi\omega_0 - \left(\frac{a}{k}\right)^2;$$

$$\omega_0 \geq \frac{a}{k} \cdot \frac{1}{\xi}; \omega_0^2 - \frac{2a\xi}{k} \omega_0 + \frac{a^2}{k^2} \geq 0;$$

$$D = 4 \frac{a^2}{k^2} (\xi^2 - 1) > 0;$$

$$\omega_0 < \omega_1; \omega_0 > \omega_2$$

вне интервала (ω_1, ω_2) , $\omega_1 < \omega_2$ – корни трехчлена $\omega_0^2 - \frac{2a\xi}{k} \omega_0 + \frac{a^2}{k^2}$:

$$\omega_1 = \frac{a}{k} \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right), \omega_2 = \frac{a}{k} \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right); \xi > 1;$$

$$\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} > \frac{1}{\xi}.$$

Поэтому для построения областей равных оценок достаточно построить лишь кривые

$$\omega_0 = \frac{a}{k} \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right);$$

$$\omega_0 \approx \frac{2a}{k} \xi \text{ при } \xi^2 \gg 1 \text{ (рис. 2).}$$

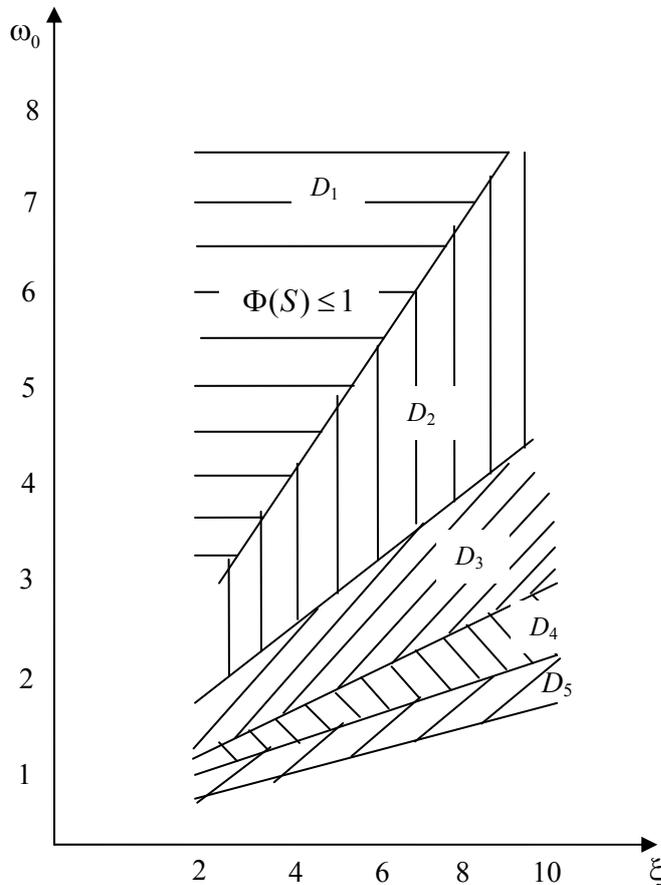


Рис. 2. Области равного качества для аперидических систем

Частные критерии качества (свойства) материала являются нелинейными функциями рецептурно-технологических параметров (используются нормированные) [7...10]. *Линейные части* являются основными составляющими. *Парные взаимодействия определяют синергетические составляющие*. Для минимизации размерности критериального пространства успешно использовался *метод главных компонент*.

Вывод

Определены состояние и перспективы использования методов системного анализа при аналитическом конструировании композиционных материалов.

Список литературы

1. 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 «International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
2. Гарькина, И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.
3. Гарькина, И.А. Формализация процессов формирования свойств композитов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 55–60.
4. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.
5. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.
6. Гарькина, И.А. Из опыта разработки материалов специального назначения / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.О. Петренко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 235.
7. Данилов, А.М. Приближенные методы аналитического конструирования композиционных материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 24–29.
8. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 119–123.
9. Гарькина, И.А. Проектирование и оптимизация свойств сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 5–11.
10. Данилов, А.М. Системное проектирование композитов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3 (28). – С. 45–49.

References

1. 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 «International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
2. Garkina, I.A. The evolution of ideas about composite materials from the perspective of a paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Building materials. – 2018. – №. 1–2. – P. 60–62.
3. Garkina, I.A. Formalization of the processes of composites properties formation / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2018. – №. 2 (35). – P. 55-60.
4. Garkina, I. Analytical design of building materials / I. Garkina, A. Danilov // Journal of Basic and Applied Research International. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 95.

5. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.
6. Garkina, I.A. From the experience of developing special-purpose materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.O. Petrenko // *Modern problems of science and education*. – 2014. – №. 5. – P. 235.
7. Danilov, A.M. Approximate methods of analytical design of composite materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – №1 (38). – P. 24–29.
8. Garkina, I.A. Unified system design concept for complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – №. 1 (38). – P. 119–123.
9. Garkina, I.A. Design and optimization of the properties of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – №. 4 (37). – P. 5–11.
10. Danilov, A.M. System design of composites / A.M. Danilov, I.A. Garkina // *Regional architecture and engineering*. – 2016. – № 3 (28). – P. 45–49.

УДК 691.53

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

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

Лесовик Руслан Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по международной
деятельности, советник РААСН
E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru

Ахмед Ахмед Анис Ахмед,
аспирант кафедры «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»
E-mail: civileng85@yahoo.com

*Грозненский государственный нефтяной
технический университет имени
акад. М.Д. Миллионщикова*

Россия, Чеченская Республика, Грозный,
проспект Хусейна Исаева, 100

Аласханов Арби Хамидович,
доцент кафедры «Технология
строительного производства»
E-mail: alaskanov.arbi@mail.ru

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

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukov St.

Lesovik Ruslan Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-rector for
international activities, adviser to RAASN
E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru

Ahmed Ahmed Anees Ahmed,
Postgraduate student of the department
«Building materials, products and structures»
Email: civileng85@yahoo.com

*Grozny State Oil Technical University named
after Acad. M.D. Millionshchikova*

Russia, Chechen Republic, Grozny, 100,
Hussein Isaev Avenue

Alaskanov Arbi Khamidovich,
Associate Professor of the department
«Building construction technology»
E-mail: alaskanov.arbi@mail.ru

ВЯЖУЩЕЕ ИЗ ПЫЛЕВИДНОЙ ФРАКЦИИ ФРАГМЕНТОВ РАЗРУШЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ИРАКА

Р.В. Лесовик, А.А.А. Ахмед, А.Х. Аласханов

Рассмотрены подходы, способствующие улучшению прочностных характеристик композитов, изготовленных из фрагментов разрушенных зданий и сооружений Ирака. Установлена возможность получения вяжущего из пылевидной фракции фрагментов разрушенных зданий. Приведены результаты сравнительного анализа влияния помола бетонного лома на характер механического поведения образцов на диаграмме осевого сжатия. Экспериментально доказано влияние возраста и величины удельной поверхности бетонного лома на характер изменения прочности и сроков схватывания композитов.

Ключевые слова: закон подобия, бетонный лом, пылевидные фракции, фрагменты разрушенных зданий и сооружений, композиционные вяжущие, зеленые композиты

BINDER FROM THE DUST FRACTION FROM FRAGMENTS OF DESTROYED BUILDINGS AND STRUCTURES IN IRAQ

R.V. Lesovik, A.A.A. Ahmed, A.K. Alaskanov

Some approaches that improve the strength properties of composites made of concrete scrap are discussed. A possibility of obtaining a binder from dust fraction of fragments of destroyed buildings is confirmed. A comparative analysis of the effect of grinding concrete scrap on the nature of mechanical behavior on the axial compression diagram is presented. The influence of age and the value of specific surface of concrete scrap on the character of strength change and the time of setting experimentally proved.

Keywords: law of similarity, concrete scrap, dust fractions, fragments of destroyed buildings and structures, composite binders, green composites

Введение

В настоящее время одним из направлений развития строительной отрасли в некоторых государствах является использование фрагментов разрушенных зданий и сооружений для производства строительных материалов. Производство композиционных вяжущих на основе техногенного сырья из разрушенных зданий и сооружений с улучшенными, а иногда и с принципиально новыми эксплуатационными свойствами и определенной заранее заданной структурой возможно за счет управления процессами структурообразования в твердеющей системе [1–3]. В основу получения таких вяжущих положен принцип целенаправленного управления технологией на всех этапах: разработка оптимальных составов, использование механохимической активации компонентов, применение активных минеральных добавок и др. Многочисленные эксперименты по использованию бетонного лома для изготовления бетонных изделий и конструкций подтвердили высокую эффективность данной технологии [4, 5]. Однако вопрос о возможности получения многокомпонентных вяжущих с использованием бетонного лома ещё не достаточно изучен, хотя имеющиеся данные позволяют предположить его высокую продуктивность.

В эксперименте использовали две фракции бетонного лома: 0–0,16 и 0,16–0,315 мм. Положительные результаты эксперимента по использованию переработанных отходов в качестве вяжущего предполагают возможность решения экологических проблем Ирака [6–8]. Теоретической основой для создания высококачественных композитов является новое научное трансдисциплинарное направление – геоника (геомиметика), которое использует результаты исследований природных процессов и горных пород для создания строительных материалов будущего [9–11].

Материалы и методы исследований

Для применения бетонного лома в производстве строительных материалов необходимо производить тщательный отбор и контроль используемого сырья. Было исследовано влияние сырья на процессы структурообразования в бетоне и на эксплуатационные свойства композитов, такие, как пористость, трещиностойкость, морозостойкость. Использовались отсеvy щебня фрагментов разрушенных зданий и сооружений городов Ирака (рис. 1).



Рис. 1. Фрагменты разрушенных зданий и сооружений Ирака

Для исследования влияния размеров фракций бетонного лома на свойства полученного вяжущего использовали дроблённые фрагменты разных фракций. Бетонный лом подвергали дроблению на лабораторной щековой дробилке, рассеивая на фракции 0,00–0,16 мм; 0,16–0,315 мм; 0,315–0,63 мм; 0,63–1,25 мм; 1,25–2,5 мм; 2,5–5 мм в соответствии с ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Гранулометрический состав отсеvов дробления представлен в табл. 1.

Гранулометрический состав отсевов дробления бетонного лома

Показатели	Размер отверстий сит, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 16
Масса остатков на сите, г	350	83	113	133	155	166
Частные остатки, %	35	8,3	11,3	13,3	15,5	16,6
Полные остатки, %	35	43,3	54,6	67,9	83,4	100

Гранулометрический состав отсевов дробления бетонного лома показывает, что его максимальное количество – 35 % – представлено фракцией 2,5–5 мм. Содержание остальных фракций более-менее равномерно. При выполнении исследования применялись методологические основы системно-структурного подхода в строительном материаловедении «состав – технология – структура – свойства».

Результаты исследования и их обсуждение

Идентификация различных фаз в их смеси на основе анализа дифракционной картины – основная задача рентгенофазового анализа (РФА). Было выявлено, что основными составляющими отсевов дробления являются: непрогидратированные клинкерные минералы C_3S ($d=2,77; 2,19... \text{ \AA}$); C_2S ($d=2,75; 2,74; 2,19... \text{ \AA}$); кварц ($d=4,24; 3,34; 2,45; 2,280; 2,231; 2,123; 1,98 ... \text{ \AA}$); портландит $Ca(OH)_2$ ($d=4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,79; 1,69... \text{ \AA}$); кальцит $CaCO_3$ ($d=3,85; 3,35; 3,04; 2,78; 2,49; 2,28; 2,09; 1,93... \text{ \AA}$); частично закристаллизованный тоберморитоподобный гидросиликат кальция $CSH(B)$ ($d=9,8; 4,9; 3,07; 2,85; 2,80; 2,40; 2,00; 1,83... \text{ \AA}$); гидроферриты кальция, твердые растворы комплексных соединений и др. (рис. 2).

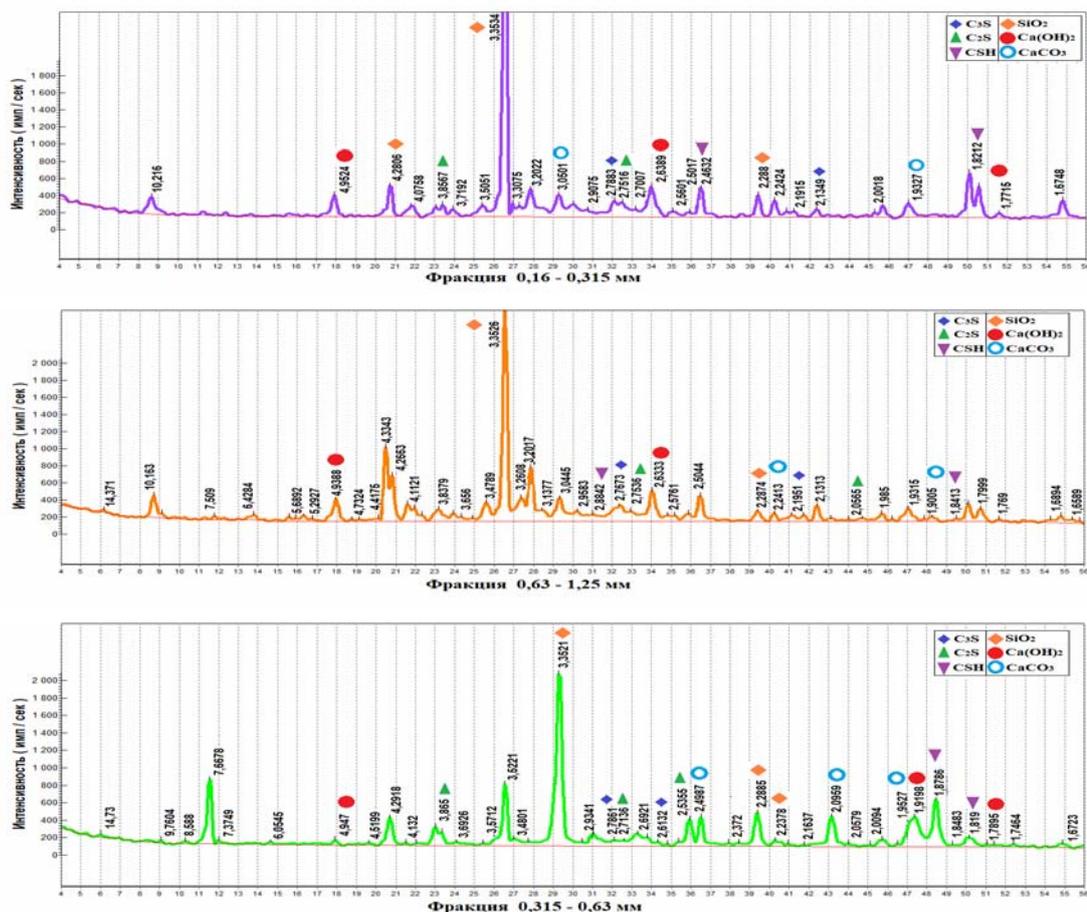


Рис. 2. Рентгенограмма фракций отсевов дробления бетонного лома (начало)

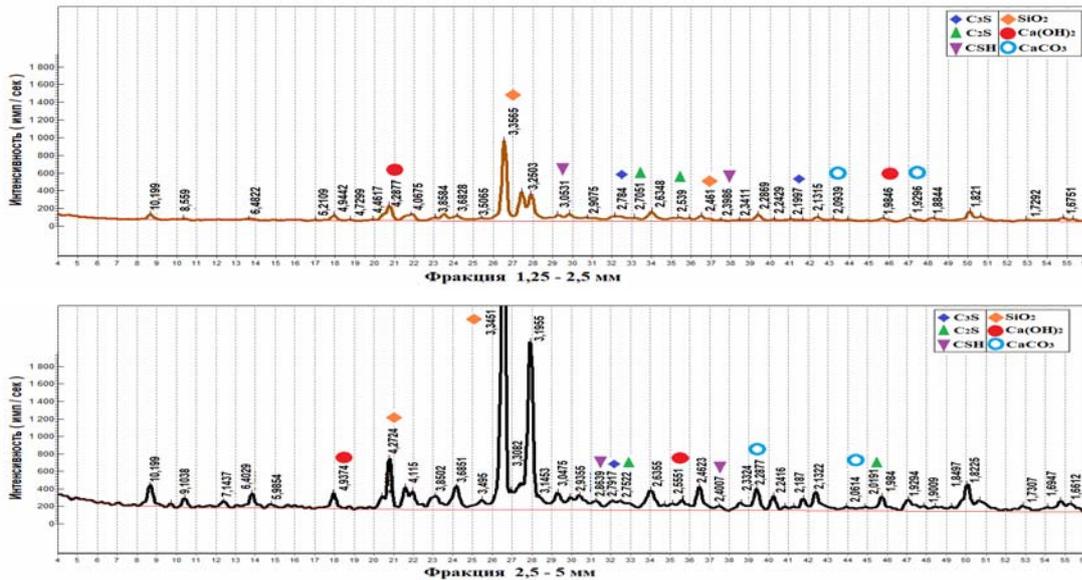


Рис. 2. Рентгенограмма фракций отсевов дробления бетонного лома (окончание)

После дробления бетона на зернах заполнителя остаются слои в виде растворной составляющей или тонких пленок гидратных фаз, а также присутствуют тонкодисперсные частицы цементного камня. Минералы цементного камня в основном представлены клинкерными минералами алитом C_3S ($d=2,77; 2,608; 2,606; \dots \text{ \AA}$); белитом C_2S ($d=2,75; 2,71\dots \text{ \AA}$) и частично закристаллизованным гидросиликатом кальция CSH(II) ($d=9,8; 4,9; 3,07; 2,85; 2,80; 2,40; 2,00; 1,83\dots \text{ \AA}$) и портландитом $Ca(OH)_2$ ($d=4,93; 3,11; 2,63; 1,93; 1,79; 1,69\dots \text{ \AA}$).

Т а б л и ц а 2

Относительное содержание компонентов бетонного лома по интенсивности дифракционных отражений

№	Фракции, мм	Относительная интенсивность отражений											
		SiO ₂		C ₃ S		C ₂ S		CSH		Ca(OH) ₂		CaCO ₃	
		S	%	S	%	S	%	S	%	S	%	S	%
1	0,00-0,16	421	100	123	15	96	22,8	93	22	145	34,4	7	1,6
2	0,16-0,315	556	100	105	9	146	26,2	150	27	140	25	7	1,2
3	0,315-0,63	560	100	25	2,7	30	5,3	80	14	46	8,2	85	15
4	0,63-1,25	565	100	86	6	76	12,1	121	21,4	126	22,3	44	7,7
5	1,25-2,5	617	100	76	5	60	9,7	149	24	115	18,6	46	7,4
6	2,5-5	811	100	60	3	108	13,3	65	8	110	13,5	11	1

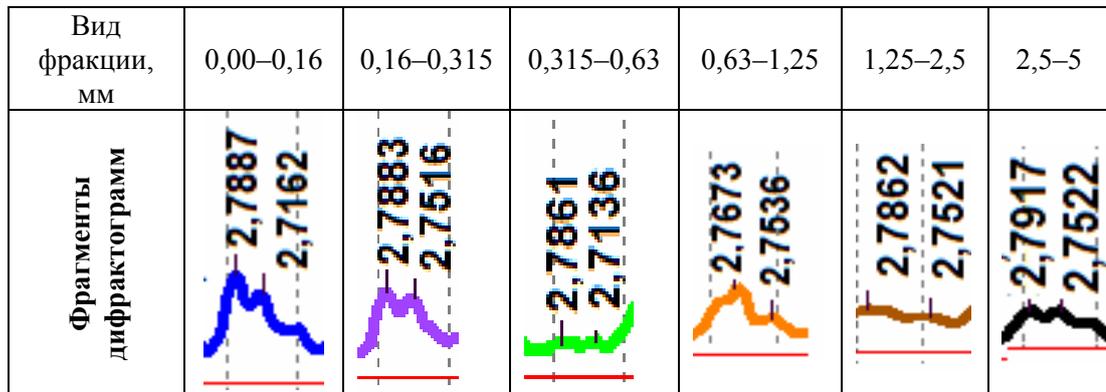
При этом большая часть цементной пленки, прочно закрепившейся на поверхности заполнителя из кварцевого песка и гравия, в процессе предыдущей эксплуатации и повторного дробления карбонизируется, о чем свидетельствует наличие на рентгенограммах $CaCO_3$ ($d = 3,029; 2,490; 2,277$) (см. рис. 2). На рентгенограммах бетонного лома присутствуют пики, характерные для крупного и мелкого заполнителя, в частности кварца ($4,26; 3,34; 2,46; 1,82; 1,54 \text{ \AA}$) (табл. 2).

Анализ рентгенограмм бетонного лома по фракциям показал, что интенсивность отражений алита и белита снижается с переходом от фракции 0,00–0,16 мм к фракции 2,5–5 мм. Одновременно увеличивается количество кварца и минералов, характерных для крупного заполнителя. В самых мелких фракциях бетонного лома (пылевидной и 0,16–0,316 мм) содержится максимальное количество алита C_3S и белита C_2S ,

способных твердеть при взаимодействии с водой, по сравнению с фракциями более крупных размеров (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Интенсивность дифракционных отражений $C_3S + C_2S$



Различный состав исследуемых фракций обусловлен разной способностью к дробимости компонентов фрагментов разрушенных зданий и сооружений. У крупного заполнителя из гравия прочность по дробимости выше, чем у растворной части бетона, поэтому зерна гравия хуже дробятся и в основном накапливаются в крупных фракциях дробленого бетонного лома. Цементный камень легче подвержен дроблению и размалываемости, в связи с чем во фракциях меньшего размера преобладают частицы цементной матрицы и кварц.

В рамках теоретических положений геоники (геомиметика) разработана система проектирования вяжущего с учетом закона подобия [2, 3]. Он подразумевает проектирование высокопрочных композитов, все составляющие которых имеют высокую адгезию и обладают близкими деформационными и температурными характеристиками [12–17]. Нами доказано влияние возраста и величины удельной поверхности бетонного лома на характер изменения прочности и сроков схватывания композитов (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Влияние размера фракций на предел прочности на сжатие

№	Фракция, мм	$S_{уд}$, м ² /кг	В/Ц	Условия твердения R , МПа			
				В естественных условиях			В пропарке
				3 сут	7сут	28 сут	
1	0,00–0,16	325	0,32	3,2	4,3	6,8	3,3
2	0,16–0,315	345	0,32	3,5	3,7	6	2,8
3	0,315–0,63	316	0,31	1,7	3	3,8	2,2
4	0,63–1,25	340	0,32	2	3,1	3,4	2,3
5	1,25–2,5	337	0,31	2,2	2,3	4,4	2
6	2,5–5	331	0,3	2,1	2	4,1	2

Исходя из результатов табл. 4, можно сделать вывод о том, что при сравнительно одинаковой удельной поверхности и В/Ц отношении предел прочности при сжатии в разном возрасте приблизительно в 2 раза выше у мелких фракций (0,00–0,16; 0,16–0,315), чем у более крупных.

На основании этих результатов для дальнейших исследований был осуществлен помол фракций 0,00–0,16 и 0,16–0,315 до удельной поверхности 555, 964, 1255, 1431 м²/кг. Установлено, что самой оптимальной удельной поверхностью является $S_{уд}=964$ м²/кг. В табл. 5 показано влияние величины удельной поверхности тонкомолотого бетонного лома фракций от 0,00 до 0,315 на прочность при сжатии.

Т а б л и ц а 5

Влияние помола фракций на предел прочности на сжатие

№	Фракции, мм	В/Ц	Удельная поверхность, м ² /кг	Предел прочности на сжатие, МПа		
				3 сут	7 сут	28 сут
1	0,00–0,315	0,32	555	7,5	11,8	14,4
2	0,00–0,315	0,36	964	16,5	21	25,5
3	0,00–0,315	0,38	1255	17,4	23,5	27
4	0,00–0,315	0,39	1431	14,8	14,5	29,3

Заключение. Установлено, что свойства бетонного лома в значительной степени зависят от размера фракций и величины удельной поверхности. При дроблении фрагментов разрушенных зданий и сооружений установлено, что во фракциях 0,00–0,016 и 0,16–0,315 мм содержится больше всего алита и белита. Это и определяет высокую прочность вяжущих на их основе. Эти вяжущие можно использовать для производства тротуарной плитки, архитектурных конструкций, строительства зданий и сооружений и т.д. Установлено, что у образцов, приготовленных из порошков, полученных измельчением самых мелких фракций (0,00–0,16 и 0,16–0,315 мм), предел прочности при сжатии в 1,5–2 раза выше, чем у образцов из более крупных фракций, что обусловлено повышенным содержанием алита и белита в их составе.

Таким образом, для получения композиционного вяжущего из бетонного лома целесообразно использовать самую мелкую часть продуктов дробления с размером частиц 0,00–0,315 мм; предложены теоретические подходы по эффективному использованию фрагментов зданий и сооружений и начата их практическая реализация. Одним из самых актуальных решений этой проблемы в республике Ирак является использование фрагментов разрушенных зданий и сооружений для получения строительных композитов. Это экономичное и экологическое решение, которое одновременно может улучшить физико-механические свойства бетона, экономическую обстановку и условия жизни граждан Ирака.

Список литературы

1. Лесовик, В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении / В.С. Лесовик. – Белгород: Изд-во БГТУ. 2014. – 206 с.
2. Lesovik, V.S. The role of the law of affinity structures in the construction material science by performance of the restoration works / V.S. Lesovik, I.L. Chulkova, L.K. Zagordnyuk, A.A. Volodchenko, P.D. Yurievich // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9, № 12. – P. 1100–1105.
3. Лесовик, В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее / В.С. Лесовик // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 1.2, № 1 (100). – С. 9–16.
4. Лесовик, В.С. Современные трехмерные технологии и факторы, сдерживающие их / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, Н.В. Чернышева, Е.С. Глаголев, А.С. Кучерова, М.Ю. Дребезгова, Е.В. Канева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №12. – С. 22–30.
5. Zagorodnjuk, L.H. Optimization of mixing process for heat-insulating mixtures in a spiral blade mixer / L.H. Zagorodnjuk, V.S. Lesovik, A.A. Volodchenko, V.T. Yerofeyev // International Journal of Pharmacy and Technology. – 2016. – Vol. 8, № 3. – P. 15146–15155.
6. Yoshio, K. Studies into the reuse of demolished concrete in Japan / K. Yoshio // EDA/RILEM Conference Re-use of concrete and brick materials. – 1985. – June. – P. 342–348.
7. Жерновский, И.В. Структурообразование известковых композитов в присутствии гидросиликатов и алюмосиликатов кальция / И.В. Жерновский, В.И. Логанина,

С.Н. Кислицина, М.В. Фролов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №4(25). – С. 42–47.

8. Сулейманова, Л.А. Высокая реакционная активность наноразмерной фазы кремнезема композиционного вяжущего / Л.А. Сулейманова, В.С. Лесовик, Е.С. Глаголев // Современные строительные материалы, технологии и конструкции: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова. – Грозный: ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, 2015. – С. 87–93.

9. Логанина, В.И. Нормативная обеспеченность качества сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Е.И. Куимова, Т.В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1(34). – С. 37–41.

10. Лесовик, В.С. Архитектурная геоника. Взгляд в будущее / В.С. Лесовик // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31-1 (50). – С. 131–136.

11. Лесовик, Р.В. Мелкозернистые бетоны на основе композиционных вяжущих и техногенных песков / Р.В. Лесовик, Ю.М. Баженов. – Белгород, 2013. – 567 с.

12. Лесовик, В.С. Неавтоклавные газобетоны на композиционных вяжущих / В.С. Лесовик, Л.А. Сулейманова, А.Г. Сулейманов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. Шухова, 2010. – 151 с.

13. Ерофеев, В.Т. К вопросу длительной прочности бетона / В.Т. Ерофеев, А.Д. Богатов, Е.А. Ларионов, В.И. Римшин // Архитектура. Строительство. Образование. – 2014. – № 2 (4). – С. 32–43.

14. Баженов, Ю.М. Системный анализ в строительном материаловедении / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.

15. Лесовик, В.С. Степень гидратации композиционных вяжущих как фактор коррозии арматуры в бетоне / В.С. Лесовик, А.В. Савин, Н.И. Алфимова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 1 (649). – С. 28–33.

16. Volodchenko, A.N. Sand-clay raw materials for silicate materials production / A.N. Volodchenko, E.O. Prasolova, V.S. Lesovik, A.A. Kuprina, N.P. Lukutsova // Advances in Environmental Biology. – 2014. – Vol. 8, № 10. – P. 949–955.

17. Баженов, Ю.М. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля / Ю.М. Баженов, В.В. Воронин, Л.А. Алимов, А.М. Бахрах, О.А. Ларсен, В.Н. Соловьев, Д.В.К. Нгуен // Вестник МГСУ. – 2017. – Т.12, № 12 (111). – С. 1385–1391.

References

1. Lesovik, V.S. Geonics (geomimetics) examples of implementation in building materials science / V.S. Lesovik. – Belgorod: Publishing House of BSTU, 2014. – 206 p.

2. Lesovik, V.S. The role of the law of affinity structures in the construction material science by performance of the restoration works / V.S. Lesovik, I.L. Chulkova, L.K. Zagordnyuk, A.A. Volodchenko, P.D. Yurievich // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9, № 12. – P. 1100–1105.

3. Lesovik, V.S. Construction Materials. Present and Future / V.S. Lesovik // MGSU Bulletin. – 2017. – Vol. 1.2, No. 1 (100). – P. 9–16.

4. Lesovik, V.S. Modern three-dimensional technologies and factors holding them back / V.S. Lesovik, L.Kh. Zagorodniuk, N.V. Chernysheva, E.S. Glagolev, A.S. Kucherova, M.Yu. Drebezgova, E.V. Kaneva // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2016. – No. 12. – P. 22–30.

5. Zagorodnjuk, L.H. Optimization of mixing process for heat-insulating mixtures in a spiral blade mixer / L.H. Zagorodnjuk, V.S. Lesovik, A.A. Volodchenko, V.T. Yerofeyev // International Journal of Pharmacy and Technology. – 2016. – Vol. 8, № 3. – P. 15146–15155.

6. Yoshio, K. Studies into the reuse of demolished concrete in Japan / K. Yoshio // EDA/RILEM Conference Re-use of concrete and brick materials. – 1985. – June. – P. 342–348.
7. Zhernovsky, I.V. Structuring of calcareous composites in the presence of hydrosilicates and calcium aluminosilicates / I.V. Zhernovsky, V.I. Loganina, S.N. Kisli-tsina, M.V. Frolov // Regional architecture and engineering. – 2015. – No4 (25). – P. 42–47.
8. Suleimanova, L.A. High reactivity of the nanoscale phase of composite binder silica / L.A. Suleimanova, V.S. Lesovik, E.S. Glagolev // Modern building materials, technologies and designs: Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the FSBEI HPE GSTU named after Acad. M.D. Millionschikova. – Terrible: GSTU named after Acad. M.D. Millionschikova, 2015. – P. 87–93.
9. Loganina, V.I. Regulatory quality assurance of dry construction mixtures / V.I. Loganina, E.I. Kuimova, T.V. Uchaeva // Regional architecture and engineering. – 2018. – No1 (34). – P. 37–41.
10. Lesovik, V.S. Architectural geonics. A look into the future / V.S. Lesovik // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2013. – No. 31-1 (50). – P. 131–136.
11. Lesovik, R.V. Fine-grained concrete based on composite binder and man-made sand / R.V. Lesovik, Yu.M. Bazhenov. – Belgorod: 2013. – 567 p.
12. Lesovik, V.S. Non-autoclaved aerated concrete on composite binders / V.S. Lesovik, L.A. Suleymanova, A.G. Suleymanov. – Belgorod, Publishing House of BSTU named after Shukhov, 2010. – 151 p.
13. Erofeev, V.T. To the question of the long-term strength of concrete / V.T. Erofeev, A.D. Bogatov, E.A. Larionov, V.I. Rimshin // Architecture. Construction. Education. – 2014. – No. 2 (4). – P. 32–43.
14. Bazhenov, Yu.M. System analysis in building physics / Yu.M. Bazhenov, I.A. Gar-kina, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – M.: MGSU: Library of scientific developments and projects, 2012. – 432 p.
15. Lesovik, V.S. The degree of hydration of composite binders as a factor of reinforcement corrosion in concrete / V.S. Lesovik, A.V. Savin, N.I. Alfimova // Izvestiya higher educational institutions. Construction. 2013. No. 1 (649). P. 28–33.
16. Volodchenko, A.N. Sand-clay raw materials for silicate materials production / A.N. Volodchenko, E.O. Prasolova, V.S. Lesovik, A.A. Kuprina, N.P. Lukutsova // Advances in Environmental Biology. – 2014. – Vol. 8, № 10. – P. 949–955.
17. Bazhenov, Yu.M. High-quality self-compacting concrete using coal combustion waste / Yu.M. Bazhenov, V.V. Voronin, L.A. Alimov, A.M. Bahrakh, O.A. Larsen, V.N. Soloviev, D.V.K. Nguyen // MGSU Bulletin. – 2017. – Vol. 12, No. 12 (111). – P. 1385–1391.

УДК 691.327:539.32

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Макридин Николай Иванович**,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»**Максимова Ирина Николаевна**,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: maksimovain@mail.ru**Полубарова Юлия Владимировна**,
преподаватель-исследователь*Penza State University of Architecture
and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Makridin Nikolai Ivanovich**,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Technology of building materials
and woodworking»**Maksimova Irina Nikolaevna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Management of quality
and technology of construction production»
E-mail: maksimovain@mail.ru**Polubarova Yuliya Vladimirovna**,
research teacher

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ОБЖИГА ОПОКИ НА ЕЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Полубарова

Представлены результаты экспериментальной оценки изменения структурно-фазовых превращений в природной опоке после обжига с целью получения искусственных пористых заполнителей для легких бетонов конструкционного назначения с использованием комплексного метода исследований, включающего дифференциально-термический анализ, рентгенофазовый анализ, петрографию, тензометрический метод оценки деформативности и прочности. Приведен сравнительный анализ механического поведения термолита и керамзита на диаграмме сжатия. Экспериментально показано влияние структуры термолита на характер изменения прочности и модуля деформации при осевом сжатии.

Ключевые слова: опока, термолит, обжиг, структура, фазовые превращения, рентгенограмма, диаграмма деформирования

THE INFLUENCE OF PHASE TRANSFORMATIONS IN THE PROCESS OF FLASK BURNING ON ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Y.V. Polubarova

The results of an experimental assessment of changes in structural-phase transformations in natural flask after burning with the aim of obtaining artificial porous aggregates for lightweight concrete using a complex research method, including differential thermal analysis, x-ray phase analysis, petrography, tensometric method for assessing deformability and strength, are presented. A comparative analysis of the mechanical behavior of thermolith and expanded clay in a compression diagram is presented. The effect of the thermolith structure on the nature of the change in strength and strain modulus under axial compression is shown experimentally.

Keywords: flask, thermolite, firing, structure, phase transformations, roentgenogram, deformation diagram

По мнению авторов [1–4], современный уровень развития легкогобетонного строительства и связанный с ним уровень производства пористых заполнителей не отражают «строительные» и прочие возможности этих материалов. Пористым заполнителям и легким бетонам на их основе уготована более весомая роль в строительном деле будущего.

Экономические реформы последних лет предопределили региональные тенденции и перспективы развития производства основного строительного материала – бетона. Это использование местных сырьевых ресурсов, снижение материалоемкости, решение проблемы энергосбережения и экологии окружающей среды. Одним из перспективных сырьевых ресурсов для производства искусственных пористых заполнителей является кремнистая порода – опока, которая достаточно широко распространена на территории Пензенского региона, что может решить региональную проблему заполнителей для получения легких бетонов конструкционного назначения.

В многочисленных исследованиях по легким бетонам на искусственных пористых заполнителях из обожженных кремнистых пород, анализ которых дан в работах [1, 4–6], показано, что на основе термолитовых заполнителей из опоки могут быть получены легкие бетоны с прочностью от 10 до 50 МПа. Техническая и экономическая эффективность этих бетонов, закладываемая на стадии проектирования их составов, обусловлена прежде всего оптимальным соответствием свойств заполнителя и цементного раствора проектируемой марке бетона.

Целью нашего исследования являлось изучение структурно-фазовых превращений в опоке после обжига с использованием комплексного метода исследования, включающего рентгенофазовый анализ, электронно-микроскопические наблюдения, dilatометрический анализ, петрографические исследования образцов в отраженном поляризованном и люминесцентном свете, а также тензометрический метод для оценки механического поведения опытных образцов опоки и термолита на ее основе. Исследования были проведены на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и НИИ керамзита (кандидаты технических наук В.П. Петров и Л.Л. Волчек).

При определении технологических свойств опоки важное значение имеет характер микроструктуры и минералогический состав основных компонентов. Микроскопические исследования показали, что исследуемая опока из карьера Кижеватово состоит из зерен и спикул губок, замещенных опалом и кристобалитом, сцементированных глинистыми частицами. Показатель преломления основной массы опоки $N_{cp} = 1,530$, что свидетельствует о преобладании опала.

Глинистая фракция опоки состоит из гидрослюдистых минералов и монтмориллонита. Алевритовая фракция (15 %) состоит в основном из обломков кварца и слюды. Как показал химический анализ (таблица 1), по содержанию оксидов Al_2O_3 и TiO_2 в опоке сырье относится к кислым породам.

Т а б л и ц а 1

Физико-химическая характеристика опоки

Тип породы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{общ}	Fe	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	ппп	Орг. вещества	Огнеупорность, °С
Кижеватовская опока	84,88	4,6	3,12	3,0	0,12	0,38	1,05	0,53	0,24	1,87	2,98	1340

На кривой дифференциально-термического анализа (ДТА) наблюдаются четыре слабых эндотермических эффекта. Эндотермический эффект при температуре 140 °С связан с потерей адсорбционной и межслоевой воды, что характерно для гидрослюды, монтмориллонита и опала. Эндоэффект при температуре 540 °С обусловлен выделением из структуры опоки конституционной воды и началом разрушения структуры гидрослюдистых минералов и монтмориллонита. Эндотермический эффект при 580 °С связан с энантиотропным обратимым полиморфным превращением кварца. Эндоэффект при температуре 890 °С характеризует разрушение структуры гидрослюды и монтмориллонита. Результаты ДТА подтверждаются данными рентгенофазового анализа и электронно-микроскопических исследований.

На ионизационной рентгенограмме образца опоки (рис. 1) наблюдаются линии β -кварца при 4,25; 3,34; 2,28; 2,22; 2,12; 1,98; 1,81; 1,67; 1,53 и 1,37 Å. Линия при 4,15 Å принадлежит α -кристобалиту. Линии при 20,97 Å, 4,51 Å и 2,55 Å принадлежат монтмориллону. Гидрослюда представлена линиями при 10,0 Å, 4,51 Å и 2,51 Å. Как видно из рентгенограммы, наиболее интенсивными являются линии β -кварца, что указывает на достаточно высокую степень закристаллизованности этого минерала в структуре опоки. На электронно-микроскопических снимках (рис. 2) отчетливо видны кристаллические включения β -кварца, монтмориллонита, кристобалита и опала.

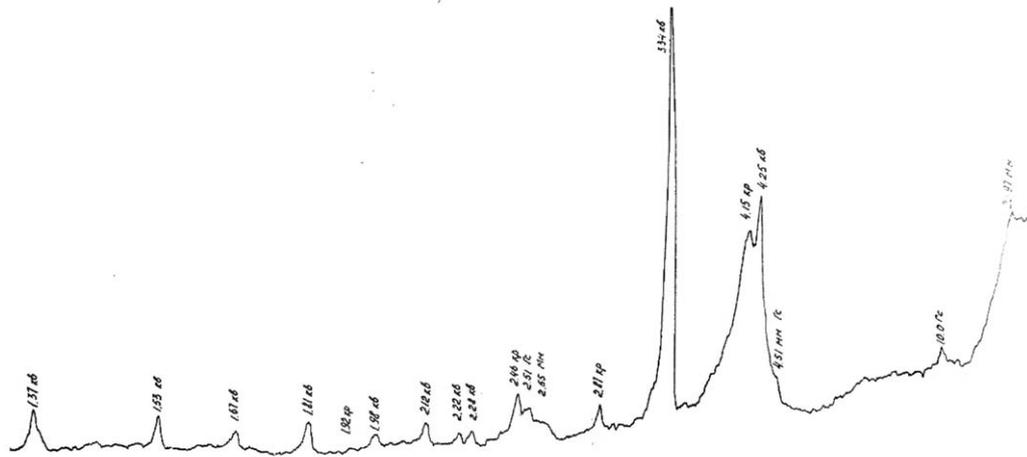


Рис. 1. Рентгенограмма опоки Кижеватовского месторождения:
кв – кварц; кр – кристобалит; мм – монтмориллонит; гс – гидрослюда

Для изучения структурно-фазовых превращений в опоке после обжига и определения важнейших физико-механических свойств опоки и термолита из породы были изготовлены с помощью алмазного диска образцы-призмы правильной геометрической формы в количестве 100 штук. Высота образцов была в пределах от 15 до 30 мм, а сечение от 8×8 до 16×16 мм. Режим термообработки опоки для получения термолита был следующим. Термообработку образцов осуществляли в температурном интервале от 300 °С до 700 °С в течение 15–30 минут. Обжиг при принятой температуре термopодготовки проводили при 800; 1000; 1100 и 1250 °С. Выдержка при температуре обжига составляла 10 минут. Остывание образцов после обжига происходило в остывающей до 300 °С муфельной печи.

В начальной стадии обжига (800 °С) образцы (рис. 3) представляют собой мелкозернистую массу серовато-розового цвета, состоящую в основном из аморфизированных глинистых минералов, глобул опала и псевдоморфоз его по спикулам губок опала, кристаллов β -кристобалита октаэдрического габитуса кубической сингонии и псевдооктаэдрического габитуса тетрагональной сингонии размером 1–2 мкм; четко ограненных кристаллов β -кварца размером до 10 мкм; кристаллов гидрослюда табличатого облика размером до 15 мкм; точечных включений гидроксида железа с ореолом красновато-бурого цвета. Вследствие выгорания органических веществ, содержание которых в опоке невелико, в материале образуется некоторое количество закрытых пор в виде микротрещин и каверн размером 20×200 мкм. Структура материала мелкозернистая, плотная, люминесцентное свечение точечное, слабое. Сущность люминесцентного метода заключается в том, что агрегаты аморфизированного кремнезема (опала, халцедона) в растворах органических соединений обладают способностью отражать люминесцентные лучи. По мере кристаллизации опала свечение ослабевает, а затем, при полной кристаллизации, – исчезает.

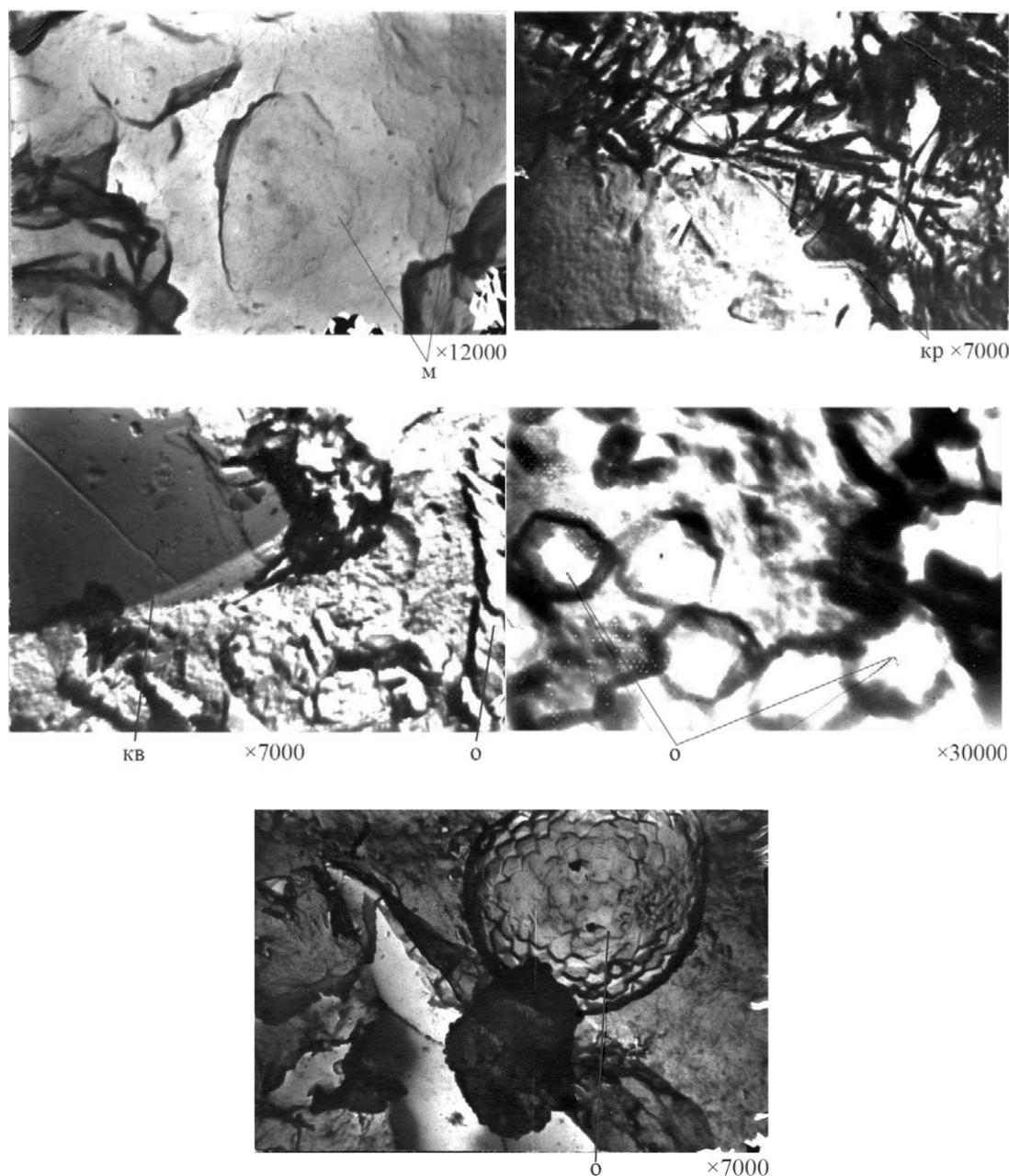


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки опоки Кижеватовского месторождения разного увеличения:

м – монтмориллонит; кр – кристобалит; кв – кварц; о – опал

На ионизационных рентгенограммах образцов после обжига при 800 °С (рис. 4) наблюдается резкое уменьшение относительной интенсивности линий β -кварца при 4,25 Å и 3,34 Å, но в области больших углов интенсивность линии при 1,81 Å увеличилась. Относительная интенсивность линии метастабильной фазы β -кристобалита не изменилась. Исчезли линии монтмориллонита. Однако наблюдается слабая линия гидрослюдь при 10,0 Å. Содержание кристаллической фазы находится в пределах 20,2–21 %.

После обжига при температуре 1000 °С цвет образцов изменяется от серовато-розового до красновато-серого. Наблюдается накопление незначительного количества стеклообразной фазы, что свидетельствует о начальном процессе жидкостного спекания массы. Жидкая фаза, появляясь на поверхности частиц, заполняет

капиллярные зазоры между ними, что приводит к уменьшению количества микропор и способствует началу усадки материала.

На электронно-микроскопических снимках (см. рис. 3) вещественный состав образцов термолита представлен вкраплениями в полях аморфизованных глинистых минералов кристаллов β -критобалита, гематита и γ -тридимита.

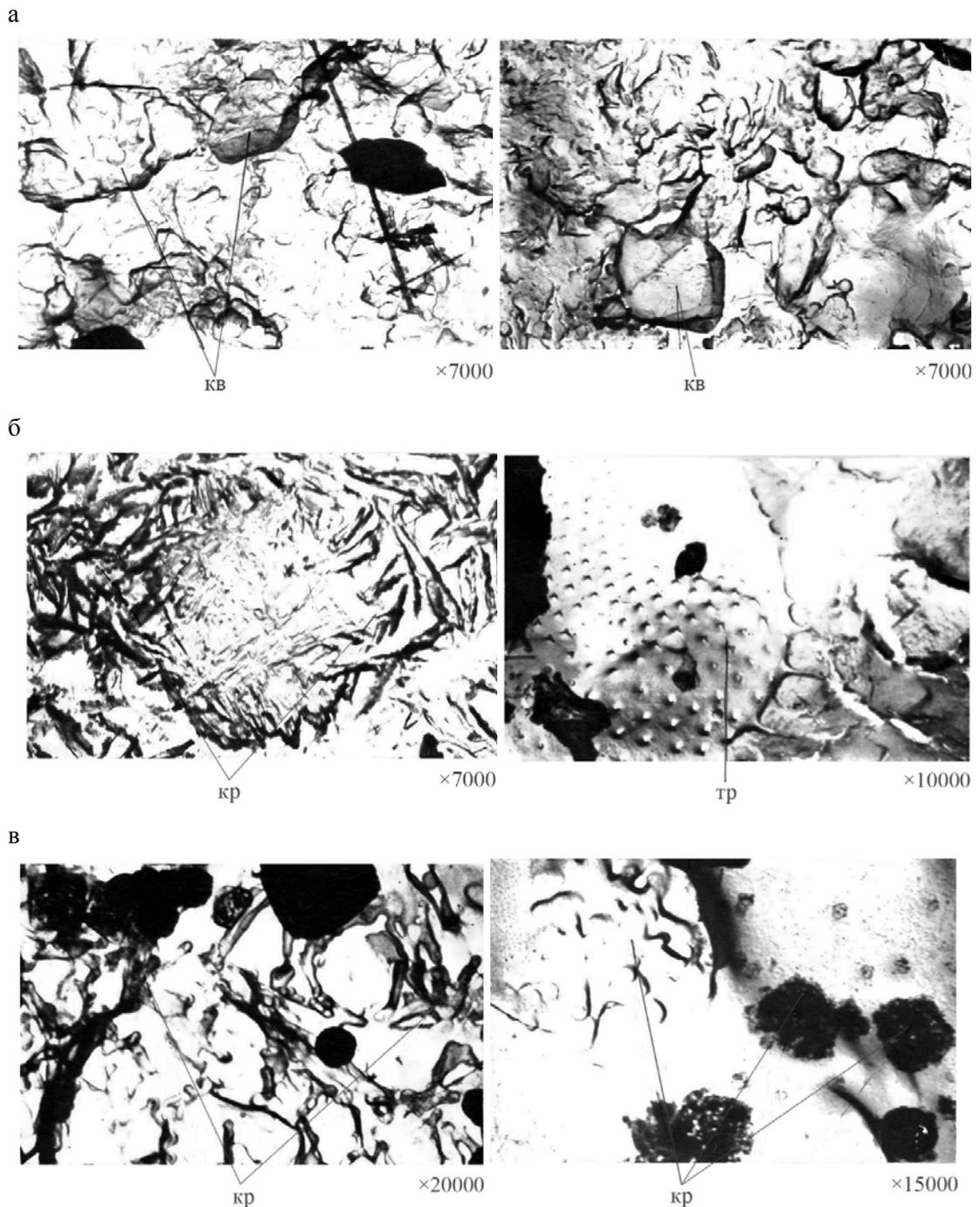


Рис. 3. Микроструктура образцов опоки Кижеватовского месторождения, обожженных при температуре:
а – 800 °С; б – 1000 °С; в – 1250 °С;
кв – кварц; кр – критобалит; тр – тридимит

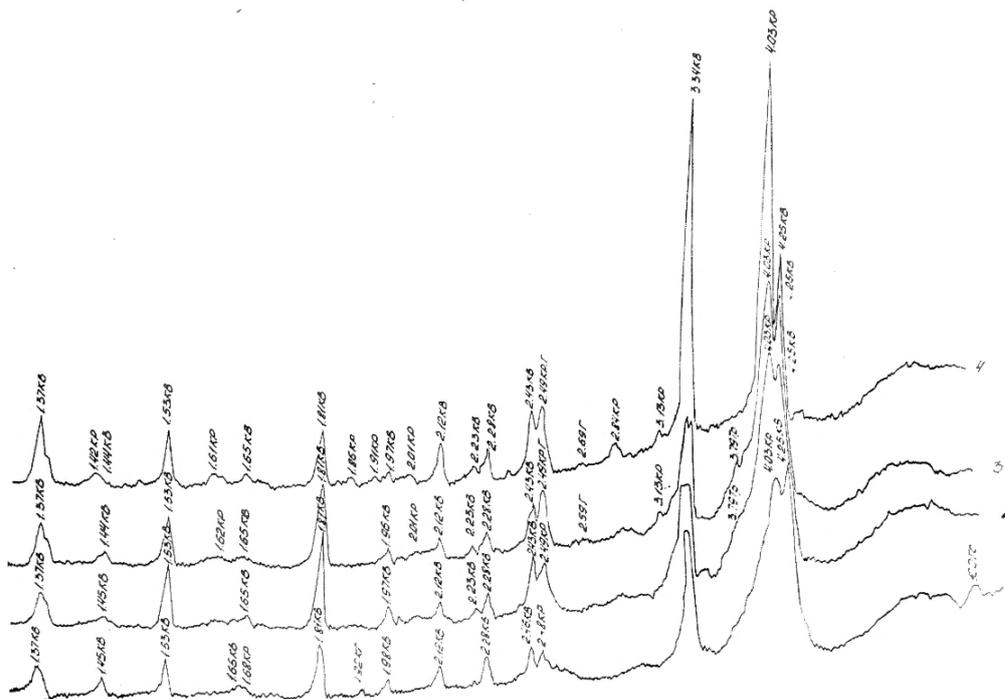


Рис. 4. Рентгенограммы опоки Кижеватовского месторождения, обожженной при температуре: 1 – 800 °С; 2 – 1000 °С; 3 – 1100 °С; 4 – 1250 °С; кв – кварц; кр – кристобалит; г – гематит; гс – гидрослюда; тр – тридимит

На ионизационных рентгенограммах образцов термолита (см. рис. 4) наблюдаются линии β -кварца, относительная интенсивность которых не изменилась, кроме линии при 1,81 Å. Относительная интенсивность линий β -кристобалита увеличилась. Появилась слабая линия γ -тридимита при 3,79 Å. Структура материала плотная, мелкозернистая, с вытянутыми порами размером 20×200 мкм, пористость – около 5 %. Люминесцентное свечение в очень редких зернах слабое.

После обжига при 1100 °С цвет образцов термолита не изменился. При визуальном осмотре структура материала плотная, витропорфировая, с редкими усадочными трещинами размером 500×500 мкм, поры вытянутые размером 20×200 мкм. Пористость образцов составляет 8 %. На ионизационных рентгенограммах (рис. 4) относительная интенсивность линий β -кристобалита увеличивается, а у β -кварца остается без изменения. Есть линия гематита при 2,69 Å и 2,49 Å и γ -тридимита при 3,79 Å. Люминесцентное свечение исчезает.

При температуре обжига, равной 1250 °С, цвет обожженных образцов термолита – серый. Структура материала – плотная, витропорфировая, тонкие трещины размером 100×1000 мкм, поры изометрического сечения до 50 мкм. Пористость находится в пределах 20 %. На электронно-микроскопических снимках на поле стеклофазы видны оплавленные кристаллы кварца, опал кристобалитизированный, кристаллы кристобалита тетрагональной и кубической сингонии размером до 5 мкм. Люминесцентного свечения нет.

На ионизационных рентгенограммах относительная интенсивность линий как β -кварца, так и β -кристобалита увеличивается, но для β -кристобалита она больше, особенно линии при 4,03 Å. Относительная интенсивность линий при 1,81 Å для β -кварца уменьшается, относительная интенсивность линий гематита не изменилась, отсутствует линия тридимита.

Обобщая данные рентгенофазового анализа, можно утверждать, что при повышении температуры обжига образцов опоки и при быстром их охлаждении преимущественно кристаллизуется метастабильная, а значит, более химически активная фаза β -кристобалита, которая обладает большим объемом и меньшей плотностью, чем β -

кварц. Хотя и медленно, β -кристобалит будет превращаться в β -кварц, что приведет к появлению в структуре термолита микротрещин. Вероятно, можно предполагать, что объемные полиморфные превращения термолитового заполнителя, связанные с переходом метастабильной фазы β -кристобалита в стабильную фазу β -кварца, будут способствовать конструктивным процессам структурообразования композитного материала, обусловленным положительным взаимовлиянием усадочных явлений в структурных элементах композита.

Независимо от режима термообработки возникающие термические напряжения в материале приводили к возникновению в образцах более крупного сечения одной или нескольких поверхностных трещин, видимых невооруженным глазом и ориентированных, как правило, перпендикулярно продольной оси образца. В более мелких образцах трещины обжига заметны лишь под микроскопом. В целом термическая обработка не вызывала изменения геометрии и состояния поверхности образцов, полученных после их выпиливания из породы, и они были пригодны под наклейку тензодатчиков. Деформационные свойства термолита и опоки определяли тензометрическим методом с помощью прибора АИД-1М. При этом при наклейке тензорезисторов их базу располагали вне пределов поверхностных трещин, видимых невооруженным глазом. Для замера продольных деформаций были использованы тензодатчики с базой 10 мм. Физико-механические свойства породы определяли на образцах, предварительно высушенных при 105 °С.

В табл. 2 приведены основные свойства необожженной и обожженной опоки Кижеватовского месторождения, определенные в соответствии с ГОСТ 9758-2012. Значения доверительных оценок важнейших свойств определены с надежностью 0,95. При этом следует отметить, что прочностные и деформационные свойства термолита вычислены как средние по результатам испытания 30 образцов. Для определения других свойств опоки и термолита использовались данные результатов испытаний 10 образцов.

Т а б л и ц а 2

Физико-механические свойства обожжённой и необожжённой опоки

Свойства	Единица измерения	Опока	
		необожжённая	обожжённая
Объемная плотность в куске	г/см ³	1,51±0,03	1,43±0,11
Пикнометрическая плотность	г/см ³	2,21	2,32
Водопоглощение по массе за 30 минут	%	16,9±5,6	14,1±1,7
Водопоглощение по массе за 48 часов	%	23,9±5,0	25,0±2,2
Прочность при осевом сжатии, $R_{сж}$	МПа	45,88±5,03	47,37±7,85
Коэффициент размягчения за 30 минут водопоглощения	–	0,63	0,82
Коэффициент размягчения за 48 часов водопоглощения	–	0,49	0,78
Начальный модуль упругости при $\eta = \sigma/R_{пр} = 0,2$	МПа	11283±4544	4984±1201
Модуль деформации при $\eta = \sigma/R_{пр} = 0,9$	МПа	9418±3188	5902±1034
Сжимаемость (деформативность) при $\eta = \sigma/R_{пр} = 0,9$	мм/м	4,434±1,676	6,593±0,682
Объемная огневая усадка	%	–	5,02±0,82

Из данных табл. 2 видно, что объемная плотность термолита несколько ниже, чем у породы. Из анализа значений прочности на сжатие следует, что в результате обжига прочность материала не претерпела принципиальных изменений. Однако дисперсия прочности термолита несколько возросла. Коэффициент размягчения опоки был равен

0,63, а термолита – 0,82, а за 48 часов водопоглощения – 0,49 и 0,78 соответственно. Что касается деформационных свойств, то, как видно из данных табл. 2, обжиг опоки приводит к существенному, примерно в два раза, уменьшению значения начального модуля упругости термолита. Предельная сжимаемость при уровне загрузки, равном 0,9, составляла 4,434 и 6,593 мм/м соответственно для опоки и термолита. Значения предельной сжимаемости термолита значительно превосходят сжимаемость зерен керамзита [7]. Определение упругой характеристики термолита при осевом сжатии, вычисляемой из отношения модуля упругости к пределу прочности, показало, что она примерно в 5–6 раз меньше упругой характеристики зерен керамзита с объемной плотностью, равной 1,0.

На графиках (рис. 5) показан характер изменения модуля деформаций заполнителя на кривой его нагружения.

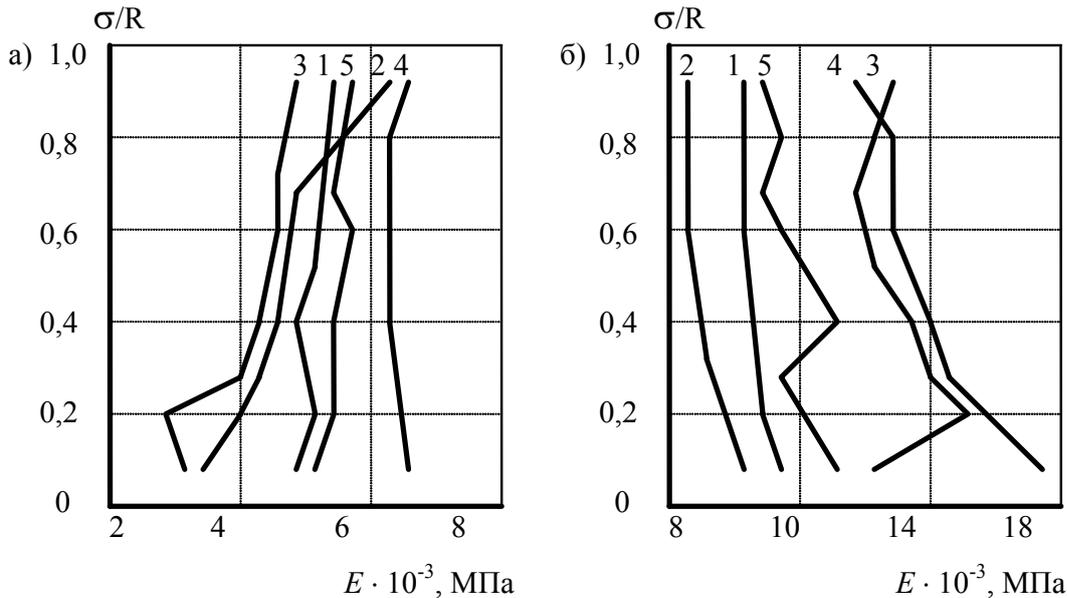


Рис. 5. Характер изменения модуля деформаций термолита (а) и опоки (б) с ростом уровня напряжений:

а – 1 – $\gamma_k = 1,3 \text{ г/см}^3$; 2 – $\gamma_k = 1,42 \text{ г/см}^3$; 3 – $\gamma_k = 1,43 \text{ г/см}^3$; 4 – $\gamma_k = 1,48 \text{ г/см}^3$; 5 – $\gamma_k = 1,53 \text{ г/см}^3$;
 б – 1 – $\gamma_k = 1,48 \text{ г/см}^3$; 2 – $\gamma_k = 1,49 \text{ г/см}^3$; 3 – $\gamma_k = 1,56 \text{ г/см}^3$; 4 – $\gamma_k = 1,58 \text{ г/см}^3$; 5 – $\gamma_k = 1,68 \text{ г/см}^3$

Из графиков (см. рис. 5) отчетливо видно, что с повышением уровня загрузки кривая $\sigma - \epsilon$ образцов из опоки характеризовалась выпуклостью к оси напряжения, а для образцов термолита, – наоборот, выпуклостью к оси деформации. Выпуклость кривых нагружения $\sigma - \epsilon$ к оси деформаций характерна и для керамзитового заполнителя [7]. Анализ графиков (см. рис. 5) показывает, что с ростом уровня напряжения происходит не только повышение значений модуля деформации термолита, но и улучшение показателя однородности модуля для данной выборочной совокупности образцов. Вычисление коэффициента вариации показало, что однородность значений модуля деформации при уровне нагружения $0,9 R$ была примерно на 27 % лучше, чем у начального модуля упругости. Отмеченный характер изменения однородности модуля деформации термолитового заполнителя в линейном напряженном состоянии, вероятно, будет иметь место и для заполнителя в объемном напряженном состоянии в бетоне, что окажет позитивное влияние на однородность поля напряжений в структуре термолитобетона.

Таким образом, структурно-фазовые превращения, происходящие в опоке при ее обжиге, сопровождаются не только уменьшением значений модуля упругости, но и принципиальным изменением характера диаграмм сжатия пористого заполнителя.

Сравнивая термолитовый заполнитель с керамзитовым, можно говорить о значительном преимуществе термолитового заполнителя по прочности. Что же касается упругих свойств, то объективное суждение можно будет составить по результатам

испытания термолито- и керамзитобетона. Полученные в опытах результаты позволяют судить о деформационных характеристиках термолита и производить его сравнение с другими искусственными крупными пористыми заполнителями по показателю модуля упругости – одной из важнейших структурных характеристик заполнителей конструкционного назначения, а также позволяют более обоснованно подходить к проектированию состава бетона на основе термолита.

Список литературы

1. Иванов, И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях / И.А. Иванов. – М.: Стройиздат, 1993. – 182 с.
2. Петров, В.П. Пористые заполнители и легкие бетоны. Материаловедение. Технология производства / В.П. Петров, Н.И. Макридин, В.Н. Ярмаковский. – Самара: Самарский ГАСУ, 2009. – 436 с.
3. Петров, В.П. Технология и материаловедение пористых заполнителей и легких бетонов / В.П. Петров, Н.И. Макридин, Ю.А. Соколова, В.Н. Ярмаковский. – М.: Палеотип, 2013. – 332 с.
4. Максимова, И.Н. Строительное материаловедение конструкционных легких бетонов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 204 с.
5. Макридин, Н.И. Кремнистые породы в решении региональной проблемы заполнителей для легких бетонов конструкционного назначения / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Региональная архитектура и строительство. – 2007. – №2 (2). – С. 31–34.
6. Макридин, Н.И. Анализ механического поведения конструкционного термолитобетона по полностью равновесным диаграммам деформирования / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Полубарова // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 15–19.
7. Макридин, Н.И. О структуре и свойствах керамзитового заполнителя для керамзитобетона повышенной прочности / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Р.С. Ковалев // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 4 (33). – С. 164–167.

References

1. Ivanov, I.A. Lightweight Concrete with Artificial Porous Aggregates / I.A. Ivanov. – M.: Stroyizdat, 1993. – 182 p.
2. Petrov, V.P. Porous aggregates and lightweight concrete. Materials Science. Production Technology / V.P. Petrov, N.I. Makridin, V.N. Yarmakovskiy. – Samara: Samara State University of Architecture and Civil Engineering, 2009. – 436 p.
3. Petrov, V.P. Technology and material science of porous aggregates and lightweight concrete / V.P. Petrov, N.I. Makridin, Yu.A. Sokolova, V.N. Yarmakovskiy. – M.: Paleotype, 2013. – 332 p.
4. Maksimova, I.N. Construction materials science of structural lightweight concrete / I.N. Maksimova, N.I. Makridin. – Penza: PGUAS, 2014. – 204 p.
5. Makridin, N.I. Siliceous rocks in solving the regional problem of aggregates for lightweight concrete for structural purposes / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Regional architecture and engineering. – 2007. – No. 2 (2). – P. 31–34.
6. Makridin, N.I. Analysis of the mechanical behavior of structural thermolithic concrete according to completely equilibrium deformation diagrams / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, Yu.V. Polubarova // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 4 (29). – P. 15–19.
7. Makridin, N.I. About the structure and properties of expanded clay aggregate for expanded clay expanded concrete / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, R.S. Kovalev // Bulletin of civil engineers. – 2012. – No. 4 (33). – P. 164–167.

УДК 691.5

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

Сергеева Кристина Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Физика
и химия»
E-mail: papsheva.ka@gmail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Sergeeva Kristina Anatolevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail: papsheva.ka@gmail.com

К МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЯ АДГЕЗИИ ЛЬДА К ПОВЕРХНОСТЯМ

В.И. Логанина, К.А. Сергеева

Приведены сравнительные результаты оценки адгезии льда к поверхности при различных методиках испытаний. Показано, что независимо от метода испытания наличие антиобледенительного покрытия снижает адгезию льда в 3,03–3,49 раза. Повышение температуры испытания приводит к значительному снижению адгезии льда.

Ключевые слова: супергидрофобное покрытие, адгезия льда, поверхность, методика

TO THE METHOD OF MEASURING ICE ADHESION TO SURFACES

V.I. Loganina, K.A. Sergeeva

Comparative results of estimating ice adhesion to the surface are given for various test methods. It is shown that, regardless of the test method, the presence of an anti-icing coating reduces ice adhesion by 3,03–3.49 times. An increase in test temperature leads to a significant decrease in ice adhesion.

Keywords: super-hydrophobic coating, ice adhesion, surface, technique

Одной из актуальных проблем для регионов, находящихся в суровых климатических зонах, является обледенение крыш жилых и общественных зданий. Один из путей решения этой проблемы – это применение антиобледенительной композиции [1–4].

Супергидрофобные поверхности характеризуются не только высоким значением угла смачивания, но и малым углом скатывания капли при наклоне поверхности. Антиобледенительные свойства супергидрофобных покрытий характеризуются замедлением процесса замерзания капли на супергидрофобной поверхности, малой адгезией льда к поверхности, непродолжительным контактом супергидрофобной поверхности с падающей каплей воды, малой величиной гистерезиса угла смачивания [5, 6].

В процессе эксплуатации свойства супергидрофобных покрытий могут изменяться, что в ряде случаев приводит к потере антиобледенительных свойств. Нами предложен антиобледенительный состав на основе кремнийорганической смолы SILRES® MSE 100 и аэросила марки R 972. Проведенные исследования показали, что покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE 100 5 %-й и 10 %-й концентраций сохранили супергидрофобный эффект после 72 часов увлажнения. Краевой угол смачивания на растворной подложке после увлажнения составил более 150 град. Адгезия покрытий к подложке, оцененная методом решетчатого надреза в соответствии с ГОСТ 15140-78 «Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии», после увлажнения составила 1 балл [7–9].

Одним из показателей качества антиобледенительных покрытий является адгезия. В настоящее время существует несколько методов оценки адгезии льда [10, 11].

Нами проведены сравнительные испытания адгезии льда к антиобледенительным покрытиям в зависимости от методики испытаний. Испытания были проведены по следующим методикам.

Методика определения адгезии льда к металлической поверхности в условиях бокового стеснения заключалась в следующем. Металлическая втулка ставилась на основание и заполнялась водой. Внутренняя поверхность втулки предварительно была обработана антиобледенительным составом. Для предотвращения вытекания воды из втулки нижняя поверхность втулки гидроизолировалась, и после замерзания воды гидроизоляция перед испытанием снималась. Металлические втулки были помещены в морозильную камеру с температурой -18°C .

Измерение адгезионной прочности льда к исследуемому материалу оценивалось путем определения усилия, необходимого для сдвига льда от поверхности исследуемого материала. Испытание льда на сдвиг проводилось с помощью гидравлического пресса в режиме сжатия со скоростью движения захватов 0,5 мм/мин. Адгезия льда к исследуемому материалу вычислялась по формуле

$$R_{\text{сд1}} = \frac{P_1}{S_1}, \quad (1)$$

где P_1 – сила, приложенная для сдвига льда от материала; S_1 – площадь боковой поверхности цилиндра (площадь контакта льда с поверхностью).

Однако результаты проведенных исследований показывают, что методика оценки адгезии льда к поверхности в условиях бокового стеснения дает завышенные результаты и не отражает в ряде случаев фактические условия работы льда. Поэтому в дальнейшем испытания на сдвиг проводились в отсутствие бокового стеснения.

В соответствии с другой методикой адгезия на сдвиг льда к металлической поверхности определялась путем определения усилия, необходимого для сдвига льда от поверхности исследуемого материала в отсутствие бокового стеснения. В емкость определенного объема заливалась вода и покрывалась металлической пластиной. Вода замораживалась в морозильной камере. Определялась сила, прилагаемая для сдвига металлической пластины от льда. Адгезия льда к исследуемому материалу вычислялась по формуле

$$R_{\text{сд2}} = \frac{P_2}{S_2}, \quad (2)$$

где P_2 – сила, приложенная для сдвига металлической пластины от льда; S_2 – площадь металлической пластины (площадь контакта льда с поверхностью).

Кроме того, адгезия льда к поверхности определялась методом отрыва шайб.

В качестве поверхности применяли оцинкованное железо, металлопластик, бетон. Исследовали также влияние температуры в момент испытания на адгезию льда. Результаты исследований приведены в таблице.

Значения адгезии льда в зависимости от вида поверхности и температуры испытания

Наименование поверхности	Метод испытания					
	Сдвиг			Отрыв		
	Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$					
	18-20	12-13	7-8	18-20	12-13	7-8
Оцинкованное железо	0,07	0,0625	0,0430	0,068	0,063	0,045
Оцинкованное железо с антиобледенительным покрытием	0,022	0,0185	0,0127	0,02	0,019	0,011
Металлопластик	0,0132	0,0115	0,0093	0,0128	0,01	0,0079
Металлопластик с антиобледенительным покрытием	0,0042	0,0037	0,0029	0,0039	0,0031	0,0026

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблице, свидетельствует, что независимо от метода испытания наличие антиобледенительного покрытия снижает адгезию льда в 3,03–3,49 раза. Повышение температуры испытания приводит к значительному снижению адгезии льда. Так, адгезия льда на сдвиг к оцинкованному железу при температуре испытаний -18 – 20°C составляет 0,07 МПа, а при температуре испытания $-(7-8)^{\circ}\text{C}$ – 0,043 МПа. Снижение адгезии составляет 61 %. При наличии антиобледенительного покрытия снижение адгезии составляет 58 %. Более значительное снижение адгезии льда наблюдается при применении металлопластика, составляющее 69–70,4 %. Из этого следует, что сравнивать результаты оценки адгезии льда к поверхностям можно только при указании температуры испытания.

Прочность сцепления на сдвиг льда с бетонной поверхностью при температуре -18°C составляет $R=0,93$ МПа, а при наличии антиобледенительного покрытия – 0,279 МПа, т.е. прочность сцепления льда снизилась в 3,3 раза.

Результаты испытаний показывают, что метод сдвига и метод отрыва шайб дают практически одинаковые значения. При проведении испытаний следует учитывать условия работы льда и температуру испытания, т.к. несоблюдение этих условий может привести к ошибочным выводам.

Список литературы

1. Войнович, Л.Б. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение / Л.Б. Войнович, А.М. Емельяненко // Успехи химии. – 2008. – Т. 77, № 7. – С. 619–638.
2. Kreder, M.J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? / M.J. Kreder, J. Alvarenga, P. Kim, J. Aizenberg // Nature Reviews Materials. – 2016. – Vol. 1, No. 1. – P. 15003.4. – URL: www.verholaz.net 2006-2015.
3. Bowden, F.P. Friction on snow and ice / F.P. Bowden // Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A, 1953. – Vol.217, № 1131. – P. 462–478.
4. Bowden, F.P. The mechanism of sliding on ice and snow / F.P. Bowden, T.P. Hughes // Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A. – 1939. – Vol. 172, No. 949. – P. 280–98.
5. Huzioka, T. Studies on the resistance of snow sledge / T. Huzioka // Teion-kagaku: Low Temperature Science, Ser. A. – 1963. – № 21. – P. 31–44.
6. Weyl, W.A. Surface structure of water and some of its physical and chemical manifestation / W.A. Weyl // Colloid and Interface Science. – 1951. – № 6. – P. 389–405.
7. Логанина, В.И. Выбор концентрации полимера при разработке рецептуры состава для антиобледенительного покрытия / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, К.А. Сергеева // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2019. – №1(8). – С.19–22.
8. Логанина, В.И. Исследование кинетики замерзания капли воды на супергидрофобной поверхности покрытий / В.И. Логанина // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, вып. 4. – С.311–317
9. Логанина, В.И. Сравнительная оценки адгезии льда к супергидрофобным и гидрофильным покрытиям / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, К.А. Сергеева // Известия вузов. Строительство. – 2019. – №4. – С.28–34.
10. Гольдштейн, Р.В. К измерению адгезии льда к другим материалам / Р.В. Гольдштейн, В.П. Епифанов // Вестник ПГТУ. Механика. – 2011. – №2. – С.28–41.
11. Игошин, В.А. Некоторые методические вопросы исследования контактного взаимодействия материалов со снегом и льдом / В.А. Игошин, Э.Л. Тюниена, И.Н. Черский // Трение и износ. – 1985. – Т.6, №3. – С.485–492.

References

1. Voinovich, L.B. Hydrophobic materials and coatings: principles of creation, properties and application / L.B. Voinovich, A.M. Emelianenko // Chemistry Advances. – 2008. – Vol. 77, № 7. – P. 619–638.

2. Kreder, M.J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? / M.J. Kreder, J. Alvarenga, P. Kim, J. Aizenberg // *Nature Reviews Materials*. – 2016. – Vol. 1, No. 1. – P. 15003.4. – URL: www.verholaz.net 2006-2015.
3. Bowden, F.P. Friction on snow and ice / F.P. Bowden // *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*, 1953. – Vol.217, № 1131. – P. 462–478.
4. Bowden, F.P. The mechanism of sliding on ice and snow / F.P. Bowden, T.P. Hughes // *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*. – 1939. – Vol. 172, No. 949. – P. 280–98.
5. Huzioka, T. Studies on the resistance of snow sledge / T. Huzioka // *Teion-kagaku: Low Temperature Science, Ser. A*. – 1963. – № 21. – P. 31–44.
6. Weyl, W.A. Surface structure of water and some of its physical and chemical manifestation / W.A. Weyl // *Colloid and Interface Science*. – 1951. – № 6. – P. 389–405.
7. Loganina, V.I. The choice of polymer concentration in the development of a formulation for anti-icing coating / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, K.A. Sergeeva // *PGUAS Bulletin: construction, science and education*. – 2019. – №1 (8). – P.19–22.
8. Loganina, V.I. Study of the kinetics of freezing of a drop of water on a superhydrophobic surface of coatings / V.I. Loganina // *MGSU Bulletin*. – 2019. – Vol. 14, Iss. 4. – P.311–317. – DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.p-p.
9. Loganina, V.I. Comparative estimates of ice adhesion to superhydrophobic and hydrophilic coatings / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, K.A. Sergeeva // *News of universities. Construction*. – 2019. – №4. – P. 28–34.
10. Goldstein, R.V. To measure the adhesion of ice to other materials / R.V. Goldstein, V.P. Epifanov // *Bulletin of Perm State Technical University. Mechanics*. – 2011. – №2. – P.28–41.
11. Igoshin, V.A. Some methodological issues of the study of contact interaction of materials with snow and ice / V.A. Igoshin, E.L. Tyunyen, I.N. Chersky // *Friction and wear*. – 1985. – Vol. 6, №3. – P.485–492.

УДК 699.86

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,
старший преподаватель кафедры
«Теплогасоснабжение и вентиляция»
E-mail: mihail-frolovv@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

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

ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В СТЕНАХ ИЗ ГАЗОБЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК НАРУЖНОГО ОТДЕЛОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

М.В. Фролов

Определены закономерности конденсации влаги в наружных ограждающих конструкциях из газобетонных блоков марок D350-D600, отделанных различными видами сухих строительных смесей. Получена математическая зависимость температуры начала конденсации в газобетонной ограждающей конструкции от теплопроводности и паропроницаемости наружного отделочного покрытия. Выявлено, что при использовании для отделки газобетонных блоков марок D350-D600 известкового состава с применением зольных алюмосиликатных микросфер конденсация влаги начинается при более низкой температуре наружного воздуха.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, влажностный режим, конденсация влаги, газобетон, зольные микросферы алюмосиликатные

ESTIMATION OF A MOISTURE REGIME IN WALLS FROM GAS CONCRETE DEPENDING ON THE CHARACTERISTICS OF THE EXTERNAL FINISHING

M.V. Frolov

The patterns of moisture condensation in the external enclosing structures of aerated concrete blocks of grades D350-D600, finished with various types of dry building mixtures, are investigated. A mathematical dependence of the temperature of the onset of condensation in the aerated concrete enclosing structure on the thermal conductivity and vapor permeability of the outer finish coating is obtained. It was revealed that when lime composition is used for finishing aerated concrete blocks of D350-D600 grades using ash aluminosilicate microspheres, moisture condensation begins at a lower outdoor temperature.

Keywords: dry building mixes, humidity conditions, moisture condensation, aerated concrete, aluminosilicate fly ash microspheres

С целью снижения потребления энергоресурсов на отопление вновь возводимых зданий ужесточаются требования к тепловой защите их наружных ограждающих конструкций. В связи с этим в последние годы наблюдается увеличение объемов выпуска газобетонных блоков, позволяющих возводить однослойные стены с достаточно высокими теплозащитными свойствами. Стены из газобетонных блоков чаще всего отделываются сухими строительными смесями (ССС), улучшающими декоративные качества наружных ограждений и обеспечивающими им защиту от различных климатических воздействий.

При неправильном выборе ССС фиксируется отслоение фрагментов наружного отделочного покрытия и появление на покрытии сетки из мелких трещин [1]. Конденсация влаги на границе «штукатурка – газобетон» является одной из основных причин разрушения отделочного покрытия. В наружной стене для минимизации количества конденсирующейся влаги и снижения вероятности ее появления каждый последующий слой по направлению от внутренней к наружной поверхности должен обладать большей паропроницаемостью и меньшей теплопроводностью по сравнению с предыдущим. Данное условие сложно выполнимо применительно для наружной отделки газобетона, т.к. снижение теплопроводности и увеличение паропроницаемости штукатурных композитов может вызвать ухудшение эксплуатационных свойств получаемых покрытий. Но приближение показателей паропроницаемости и теплопроводности отделочных покрытий к газобетону позволит существенно снизить вероятность конденсации влаги [2, 3].

Была проведена оценка влажностного режима газобетонных ограждающих конструкций, отделанных различными штукатурными покрытиями. В качестве наружной отделки стен из газобетона использована ССС, содержащая в рецептуре: известково-пушонку, модифицирующую добавку на основе смеси гидросиликатов и алюмосиликатов кальция, зольные микросферы алюмосиликатные, белый цемент, размолотые отходы производства газобетона, Melflux 2651 F, VINNAPAS 8031 H, олеат натрия [4, 5]. Покрытия на основе разработанной ССС отличаются высокой паропроницаемостью $\mu=0,150$ мг/(м·ч·Па), низкой теплопроводностью $\lambda=0,137$ Вт/(м·К), плотностью, близкой к плотности газобетона, $\rho=650$ кг/м³ и хорошими эксплуатационными свойствами [6]. Предполагается, что использование данной ССС позволит снизить вероятность образования конденсата и минимизировать его количество.

Вероятность конденсации влаги, как правило, определяют с помощью графоаналитического метода Фокина – Власова [7]. В этом методе строится распределение E_i и e_i по толщине ограждения при определенной температуре t_n . Недостатком данного метода является зависимость вывода о возможности конденсации от выбора расчетной температуры наружного воздуха. В различных работах для этого используют значения средней температуры наиболее холодной пятидневки, средней температуры наиболее холодного месяца, средней температуры всего периода года с отрицательными среднесуточными температурами. В зависимости от принятой температуры выводы о наличии или отсутствии конденсации влаги в данном ограждении могут сильно отличаться.

В работах Куприянова В.Н. предложено определять для оценки вероятности конденсации влаги в наружных ограждениях температуру начала конденсации $t_{н.к}$ [8]. Данная температура равна максимальной температуре, при которой в наружном ограждении данной конкретной конструкции начинается конденсация влаги. Это методика использована в ходе проведенных исследований.

Расчетная схема конструкции исследуемой стены представлена на рис. 1.

В качестве внутренней отделки (см. рис. 1, слой 1) принята цементно-шлаковая штукатурка. В качестве основного материала стены (см. рис. 1, слой 2) приняты газобетонные блоки марок D350, D400, D500, D600, при использовании которых можно получить однослойные стены, удовлетворяющие действующим нормативным документам по тепловой защите. В качестве наружной отделки (см. рис. 1, слой 3) использованы ССС 3 видов:

- цементно-песчаная штукатурка: плотность $\rho=1800$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda_A=0,760$ Вт/(м·К), коэффициент паропроницаемости $\mu=0,090$ мг/(м·ч·Па);
- Кнауф GRUNBAND: $\rho=1100$ кг/м³, $\lambda_A=0,350$ Вт/(м·К), $\mu=0,100$ мг/(м·ч·Па);
- разработанная ССС: $\rho=650$ кг/м³, $\lambda_A=0,155$ Вт/(м·К), $\mu=0,150$ мг/(м·ч·Па).

Высокая плотность цементно-песчаной штукатурки не позволяет рекомендовать использовать ее для наружной отделки газобетонных блоков. Покрытия, получаемые при использовании ССС Кнауф GRUNBAND, характеризуются плотностью 1100 кг/м³, что позволяет рекомендовать использовать данные отделочные составы для газобетона. Влажностный режим в стене, покрытой ССС Кнауф GRUNBAND, будет близок к

влажностному режиму в стенах, покрытых большинством видов других ССС для отделки газобетона, представленных на рынке.

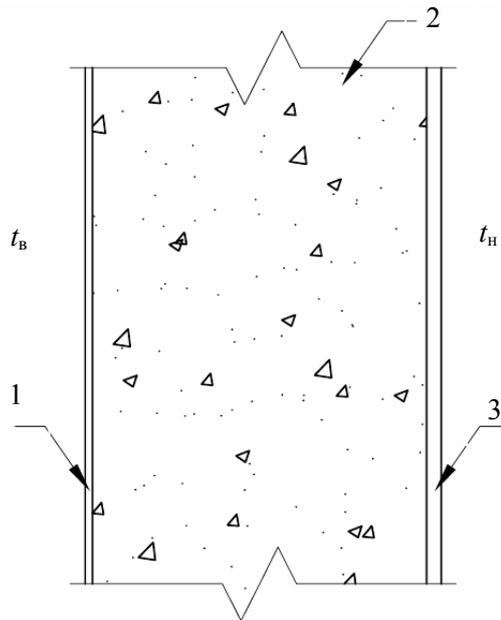


Рис. 1. Расчетная схема ограждающей конструкции стены:

1 – слой 1, внутренняя отделка; 2 – слой 2, газобетон; 3 – слой 3, наружная отделка

Нами проведена оценка влияния наружного отделочного покрытия на $t_{нк}$ для стен зданий, расположенных в г. Воронеже.

Расчетные параметры внутреннего воздуха приняты равными параметрам внутреннего воздуха для жилых зданий: температура $t_{в}=20,0$ °С; относительная влажность $\phi_{в}=55$ %.

Расчетные параметры наружного воздуха для г. Воронежа, принятые согласно действующим нормативным документам: средняя температура отопительного периода $t_{оп}=-2,5$ °С; продолжительность отопительного периода $z_{оп}=200$ сут; зона влажности – сухая.

Для стен из газобетонных блоков марок D350, D400, D500, D600 для условий г. Воронежа предварительно определена минимально допустимая толщина слоя газобетона в ограждающих конструкциях, исходя из поэлементных требований к тепловой защите вновь возводимых зданий (см. таблицу).

Толщина слоя газобетона, м

Марка газобетона			
D350	D400	D500	D600
0,40	0,40	0,50	0,60

Для упрощения приняты следующие условные обозначения различных вариантов исполнения ограждающих конструкций:

$$x / y, \tag{1}$$

где x – плотность газобетона; y – плотность наружного отделочного слоя.

В качестве примера подробно исследован влажностный режим в газобетонной конструкции 400/1800. Каждый слой стены характеризуется своим сопротивлением паропрооницанию R_{pi} и сопротивлением теплопередаче R_{ti} , определяемым по формулам

$$R_{pi} = \frac{\delta_i}{\mu_i}, \tag{2}$$

где δ_i – толщина слоя, м; μ_i – коэффициент паропрооницаемости слоя, мг/(м·ч·Па).

$$R_{Ti} = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (3)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности слоя, Вт/(м·К).

На рис. 2 представлен график, на котором по оси абсцисс отложены значения сопротивления паропрооницанию всего ограждения $\sum R_{Pi}/R_{Pi0}$ в относительных единицах, а по оси ординат – значения сопротивления теплопередаче $\sum R_{Ti}/R_{To}$ всего ограждения в относительных единицах.



Рис. 2. Соотношение между сопротивлением теплопередаче и сопротивлением паропрооницанию:
1 – 400/1800; 2 – диагональ пропорциональности

На рис. 2 внутренняя поверхность ограждения обозначена точкой А, наружная поверхность – точкой О. Для варианта исполнения ограждающей конструкции 400/1800 траектория соотношения между сопротивлением теплопередаче и сопротивлением паропрооницанию является ломаной линией с изломом в точке Б, границе между внутренней отделкой и газобетоном, и изломом в точке В, границе между газобетоном и наружной отделкой (см. рис. 2, кривая 1). Точки Б и В характерны для графиков всех рассматриваемых вариантов ограждений.

Проведем вспомогательную диагональ пропорциональности, соединяющую точки А и О (см. рис. 2, кривая 2). Данная линия показывает соотношение между сопротивлением теплопередаче и сопротивлением паропрооницанию, характерное для однослойных конструкций. На пересечении кривых 1 и 2 отметим точку К. Отрезок АБК расположен ниже диагонали пропорциональности, следовательно, на всем протяжении данной зоны в стене будет выполняться неравенство

$$\sum R_{Pi} / R_{Pi0} > \sum R_{Ti} / R_{To}. \quad (4)$$

Отрезок КВО расположен выше диагонали пропорциональности, следовательно, на всем протяжении данной зоны в стене будет выполняться неравенство

$$\sum R_{Pi} / R_{Pi0} < \sum R_{Ti} / R_{To}. \quad (5)$$

Наиболее вероятной плоскостью конденсации в ограждении будет точка В, являющаяся границей между газобетоном и наружной отделкой, т.к. данная точка наиболее удалена вверх от диагонали пропорциональности. В точке В для данного ограждения справедливо равенство

$$\sum R_{Ti} / R_{ТО} - \sum R_{Pi} / R_{ПО} = \max. \quad (6)$$

Рассмотрим графики соотношений между сопротивлением теплопередаче и сопротивлением паропроницанию для ограждений 400/1800, 400/1100, 400/650 в пределах $0,8 < \sum R_{Pi} / R_{ПО} < 1,0$, $0,8 < \sum R_{Ti} / R_{ТО} < 1,0$ (рис. 3).



Рис. 3. Соотношение между сопротивлением теплопередаче и сопротивлением паропроницанию в пределах $0,8 < \sum R_{Pi} / R_{ПО} < 1,0$, $0,8 < \sum R_{Ti} / R_{ТО} < 1,0$:
1 – однослойное ограждение; 2 – 400/1800; 3 – 400/1100; 4 – 400/650

При использовании в качестве наружной отделки цементно-песчаной штукатурки точка В₁ будет расположена максимально далеко от диагонали пропорциональности (см. рис. 3, кривая 2). Исходя из этого можно предположить, что конденсация влаги в ограждении 400/1800 начнется при наиболее высокой температуре. При использовании ССС Кнауф GRUNBAND точка В₂ оказывается расположенной ближе к диагонали пропорциональности по сравнению с точкой В₁ (см. рис. 3, кривая 3). Исходя из этого можно предположить, что конденсация влаги в ограждении 400/1100 начнется при более низкой температуре наружного воздуха, при этом точки В₁ и В₂ расположены близко, следовательно, разница между $t_{н.к}$ для данных ограждений будет незначительной.

При использовании в качестве наружной отделки разработанной ССС точка В₃ будет расположена максимально близко от диагонали пропорциональности (см. рис. 3, кривая 4). Исходя из этого можно предположить, что конденсация влаги в ограждении 400/650 начнется при наиболее низкой температуре.

Для определения температуры начала конденсации $t_{н.к}$ для каждой из исследуемых конструкций строили профили давления насыщенного водяного пара E_i и парциального давления водяного пара e_i . Затем путем последовательного приближения определяли $t_{н.к}$. Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 4.

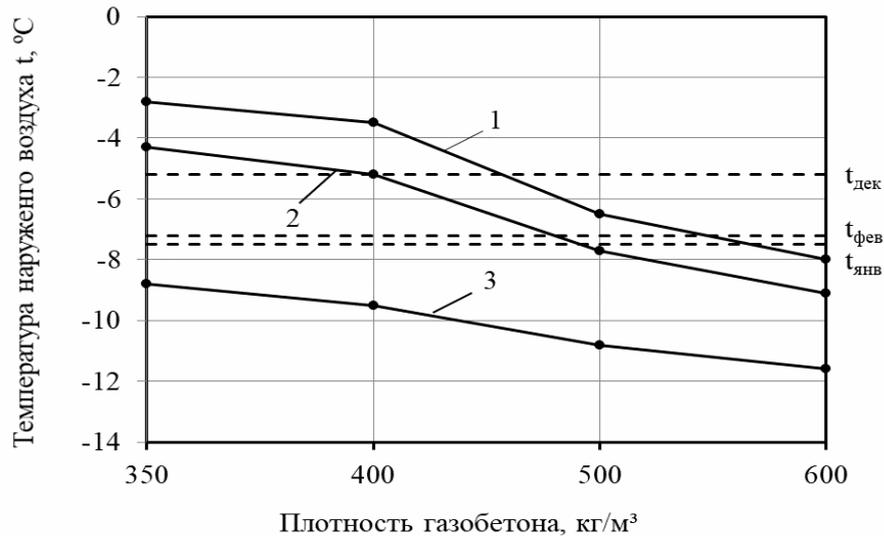


Рис. 4. Зависимость температуры начала конденсации $t_{н.к}$ от плотности газобетона:
1 – цементно-песчаная штукатурка; 2 – Кнауф GRUNBAND; 3 – разработанная CCC

Конденсация влаги в ограждающей конструкции 600/1800 начинается при температуре $-8,0$ °C (см. рис. 4, кривая 1). При использовании вместо цементно-песчаной штукатурки CCC Кнауф GRUNBAND температура начала конденсации $t_{н.к}$ понижается всего на 1 °C до $-9,0$ °C (см. рис. 4, кривая 2), при использовании разработанной CCC температура начала конденсации $t_{н.к}$ понижается на $3,6$ °C до $-11,6$ °C (см. рис. 4, кривая 3).

При уменьшении плотности газобетона увеличивается температура начала конденсации $t_{н.к}$, при этом температура начала конденсации $t_{н.к}$ в стенах, отделанных цементно-песчаной штукатуркой и CCC Кнауф GRUNBAND, в значительно большей степени зависит от плотности газобетона. Температура начала конденсации $t_{н.к}$ в ограждающей конструкции 350/650 ниже на 6 °C, чем температура начала конденсации $t_{н.к}$ в ограждающей конструкции 350/1800.

Установлено, что в ограждающих конструкциях, оштукатуренных цементно-песчаным составом, будет выпадать конденсат при среднемесячных температурах декабря, января и февраля в стенах из газобетонных блоков марок D350, D400, при среднемесячных температурах января и февраля в стенах из газобетонных блоков марок D500. В ограждающих конструкциях, отделанных разработанной CCC, не будут создаваться условия для образования конденсата.

В работе [9] предложено использовать для определения $t_{н.к}$ обобщенный конструктивный параметр $k_{об}$, определяемый по формуле

$$k_{об} = \frac{R_{\Pi_i} / R_{\Pi_0}}{R_{T_i} / R_{T_0}}, \quad (7)$$

где R_{Π_i} – сопротивление паропроницаемости слоев, расположенных от точки А до точки В, ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/мг; R_{T_i} – сопротивление теплопередаче слоев, расположенных от точки А до точки В, ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт.

На рис. 5 представим зависимость величины $t_{н.к}$ от обобщенного конструктивного параметра $k_{об}$ для 12 рассмотренных ограждений.

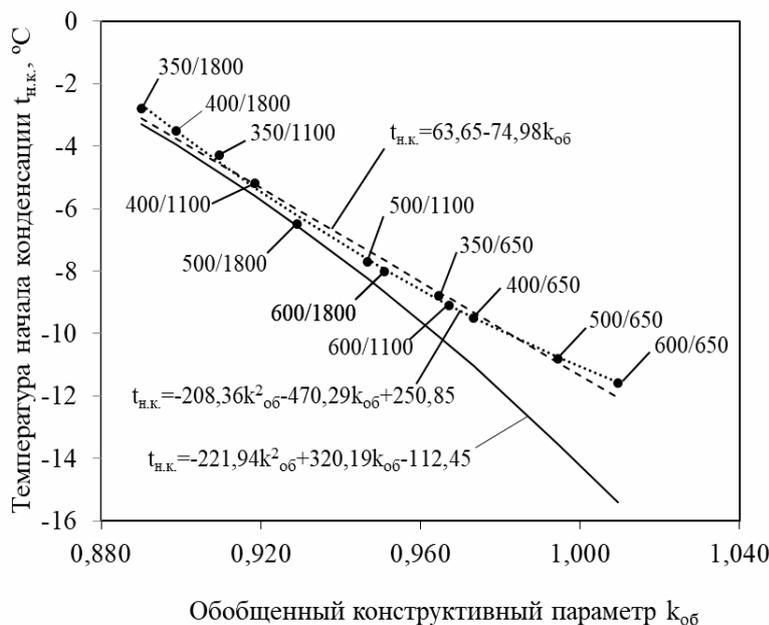


Рис. 5. Зависимость температуры начала конденсации $t_{н.к.}$ от обобщенного конструктивного параметра $k_{об}$

В результате анализа конструктивных особенностей 15 различных ограждений Куприяновым В.Н. была получена следующая квадратичная зависимость температуры начала конденсации $t_{н.к.}$ от конструктивного параметра ограждения $k_{об}$ [9]:

$$t_{н.к.} = -221,94k_{об}^2 + 320,19k_{об} - 112,45. \quad (8)$$

Уточним уравнение (8) для рассматриваемых нами 12 ограждений:

$$t_{н.к.} = -208,36k_{об}^2 - 470,29k_{об} + 250,85. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции для данного квадратичного уравнения составляет 0,9988. Также была проведена аппроксимация результатов по линейной зависимости:

$$t_{н.к.} = 63,65 - 74,98k_{об}. \quad (10)$$

Коэффициент корреляции для данного уравнения составляет 0,9942. Анализируя полученные уравнения, можно сделать вывод, что и квадратичная зависимость (9), и линейная зависимость (10) позволяют с достаточно высокой точностью характеризовать исследуемые конструкции. При этом уравнение (10) точнее характеризует взаимосвязь обобщенного конструктивного параметра $k_{об}$ и температуры начала конденсации $t_{н.к.}$ для рассмотренных нами 12 ограждающих конструкций. Согласно данной зависимости увеличение обобщенного конструктивного параметра $k_{об}$ снижает значение температуры начала конденсации $t_{н.к.}$.

Выводы:

1. Результаты проведенных исследований показывают, что за счет использования для отделки стен из газобетонных блоков марок D350-D600 разработанной ССС снижается температура начала конденсации $t_{н.к.}$.

2. Получены зависимости, при использовании которых можно с высокой точностью определять температуры начала конденсации $t_{н.к.}$ в стенах из газобетонных блоков марок D350-D600, отделанных различными видами ССС.

Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. Крайнов, Д.В. Влияние влагосодержания на теплозащитные свойства ограждающей конструкции из ячеистого бетона / Д.В. Крайнов, Р.А. Садыков // Вестник МГСУ. – 2011. – №3. – С. 403–410.

4. Логанина, В.И. Использование зольных алюмосиликатных микросфер в известковых сухих строительных смесях для отделки / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. – 2017. – №3. – С.6–9.

5. Логанина, В.И. Оценка трещиностойкости покрытий на основе теплоизоляционного состава для отделки газобетона / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №1. – С.30–35.

6. Логанина, В.И. Гидрофизические свойства покрытий для отделки стен из газобетона / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №3. – С.33–37.

7. Королева, Т.И. Исследование возможности конденсации водяного пара в толще многослойной конструкции наружного ограждения / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №2. – С.152–158.

8. 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.

9. 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. 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.

2. 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.

3. Kraynov, D.V. The effect of moisture content on the heat-shielding properties of the enclosing structure of aerated concrete / D.V. Kraynov, R.A. Sadykov // MGSU bulletin. – 2011. – №3. – P. 403–410.

4. Loganina, V.I. Use of ash aluminosilicate microspheres in calcareous dry construction mixtures for finishing / V.I. Loganina, M.V. Frolov // Herald of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2017. – №3. – P. 6–9.

5. Loganina, V.I. Evaluation of the crack resistance of coatings based on the thermal insulation composition for finishing aerated concrete / V.I. Loganina, M.V. Frolov // Regional architecture and engineering. – 2017. – №1. – P. 30–35.

6. Loganina, V.I. Hydro-physical properties of coatings for the finishing of walls from aerated concrete / V.I. Loganina, M.V. Frolov // Regional architecture and engineering. – 2016. – №3. – P. 33–37.

7. Koroleva, T.I. Investigation of the possibility of condensation of water vapor in the thickness of the multilayer structure of the external fence / T.I. Koroleva, N.V. Arzhaeva // Regional architecture and engineering. – 2018. – №2. – P. 152–158.

8. 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.

9. 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 691.5

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

Сергеева Кристина Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Физика
и химия»
E-mail: papsheva.ka@gmail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Sergeeva Kristina Anatolevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Physics and Chemistry»
E-mail: papsheva.ka@gmail.com

ОЦЕНКА СУПЕРГИДРОФОБНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АКРИЛОВОЙ СМОЛЫ

В.И. Логанина, К.А. Сергеева

Приведены сведения о влиянии кремнийорганической жидкости на гидрофобные свойства покрытий на основе акриловой смолы. Показано, что значение краевого угла смачивания на антиобледенительном покрытии составляет 151–154 град. При увлажнении в течение 72 часов наблюдается снижение значения краевого угла смачивания, особенно на контрольном покрытии, до 81–103 град. Однако при введении в рецептуру покрытия жидкости ГКЖ 136-41 значение краевого угла смачивания снижается незначительно. Рассчитана поверхностная энергия покрытий. Установлено, что введение кремнийорганической жидкости в состав на основе акриловой смолы способствует повышению поверхностной энергии покрытий.

Ключевые слова: супергидрофобное покрытие, кремнийорганическая жидкость, краевой угол смачивания, поверхностная энергия

ASSESSMENT OF SUPERHYDROPHOBIC PROPERTIES OF COATINGS ON ACRYLIC RESIN BASIS

V.I. Loganina, K.A. Sergeeva

Information on the effect of organosilicon liquid on the hydrophobic properties of coatings on acrylic resin basis is presented. It is shown that the value of the contact angle on the anti-icing coating is 151–154 degrees. At moistening for 72 hours, in the value of the contact angle decreases, especially on the control coating, up to 81–103 degrees. However, with the introduction of liquid GKZh 136–41, the decrease in the contact angle is insignificant. The surface energy of the coatings was calculated. It was found that the introduction of an organosilicon liquid in an acrylic resin-based composition increases the surface energy of the coatings.

Keywords: superhydrophobic coating, organosilicon liquid, wetting angle, surface energy

Одной из актуальных проблем в жилищном и коммунальном хозяйстве, строительстве является защита от обледенения поверхностей крыш, других строительных конструкций в условиях знакопеременных температур, сопровождающихся осадками, туманом, высокой влажностью.

В настоящее время на рынке антиобледенительных составов имеются покрытия «ПРОЛ», НИВАСАР-300, ULTRA GUARD СТОПЛЕД, ОС – 12-03, «Slider», «Baltek-Antiice» и др. [1–3].

При разработке составов для супергидрофобных покрытий руководствуются следующими положениями. Реальные поверхности металлических, цементных строитель-

ных конструкций являются шероховатыми. При смачивании водой таких поверхностей величина угла смачивания θ' определяется уравнением Венцеля – Дерягина [4–6]:

$$\cos\theta' = r \cdot \cos\theta, \quad (1)$$

где r – шероховатость поверхности, которая определяется как отношение истинной и кажущейся площадей поверхности.

В режиме смачивания Касси – Бакстера капля жидкости смачивает не всю поверхность, а лишь вершины рельефа поверхности (гетерогенный режим смачивания). В этом случае во впадинах рельефа находится воздух. Величина угла смачивания определяется уравнением Касси – Бакстера [7]

$$\cos\theta' = -1 + \Phi_s(\cos\theta + 1), \quad (2)$$

где Φ_s – доля площади поверхности, контактирующая с поверхностью капли.

Следовательно, супергидрофобные поверхности должны иметь малую долю площади поверхности, контактирующей с поверхностью капли воды. Таким образом, механизм антиобледенительного действия непосредственно связан с гидрофобностью поверхностного слоя, которая регулируется поверхностной энергией, и топографией поверхности [8–11].

В процессе эксплуатации супергидрофобных покрытий происходит изменение режима смачивания, что приводит к потере антиобледенительных свойств.

Таким образом, при разработке состава для антиобледенительного покрытия стремились к созданию гидрофобного поверхностного слоя и определенной топографии поверхности. Применялись следующие виды смол: акриловая смола А-01, акриловая смола DEGALAN®, высокохлорированная полиэтиленовая смола НСРЕ и силиконовая смола SILRES® MSE 100. В качестве наполнителя применяли аэросил марки R 972.

Проведенные нами ранее исследования показали, что применение в качестве связующего акриловой смолы А-01, акриловой смолы DEGALAN®, высокохлорированной полиэтиленовой смолы НСРЕ позволяет получить супергидрофобные покрытия, однако после 72 часов увлажнения покрытия не сохранили супергидрофобный эффект. Предложен антиобледенительный состав на основе кремнийорганической смолы SILRES® MSE 100 и аэросила марки R 972. Проведенные исследования показали, что покрытия на основе силиконовой смолы SILRES® MSE 100 5%-й и 10 %-й концентраций сохранили супергидрофобный эффект после 72 часов увлажнения. Краевой угол смачивания на растворной подложке после увлажнения составил более 150 град. Адгезия покрытий к подложке, оцененная методом решетчатого надреза в соответствии с ГОСТ 15140-78 «Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии», после увлажнения составляет 1 балл [12–14].

В продолжение дальнейших исследований нами установлена возможность применения акриловой смолы А-01 в качестве связующего при разработке рецептуры антиобледенительного состава. Для повышения гидрофобного эффекта в рецептуру вводили гидрофобизирующую кремнийорганическую жидкость ГКЖ 136-41. В качестве подложек применяли металлические пластины профнастила кровельного «MR-20» с полимерным покрытием и образцы цементно-песчаного раствора. На пластину был нанесен состав антиобледенительного покрытия, после отверждения которого на поверхность наносилась капля воды. Краевой угол смачивания определялся методом лежащей капли.

Значения краевых углов представлены в табл. 1 и явно подтверждают наличие супергидрофобного эффекта при введении в рецептуру жидкости ГКЖ 136-41.

Так, значение краевого угла смачивания на антиобледенительном покрытии (растворная подложка) составляет 151град (контрольный состав), а при введении ГКЖ 136-41 в количестве 10 % от массы смолы – 154град. При увлажнении в течение 72 часов наблюдается снижение значения краевого угла смачивания, особенно на контрольном покрытии, составляющее 81 град (подложка пластины профнастила кровельного «MR-20») и 103 град (подложка из цементно-песчаного раствора). Однако

при введении жидкости ГКЖ 136-41 снижение краевого угла смачивания незначительно (рис. 1, 2).

Т а б л и ц а 1

Краевой угол смачивания на поверхности покрытия

Наименование подложки	Состав					
	Контрольный		С добавкой ГКЖ 136-41			
			1 % от массы смолы		10 % от массы смолы	
	До увлажнения	После увлажнения	До увлажнения	После увлажнения	До увлажнения	После увлажнения
Пластины профнастила кровельного «MR-20»	<u>152</u> 15	81	<u>157</u> 13	150	<u>162</u> 10	157
Цементно-песчаный раствор	<u>151</u> 22	103	<u>153</u> 18	150	<u>154</u> 15	151

П р и м е ч а н и е : под чертой приведены значения углов скатывания

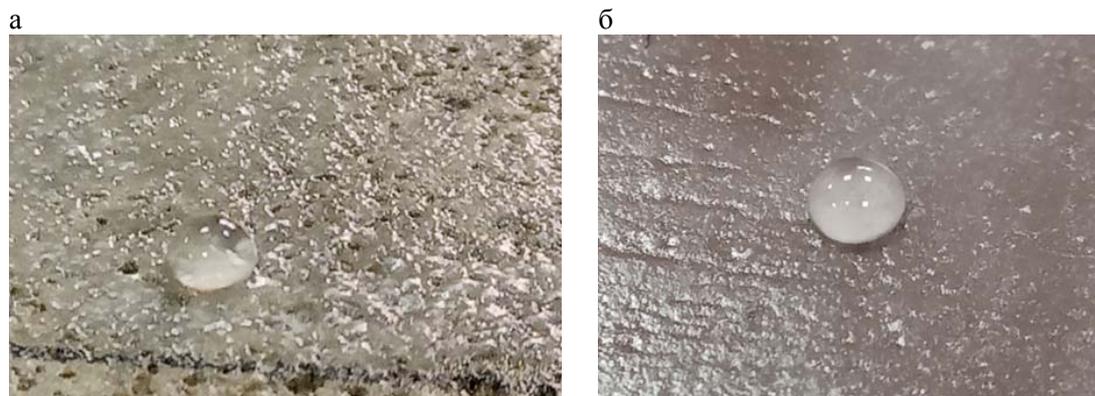


Рис. 1. Фото капли воды на поверхности покрытия с добавкой ГКЖ 136-41:
а – на подложке из цементно-песчаного раствора;
б – на подложке из профнастила кровельного «MR-20»

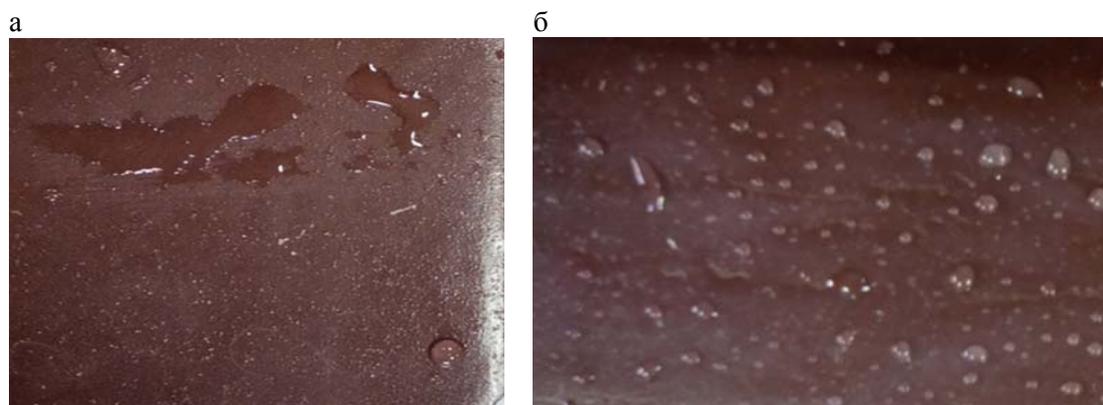


Рис. 2. Фото антиобледенительного покрытия на подложке из профнастила кровельного «MR-20» после увлажнения:
а – контрольный состав; б – с добавкой ГКЖ 136-41

Для оценки влияния жидкости ГКЖ 136-41 на свойства антиобледенительного покрытия была рассчитана поверхностная энергия покрытий с помощью значения критического поверхностного натяжения жидкости на границе с твердым телом (метод Г.А. Зисмана) [15]. Строили функциональную зависимость $\cos\theta=f(\sigma_{ж})$. [16, 17]. Данные измерения краевого угла показали, что для всех исследуемых образцов наблюдается линейная зависимость $\cos\theta=f(\sigma_{ж})$ (рис. 3). Экстраполируя зависимость $\cos\theta=f(\sigma_{ж})$ на $\cos\theta=1$, получали значение критического поверхностного натяжения твердой поверхности (покрытия).

В табл. 2 представлены рассчитанные значения поверхностного натяжения покрытий.

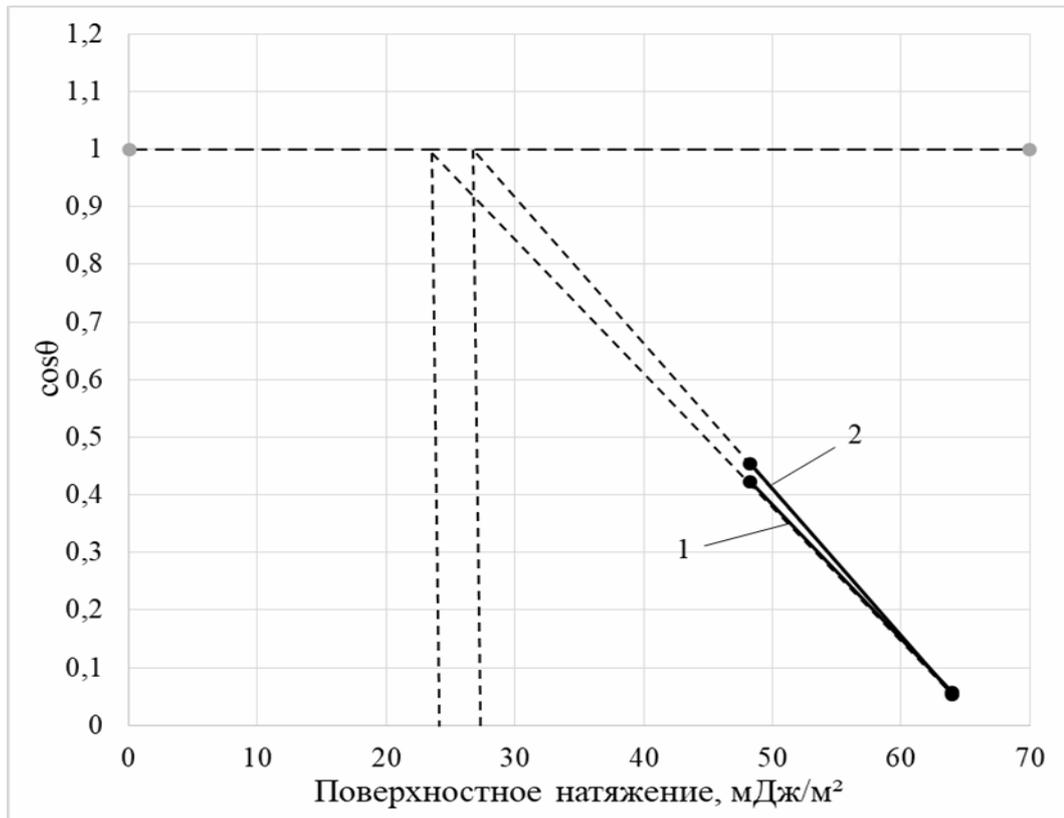


Рис. 3. Функциональная зависимость вида $\cos\theta=1=f(\sigma_{ж})$:
1 – покрытие на основе состава с добавкой ГКЖ 136-41;
2 – покрытие на основе контрольного состава (без добавки)

Т а б л и ц а 2

Значения поверхностного натяжения покрытий на основе акриловой смолы А01

Вид покрытия	Значение критического поверхностного натяжения покрытия, мДж/м ²
Контрольный (без ГКЖ 136-41)	26
С добавкой ГКЖ 136-41 в количестве 10 % от массы смолы	24

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 3 и в табл. 2, свидетельствуют о том, что значение критического поверхностного натяжения покрытий на основе состава с добавкой ГКЖ 136-41 меньше, чем у контрольного покрытия, что свидетельствует о более высоких супергидрофобных свойствах предложенного нами покрытия.

Список литературы

1. <https://www.elcon.ru/production/termo-anticorrosive/os12-03/>
2. http://ultra-ever-dry.info/katalog/komplekt_ultra_guard_stop_led_5_51/
3. <https://lytotirehe.tk/sistema-antiled.php>
4. Быховский, А.И. Растекание / А.И. Быховский. – Киев: Наукова думка, 1983. – 192 с.
5. Wenzel, R.N. Resistance of solid surfaces to wetting by water / R.N. Wenzel // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1936. – Vol. 28, No 8. – P. 988–994.
6. Дерягин, Б.В. О зависимости краевого угла от микрорельефа или шероховатости смачиваемой поверхности / Б.В. Дерягин // *Доклады АН СССР*. – 1946. – Т. 51, No 5. – С. 357–360.
7. Cassie, A.B. Wettability of porous surfaces / A.B. Cassie, S. Baxter // *Transactions of the Faraday Society*. – 1944. – Vol. 40. – P. 546–551. – Doi: 10.1039/tf9444000546
8. Бойнович, Л.Б. Супергидрофобные покрытия – новый класс полифункциональных материалов / Л.Б. Бойнович // *Вестник Российской АН*. – 2013. – Т.8, №1. – С.10–22.
9. Boinovich, L. Effect of wettability on sessile drop freezing: when superhydrophobicity stimulates an extreme freezing delay / L. Boinovich, A.M. Emelyanenko, V.V. Korolev, A.S. Pashinin // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30. – No. 6. – P. 1659–1668.
10. Boreyko, J.B. Delayed frost growth on jumping-drop superhydrophobic surfaces / J.B. Boreyko, C.P. Collier // *ACS nano*. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 1618–1627.
11. Mishchenko, L. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets / L. Mishchenko, B. Yatton, V. Bahadur [et al.] // *ACS nano*. – 2010. – Vol. 4, No. 12. – P. 7699–7707.
12. Логанина, В.И. Выбор концентрации полимера при разработке рецептуры состава для антиобледенительного покрытия / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, К.А. Сергеева // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. – 2019. – №1(8). – С.19–22.
13. Логанина, В.И. Исследование кинетики замерзания капли воды на супергидрофобной поверхности покрытий / В.И. Логанина // *Вестник МГСУ*. – 2019. – Т. 14, вып. 4. – С.311–317.
14. Логанина, В.И. Сравнительная оценки адгезии льда к супергидрофобным и гидрофильным покрытиям / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, К.А. Сергеева // *Известия вузов. Строительство*. – 2019. – №4. – С.28–34.
15. Зисман, Г.А. Курс общей физики / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – 3-е изд., стер. – Москва : Наука, 1967-1968. – 3 т.
16. Фролова, М.А. Критерий оценки энергетических свойств поверхности / М.А. Фролова, А.С. Тутьгин, А.М. Айзенштадт, В.С., Лесовик Т.А. Махова, Т.А. Поспелова // *Наносистемы: физика, химия, математика*. – 2001. – №2(4). – С.120–125.
17. Айзенштадт, А.М. Основы термодинамики высокодисперсных систем горных пород для строительных композитов (теория и практика) / А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, А.С. Тутьгин. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. – 113 с.

References

1. <https://www.elcon.ru/production/termo-anticorrosive/os12-03/>
2. http://ultra-ever-dry.info/katalog/komplekt_ultra_guard_stop_led_5_51/
3. <https://lytotirehe.tk/sistema-antiled.php>
4. Bykhovsky, A.I. Distribution / A.I. Bykhovsky. – Kiev: Naukova Dumka, 1983. – 192 p.
5. Wenzel, R.N. Resistance of solid surfaces to wetting by water / R.N. Wenzel // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1936. – Vol. 28, No 8. – P. 988–994.
6. Deryagin, B.V. On the dependence of the contact angle on the microrelief or roughness of the wetted surface / B.V. Deryagin // *Doklady AN SSSR*. – 1946. – Vol. 51, No 5. – P. 357–360.
7. Cassie, A.B. Wettability of porous surfaces / A.B. Cassie, S. Baxter // *Transactions of the Faraday Society*. – 1944. – Vol. 40. – P. 546–551. – Doi: 10.1039/tf9444000546

8. Boynovich, L.B. Superhydrophobic coatings are a new class of multifunctional materials / L.B. Boynovich // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. – 2013. – Vol.8, №1. – P. 10–22.
9. Boynovich, L. Effect of wettability on sessile drop freezing: when superhydrophobicity stimulates an extreme freezing delay / L. Boynovich, A.M. Emelyanenko, V.V. Korolev, A.S. Pashinin // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30, No. 6. – P. 1659–1668.
10. Boreyko, J.B. Delayed frost growth on jumping-drop superhydrophobic surfaces / J.B. Boreyko, C.P. Collier // *ACS nano*. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 1618–1627.
11. Mishchenko, L. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets / L. Mishchenko, B. Yatton, V. Bahadur [et al.] // *ACS nano*. – 2010. – Vol. 4, No. 12. – P. 7699–7707.
12. Loganina, V.I. The choice of polymer concentration in the development of the formulation of the composition for the anti-icing coating / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, K.A. Sergeeva // *PGUAS bulletin: construction, science and education*. – 2019. – № 1 (8). – P.19–22.
13. Loganina, V.I. Study of the kinetics of freezing a drop of water on a superhydrophobic surface of coatings / V.I. Loganina // *MGSU bulletin*. – 2019. – Vol. 14, Iss. 4. – P.311–317.
14. Loganina, V.I. Comparative estimates of ice adhesion to superhydrophobic and hydrophilic coatings / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, K.A. Sergeeva // *News of universities. Construction*. – 2019. – P. 28–34.
15. Zisman, G.A. *General Physics Course* / G.A. Zisman, O.M. Todes. – 3rd ed., erased. – M.: Science, 1967-1968. – 3 p.
16. Frolova, M.A. A criterion for assessing the energy properties of a surface / M.A. Frolova, A.S. Tutygin, A.M. Aizenshtadt, V.S. Lesovik, T.A. Makhova, T.A. Pospelova // *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. – 2001. – №2 (4). – P.120–125.
17. Aizenshtadt, A.M. *Fundamentals of thermodynamics of finely dispersed rock systems for building composites (theory and practice)* / A.M. Aizenshtadt, M.A. Frolova, A.S. Tutygin. – Arkhangelsk: CPC NArFU, 2013. – 113 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.15

Акционерное общество «Атомэнергопроект»
(АО «Атомэнергопроект»)

Россия, 107996, г. Москва,
ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1,
тел.: (499) 962-81-89

Саргсян Акоп Егишович,
доктор технических наук, профессор,
академик МАИ при ООН,
начальник НИОДиС

Гукова Елена Геннадьевна,
главный специалист

Joint Stock Company «Atomenergoproekt»
(JSC «Atomenergoproekt»)

Russia, 107996, Moscow, 7, str. 1,
Bakuninskaya St.,
tel.: (499) 962-81-89

Sargsyan Akop Egishovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Academician of IAI UN,
Head of the Department

Gukova Elena Gennadievna,
chief specialist

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

А.Е. Саргсян, Е.Г. Гукова

На примере особо ответственного массивного сооружения, расположенного на слабых грунтах, продемонстрирована целесообразность применения свайных фундаментов для повышения устойчивости и несущей способности оснований. Сопоставление результатов расчетов показывает, что при реализации рассматриваемой схемы свайного фундамента значение осадки сооружения уменьшается более чем на порядок.

Ключевые слова: пространственная расчетная модель; свайный фундамент, ростверк, сваи, осадка, сопоставительный анализ, результаты расчетов, натурные наблюдения, основания, сооружение, грунтовая среда, приведенные расчетные характеристики, геологическое строение

ASSESSMENT IMPLEMENTATION OF PILE FOUNDATION EFFECTIVENESS

A.E. Sargsyan, E.G. Gukova

The feasibility of using pile foundations to increase the stability and bearing capacity of the bases has been demonstrated on the example of a particularly important massive structure on soft soils. Comparison of the analysis results shows that implementation of pile foundation considerably decreases the value of the structure settlement.

Keywords: 3D model; pile foundation, grillage, piles, settlement, comparative analysis, calculation results, field observations, foundations, construction, soil environment, given design characteristics, geological structure

Введение

Цель настоящей работы по данным натурных наблюдений – обосновать достоверность разработанной модели свайного фундамента [1–4], а также продемонстрировать целесообразность применения свайных фундаментов для повышения устойчивости и несущей способности оснований сооружений на примере массивного сооружения, расположенного на поверхности слабых грунтов.

Схема расположения сооружения в геологической структуре естественного основания представлена на рис. 1.

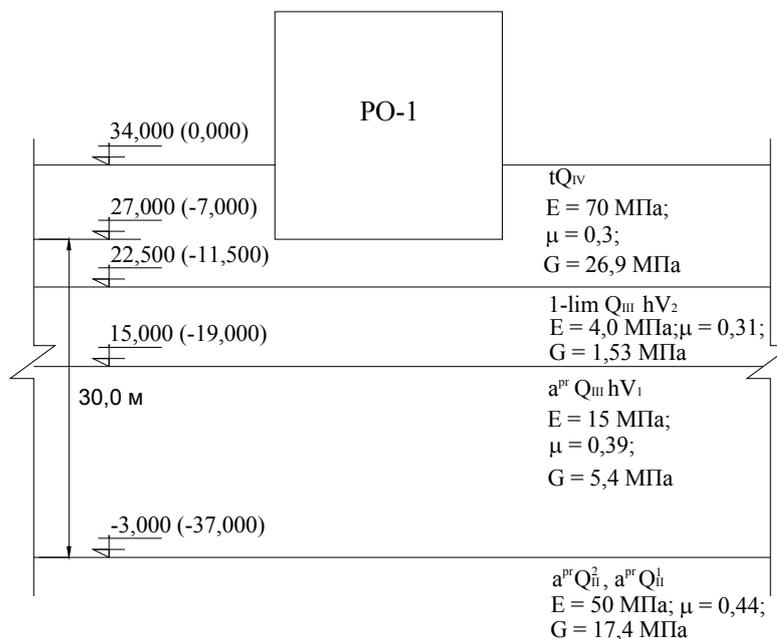


Рис. 1. Схема заглубления сооружения РО-1 в геологической структуре естественного основания

С ноября 1987 года на площадке размещения ведутся регулярные наблюдения за кренами и осадками основных зданий и сооружений.

Возведение сооружения было начато в 1972 году. Наблюдения за осадками начаты в марте 1981. В период наблюдения максимальная суммарная осадка составляет минус 449,5 мм, минимальная – минус 386,0 мм. График средних суммарных вертикальных смещений сооружения представлен на рис. 2 [5]. Результаты натурных наблюдений наглядно показывают, что средняя осадка сооружения превышает допустимую величину в соответствии с требованиями [4].

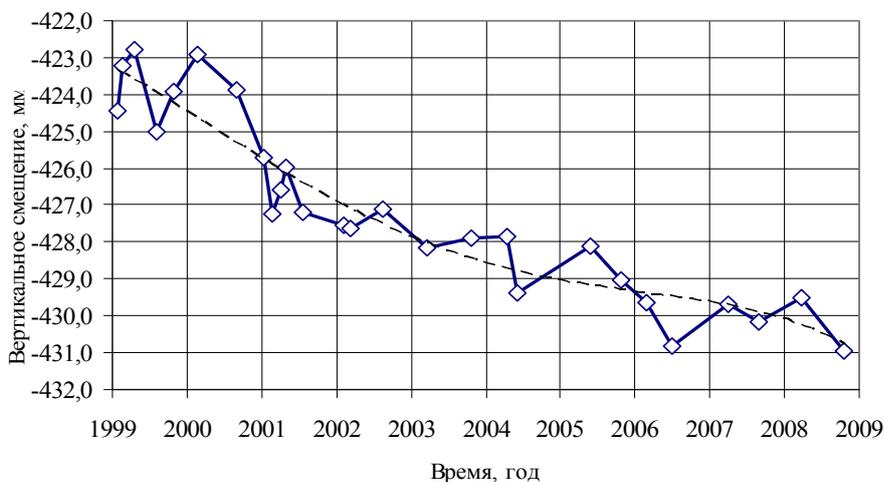


Рис. 2. График средних суммарных вертикальных смещений фундаментных конструкций сооружения

Разработка пространственной модели системы сооружение – основание

Расчетные параметры интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности подошвы ростверка определяются по выражениям, представленным в табл. 1 [1–4].

Т а б л и ц а 1

Выражения для определения эквивалентных интегральных статических жесткостей основания при перемещении ростверка прямоугольной формы в плане

Вид перемещения	Интегральная жесткость
Горизонтальное, по оси x	$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}$
Горизонтальное, по оси y	$k_y = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}$
Вертикальное, по оси z	$k_z = \frac{4G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)}$

Здесь μ – осредненное значение коэффициента Пуассона грунтов в активной зоне основания ростверка; $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – осредненное значение модуля сдвига грунтов в активной зоне основания ростверка; $A = L_x L_y$ – площадь подошвы ростверка прямоугольной формы в плане; $L_x, L_y (L_x \geq L_y)$ – длина и ширина ростверка (фундаментной плиты) в плане по координатным осям x и y соответственно.

Расчетные приведенные статические характеристики грунтов в активной зоне естественного основания:

$$\text{– модуль деформации } E = \frac{\sum E_i h_i}{H_a} = 38 \text{ МПа;}$$

$$\text{– коэффициент Пуассона } \mu = \frac{\sum \mu_i h_i}{H_a} = 0,4;$$

$$\text{– модуль сдвига } G = \frac{E}{2(1+\mu)} = 13,57 \text{ МПа.}$$

Интегральные статические жесткости естественного основания на подошве фундаментной конструкции принимают значения [1, 2]:

$$k_x = k_y = \frac{31,1 \cdot (1-\mu) G \sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)} = 2,58 \cdot 10^6 \text{ кН/м;}$$

$$k_z = \frac{4G\sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)} = 3,64 \cdot 10^6 \text{ кН/м.}$$

Общий вид конечно-элементной модели рассматриваемого сооружения (а) и с вырезом четверти (б) представлен на рис. 3.

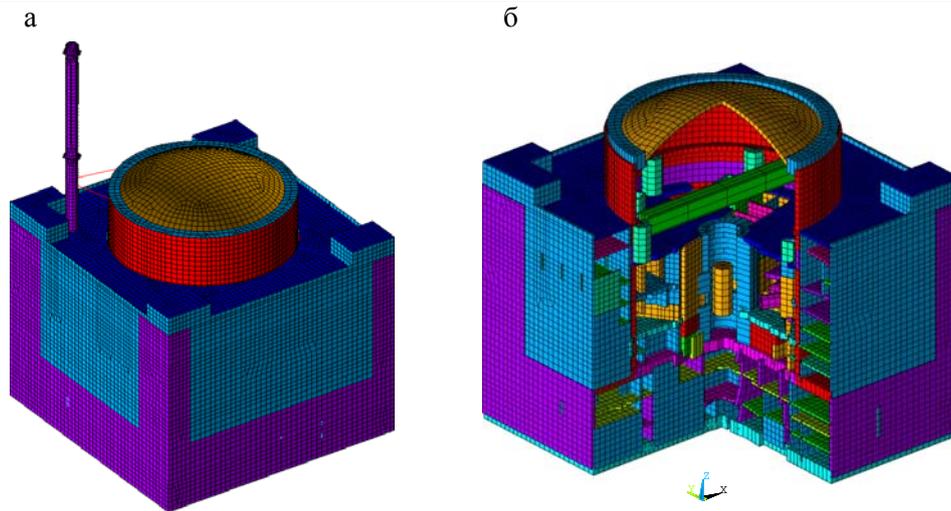


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели сооружения (а) и с вырезом четверти (б)

В пространственной конечно-элементной модели системы сооружения с основанием использовались следующие типы конечных элементов:

- четырехузловые оболочечные элементы для моделирования плоских элементов (стен, перекрытий и диафрагм);
- пространственные стержни (стойки и ригели);
- жесткие балки (для обеспечения передачи нагрузки с эксцентриситетом);
- массовые элементы для моделирования нагрузок от оборудования, которые могут быть рассмотрены как сосредоточенные. Разработка модели системы сооружение – основание была выполнена с применением вычислительного комплекса ANSYS.

Общее количество узлов в расчетной модели – 68720, конечных элементов – 76976. Порядок системы линейных алгебраических уравнений – 358512.

Общий вес сооружения с учетом веса технологического оборудования составляет $Q = 26,8 \cdot 10^5$ кН. Масса сооружения $M = 2,74 \cdot 10^5$ кН·с²/м.

Размеры фундаментной плиты сооружения в плане: $L_x = L_y = 67$ м.

Все соединения между элементами, моделирующими конструкции из монолитного железобетона, приняты жесткими.

Расчетные параметры интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной боковой поверхности и на подошве свай определяются выражениями, представленными в табл. 2.

При формировании результирующей реакции грунтовой среды на контактной поверхности свай исходили из следующих предположений:

- на стенках боковой поверхности свай при формировании растягивающих напряжений на контактной поверхности нарушается условие полного прилипания, если исходить из предположения, что грунт на растяжение не работает;
- при вертикальном перемещении вдоль продольной оси свай по контуру всей боковой поверхности свай грунты испытывают чистый сдвиг, а на подошве свай – сжатие;
- при перемещении свай с прямоугольным поперечным сечением в горизонтальном направлении в грунтовой среде в двух противоположных боковых поверхностях происходит сдвиг грунтов. В передней стенке боковой поверхности по направлению перемещения свай происходит сжатие, а на противоположной стенке – отрыв грунта от поверхности стенки свай;
- при перемещении свай в горизонтальном направлении на подошве свай грунты испытывают чистый сдвиг.

Эпюры контактных напряжений на боковой поверхности свай с круглым поперечным сечением при перемещении по направлениям координатных осей x , y , z представлены на рис. 4 [1, 3].

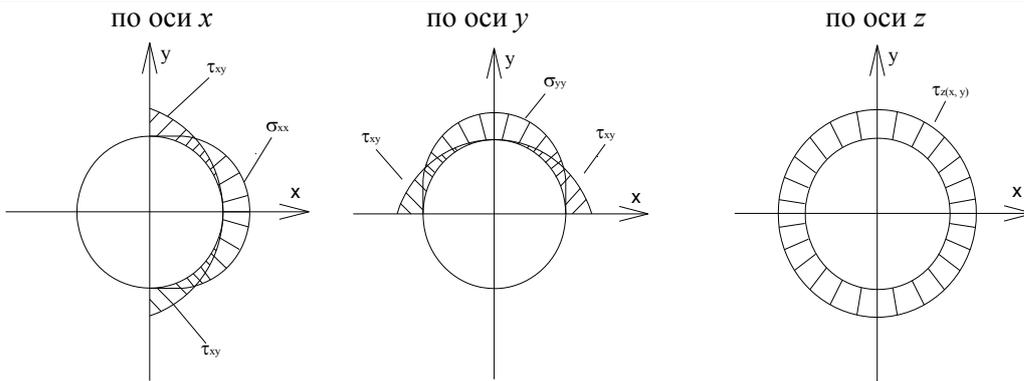


Рис. 4. Характер распределения контактных напряжений на боковой поверхности сваи с круглым поперечным сечением при перемещении в грунтовой среде по направлениям координатных осей x, y, z

Т а б л и ц а 2

Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности при общем характере перемещения сваи

Направление перемещения сваи	Интегральная жесткость грунтовой среды	
	На боковой поверхности сваи	На подошве сваи
Горизонтальное, по оси x	$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_{1x}}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{A_{2x}}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)R_s}$	$k_x = \frac{31,1(1-\mu_{sL})G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_{sL})R_s}$
Горизонтальное, по оси y	$k_y = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_{1y}}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{A_{2y}}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)R_s}$	$k_y = \frac{31,1(1-\mu_{sL})G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_{sL})R_s}$
Вертикальное, по оси z	$k_z = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_z}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s}$	$k_z = \frac{4G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(1-\mu_{sL})R_s}$

В табл. 2 введены следующие обозначения в зависимости от геометрической формы поперечных сечений сваи: A_{1x} – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сдвиг при перемещении сваи по направлению оси x ; A_{2x} – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сжатие при перемещении сваи по направлению оси x ; A_{1y} – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сдвиг при перемещении сваи по направлению оси y ; A_{2y} – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сжатие при перемещении сваи по направлению оси y ; A_z – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой или площадь боковой поверхности сваи, испытывающей сдвиг при перемещении сваи в вертикальном направлении; A_L – площадь подошвы сваи.

Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности сваи с круглым поперечным сечением обобщены в табл. 3.

Схема расположения свайного поля в плане представлена на рис. 5. Схема расположения сооружения со свайным фундаментом в геологической структуре основания сооружения приведена на рис. 6.

Диаметр свай с круглым поперечным сечением принят равным $d=0,6$ м, длина свай $h_c=18,0$ м.

Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности при общем характере перемещения сваи с круглым поперечным сечением

Направление перемещения сваи	Интегральная жесткость грунтовой среды	
	На боковой поверхности сваи	На подошве сваи
По горизонтальной оси x, y	$k_x = k_y = \frac{31,1(1-\mu_s)G_s\sqrt{h_c d}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{h_c d}}{\sqrt{\pi}(1-\mu_s)R_s}$	$k_x = k_y = \frac{15,55(1-\mu_{sL})G_{sL}d}{(7-8\mu_{sL})R_s}$
По вертикальной оси z	$k_z = \frac{31,1(1-\mu_s)G_s\sqrt{h_c d}}{(7-8\mu)R_s}$	$k_z = \frac{2G_{sL}d}{(1-\mu_{sL})R_s}$

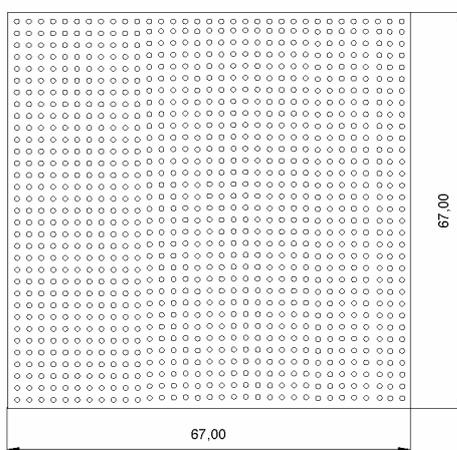


Рис. 5. Схема расположения свайного куста в плане

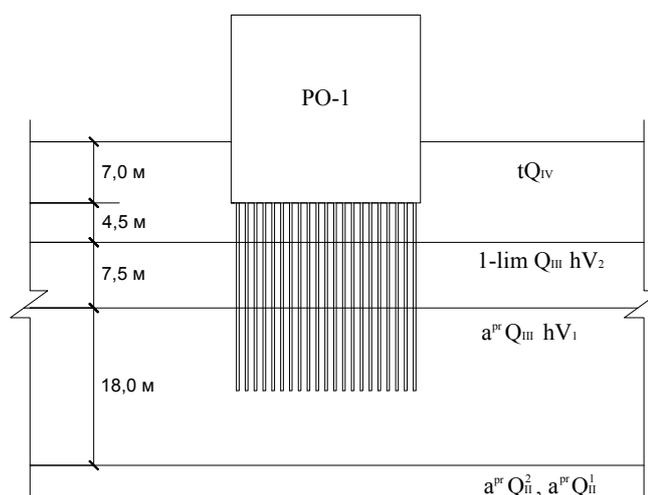


Рис. 6. Схема расположения сооружения со свайным фундаментом в геологической структуре основания

С учетом требований [3] расстояние между осями забивных висячих свай принято равным $\Delta_{x,y} = 2,0 \text{ м} \geq 3d = 1,8 \text{ м}$, расстояние от осей свай до края фундаментной плиты (ростверка) сооружения $\delta_{x,y} = 0,5 \text{ м} = 0,5d + 0,2 \text{ м}$.

Общее число свай в свайном кусте 1089 штук.

В табл. 3 введены следующие дополнительные обозначения:

$$G_s = \frac{\sum_{i=1}^n G_{s,i} h_i}{h_c} = 9,16 \text{ МПа}, \quad \mu_s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i h_i}{h_c} = 0,33$$

– приведенный статический модуль сдвига и коэффициент Пуассона грунтов основания по высоте зоны расположения свайного поля;

дугль сдвига и коэффициент Пуассона грунтов основания по высоте зоны расположения свайного поля;

$G_{sL} = 5,4 \text{ МПа}, \mu_{sL} = 0,39$ – модуль сдвига и коэффициент Пуассона грунтов на уровне подошвы свай;

$R_s = 4,2$ – корректирующий коэффициент, учитывающий эффекты взаимодействия сваи в составе свайного куста [4, 6].

Расчетные значения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности сваи с круглым поперечным сечением обобщены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Расчетные значения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности при общем характере перемещения сваи с круглым поперечным сечением

Направление перемещения сваи	Интегральная жесткость грунтовой среды, 10^4 кН/м	
	На боковой поверхности сваи	На подошве сваи
По горизонтальной оси x, y	$k_x = k_y = 4,35$	$k_x = k_y = 0,33$
По вертикальной оси z	$k_z = 3,43$	$k_z = 0,23$

Расчетные значения интегральных статических жесткостей основания сооружения от эффекта взаимодействия свайного куста с грунтовой средой представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Расчетные значения интегральных статических жесткостей основания сооружения от эффекта взаимодействия свайного куста с грунтовой средой

Направление перемещения свайного куста	Интегральная жесткость грунтовой среды, 10^7 кН/м
По горизонтальной оси x, y	$k_x = k_y = 5,10$
По вертикальной оси z	$k_z = 3,40$

Суммарные интегральные статические жесткости основания сооружения с учетом эффектов взаимодействия ростверка и свайного куста с грунтовой средой принимают следующие значения:

$$k_x = k_y = 5,358 \cdot 10^7 \text{ кН/м}; \quad k_z = 3,764 \cdot 10^7 \text{ кН/м}.$$

Интегральные жесткости основания сооружения на естественном основании и в случае применения свайного фундамента обобщены и представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Численные значения интегральных жесткостей основания сооружения на естественном основании и в случае применения свайного фундамента

Интегральные жесткости основания, 10^7 кН/м			
Естественное основание		Свайное основание	
$k_x = k_y$	k_z	$k_x = k_y$	k_z
0,258	0,364	5,358	3,764

Представленные в табл. 6 результаты наглядно демонстрируют, что жесткость основания сооружения при реализации рассматриваемого варианта свайного фундамента более чем на порядок превышает жесткость естественного основания сооружения.

Сопоставительный анализ результатов

Изолинии вертикальных перемещений фундаментной плиты сооружения для естественного и свайного оснований при НЭ представлены на рис. 7, 8.

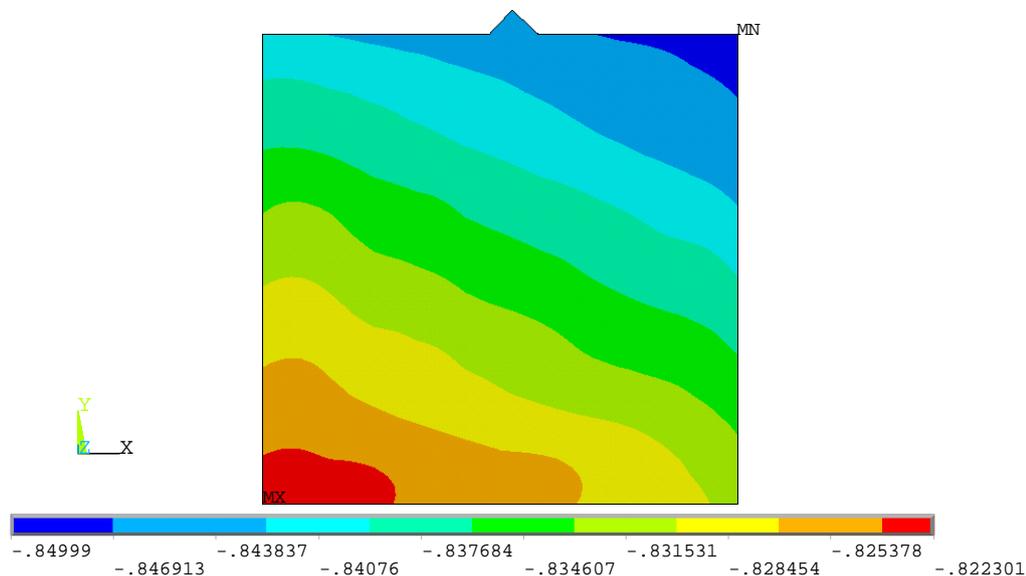


Рис. 7. Изолинии вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты сооружения для естественного основания при НЭ

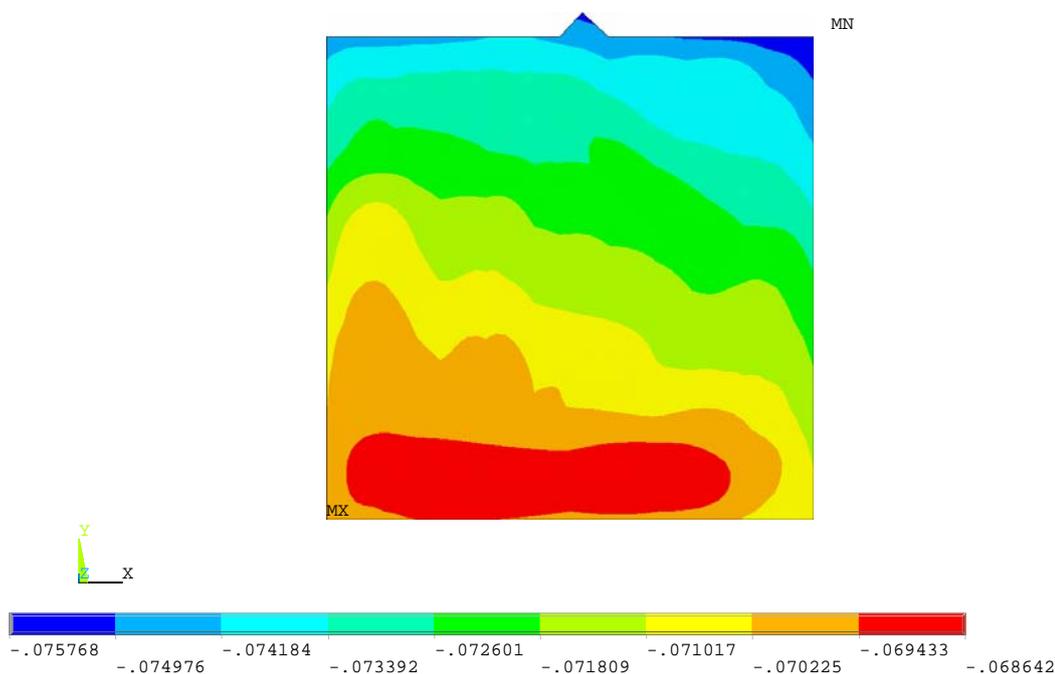


Рис. 8. Изолинии вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты сооружения для свайного основания при НЭ

Расчетные значения осадки (см. рис. 7) в среднем примерно в 1,9 раза превышают показанные на рис. 2 значения осадки по натурным наблюдениям. Данное обстоятельство согласуется с аналогичными результатами, представленными в работе [5]. Расхождение между данными натурных наблюдений и результатами расчетов обу-

словлено тем обстоятельством, что по расчету вычисленные осадки основания сооружения соответствуют всему периоду эксплуатации, включая период возведения сооружения, а результаты наблюдения относятся только к периоду эксплуатации с 1985 года.

Заключение

Сопоставление результатов расчетов вертикальных перемещений фундаментной конструкции сооружения на естественном основании (см. рис. 7) и на свайном основании (см. рис. 8) показывает, что при реализации рассматриваемой схемы свайного фундамента значение осадки сооружения уменьшается более чем на порядок. Данное обстоятельство подтверждает высокую эффективность реализации свайных фундаментов для возведения массивных сооружений на слабых грунтах.

Список литературы

1. Саргсян, А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций / А.Е. Саргсян. – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2013. – 550 с.
2. Саргсян, А.Е. Разработка и обоснование механической и математической модели основания сооружений атомных станций в виде однородного инерционного полупространства. Исследования по теории сооружений / А.Е. Саргсян, Е.Г. Гукова, А.С. Гришин // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – 2009. – №1.
3. Саргсян, А.Е. Разработка статической и динамической модели свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой / А.Е. Саргсян, В.С. Геращенко // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – 2010. – №2.
4. МР 1.5.2.05.999.0026 – 2011. Нормы проектирования оснований сооружений атомных станций. – М., 2011.
5. Глаговский, В.Б. Анализ осадок и кренов фундаментов реакторных отделений Балаковской АЭС / В.Б. Глаговский, А.Г. Зализский, А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова, О.М. Финагенов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2005. – №4. – С. 17–22.
6. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. – М., 2004.

References

1. Sargsyan, A.E. Dynamic and Seismic Stability of the NPP Structures / A.E. Sargsyan. – Sarov: RFNC–VNIIEF, 2013. – 550 p.
2. Sargsyan, A.E. Generation and proof for dynamic mechanical model of NPP structures foundation in the form of uniform inertial soil half-space / A.E. Sargsyan, E.G. Gukova, A.S. Grishin // The Investigations for Structural Analysis, V.A.Kucherenko Institute Herald. – 2009. – No. 1.
3. Sargsyan, A.E. Development of a static and dynamic model of pile foundations taking into account the effect of SSI / A.E. Sargsyan, V.S. Gerashchenko // The Investigations for Structural Analysis, V.A.Kucherenko Institute Herald. – 2010. – No. 2.
4. MR 1.5.2.05.999.0026 – 2011. Standards for the design of the foundations of nuclear power plant structures. – M., 2011.
5. Glagovsky, V.B. Analysis of settlement and heel of the foundations of the reactor compartments of Balakovo NPP / V.B. Glagovsky, A.G. Zalizsky, A.A. Kagan, N.F. Krivonogova, O.M. Finagenov // Foundations, foundation constructions and soil mechanics. – 2005. – No. 4. – P. 17–22.
6. SP 50-102-2003. Design and construction of pile foundations. – M., 2004.

УДК 624.9:69.032.22

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

Гучкин Игорь Сергеевич,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Ласьков Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Строительные конструкции»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Колос Валентина Сергеевна,
студент
E-mail: epon1911@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

Guchkin Igor Sergeevich,
Candidate of Sciences, Professor
of the department «Building structures»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Laskov Nikolay Nikolaevich,
Doctor of Sciences, Professor, Head
of the department «Building structures»
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Kolos Valentina Sergeevna,
student,
E-mail: epon1911@mail.ru

СБОРНО-МОНОЛИТНЫЙ КАРКАС ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ СЕВЕРА

И.С. Гучкин, Н.Н. Ласьков, В.С. Колос

Предлагается конструкция сборно-монолитного каркаса здания для строительства в северных районах. Несущими элементами каркаса являются сборно-монолитные колонны из трубобетона квадратного сечения, сборные неразрезные ригели из высокопрочного бетона с подрезкой торца, сборные пустотные (рядовые и связевые) плиты. Рекомендуется последовательность монтажа несущих элементов каркаса и узлов сопряжения в уровне междуэтажного перекрытия. Анализируется эффективность использования каркаса при строительстве высотных зданий. Приводится способ расчета колонны квадратного сечения из трубобетона.

Ключевые слова: высотное здание, сборно-монолитный каркас, колонна из трубобетона, неразрезной ригель, связевая плита, сопряжение колонны с перекрытием, расчет

PREFABRICATED MONOLITHIC FRAME OF A HIGH-RISE BUILDING FOR CONSTRUCTION IN THE NORTH

I.S. Guchkin, N.N. Laskov, V.S. Kolos

The construction of a precast-monolithic frame of the building for construction in the northern regions is proposed. Bearing elements of the frame are prefabricated monolithic columns of tubular concrete of square or rectangular sections, prefabricated crossbars of high-strength concrete with trimming of the end, prefabricated hollow core and ordinary slabs. The sequence of installation of the supporting elements of the frame and the nodes on the floor level is given. The effectiveness of the implementation of the frame in the construction of high-rise buildings is predicted. An example of the calculation of a pipe concrete column is given.

Keywords: high-rise building, prefabricated-monolithic frame, pipe-concrete column, continuous crossbar, bonding plate, interfacing of the column with the overlap, calculation

Значительная часть России расположена в районах с холодным климатом, продолжительной зимой и низкими отрицательными температурами. Это усложняет строительство монолитных зданий, требует длительного прогрева бетона для набора необходимой прочности. Именно в этих условиях наиболее часто встречается брак при изготовлении конструкций: промороженный каркас, пустоты из-за некачественной

укладки и уплотнения бетона. Анализ показывает, что примерно половина обрушений конструкций происходит на этапе их монолитного возведения [1].

Следовательно, строительство в условиях Севера нуждается в специальном подходе с акцентом на сборное и сборно-монолитное строительство.

Известно несколько вариантов каркасных зданий с железобетонными колоннами квадратного и прямоугольного сечений, нашедших применение в различных районах с холодным климатом. Среди них сборно-монолитные каркасы систем «SARET», «УДС», «АРКОС», «КУБ» и др., основными недостатками которых является монолитное, насыщенное в двух направлениях арматурой сопряжение элементов перекрытия с колонной (рис.1а), которое затрудняет качественное бетонирование узла и, как следствие, повышает вероятность брака. Кроме того, при монтаже ригеля требуется установка большого количества временных стальных стоек (рис. 1,б), увеличивающая трудозатраты и расход металла.

а



б



Рис. 1. Фрагменты сборно-монолитного каркаса системы «Аркос»: а – узел сопряжения ригеля с колонной; б – временные стальные стойки под ригелями

В предлагаемом варианте сборно-монолитного каркаса с целью повышения качества строительства, снижения расхода материалов и трудоемкости монтажа железобетонные колонны заменены на трубобетонные [2], а сборно-монолитные ригели на сборные. Форма поперечного сечения трубобетонной колонны принята квадратной. Надо признать, что эффект обоймы в работе бетонного ядра центрально-нагруженной колонны кольцевого сечения на 12-15 % выше, чем квадратного [3]. Однако квадратная форма более удобна с конструктивной точки зрения (проще решаются узлы примыкания стен и перекрытий). Кроме того, колонны квадратного сечения имеют дополнительные преимущества при больших эксцентриситетах, что характерно для верхних этажей высотных зданий [4].

Конструкция колонны

Секция трубобетонной колонны состоит из трубы-оболочки М1 (М2), бетонного ядра и армируется пространственным каркасом К1 (К2). Консоли выполняются из стальных пластин 2, 3, 4, причем пластины 3 размещаются в пазах оболочки и соединяются на сварке с вертикальными стержнями 1 каркасов К1 (К2). Соединение нижней и верхней секций оболочки по контуру сечения сварное. Нарастивание секций поэтажное. Оболочка колонны 1-го этажа крепится к фундаменту посредством стального опорного листа 5 и анкерных болтов.

В отличие от известных решений, нагрузка от перекрытия на бетонное ядро передается через опорный лист 2 и может дополнительно регулироваться посредством углубления пазов в оболочке – при этом компенсируется укорочение ядра от усадки (ползучести) бетона.

Конструкция трубобетонной колонны приведена на рис. 2.

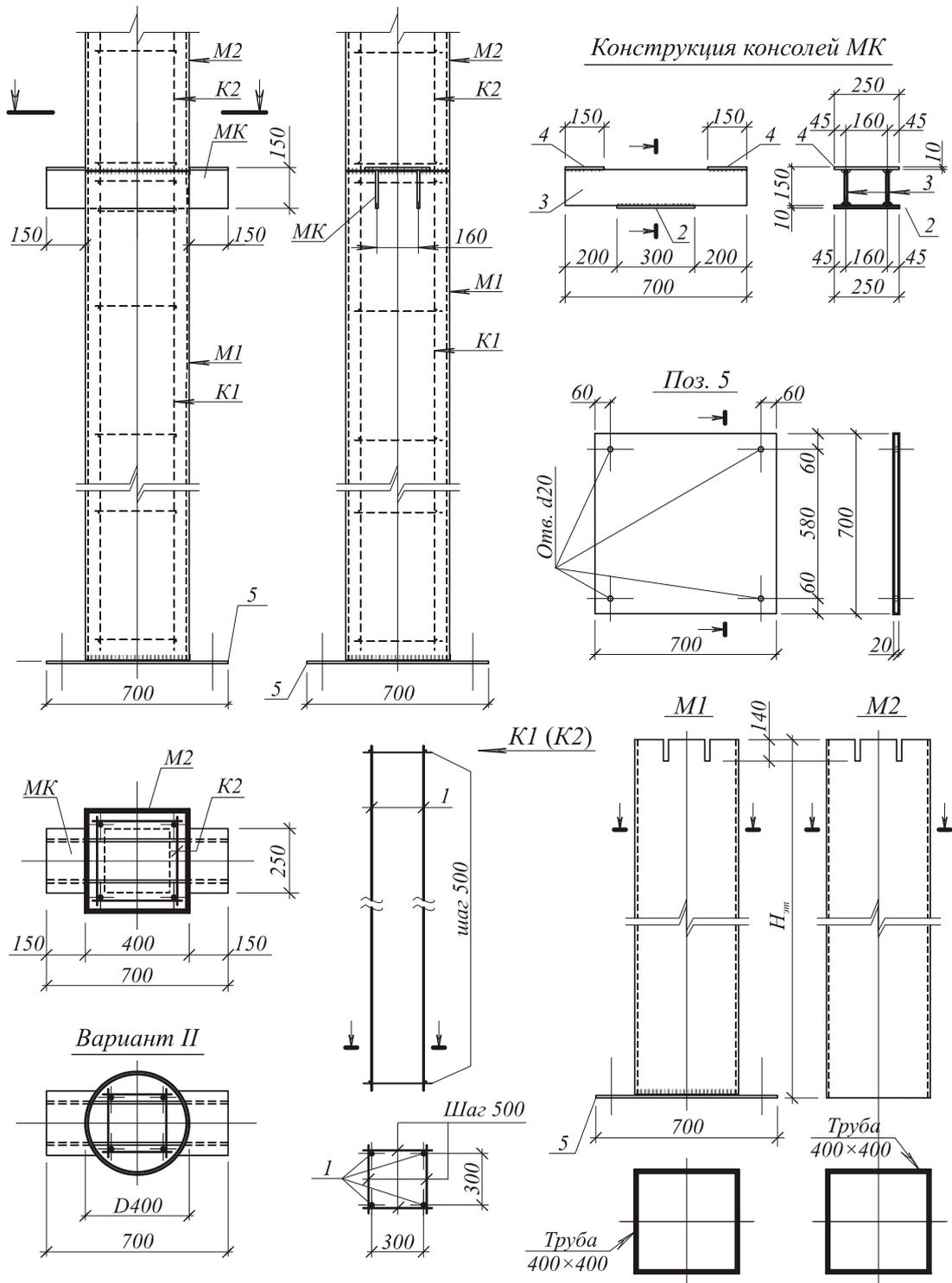


Рис.2. Конструкция колонны из трубобетона (размеры колонны ориентировочные для 30-этажного здания)

Прочность трубобетонной колонны квадратного сечения определяется по известной формуле А.Л. Кришана [3]. Применительно к трубобетонному элементу, армированному пространственным арматурным каркасом, формула приобретает вид:

$$N = (R_{б\text{я}} A + R_{с\text{с}} A_{с\text{с}} + 0,9 R_{с\text{т}} A_{с\text{т}}) \varphi,$$

где $R_{б\text{я}}$ – предел прочности бетонного ядра с учетом эффекта стальной обоймы (оболочки),

$$R_{б\text{я}} = R_b + 0,4 \mu R_{с\text{т}}; \mu = A_{с\text{т}} / A;$$

$A, A_{с\text{с}}, A_{с\text{т}}$ – площади сечений соответственно бетонного ядра, стержневой арматуры и оболочки; R_b и $R_{с\text{т}}$ – соответственно призменная прочность исходного бетона и предел текучести стальной оболочки; φ – коэффициент продольного изгиба.

Приведенная формула имеет недостатки и требует уточнения, однако для практических расчетов вполне применима и в целом дает возможность оценить эффективность использования трубобетона в колоннах высотных зданий.

Элементы перекрытий: плиты и ригели типовые по серии 1.020-1. Важно отметить, что их изготовление уже освоено на заводах строительной индустрии, включая северные районы, и не вызывает затруднений. В конструкцию элементов нами внесены изменения применительно к каркасу с колоннами из трубобетона (рис. 3).

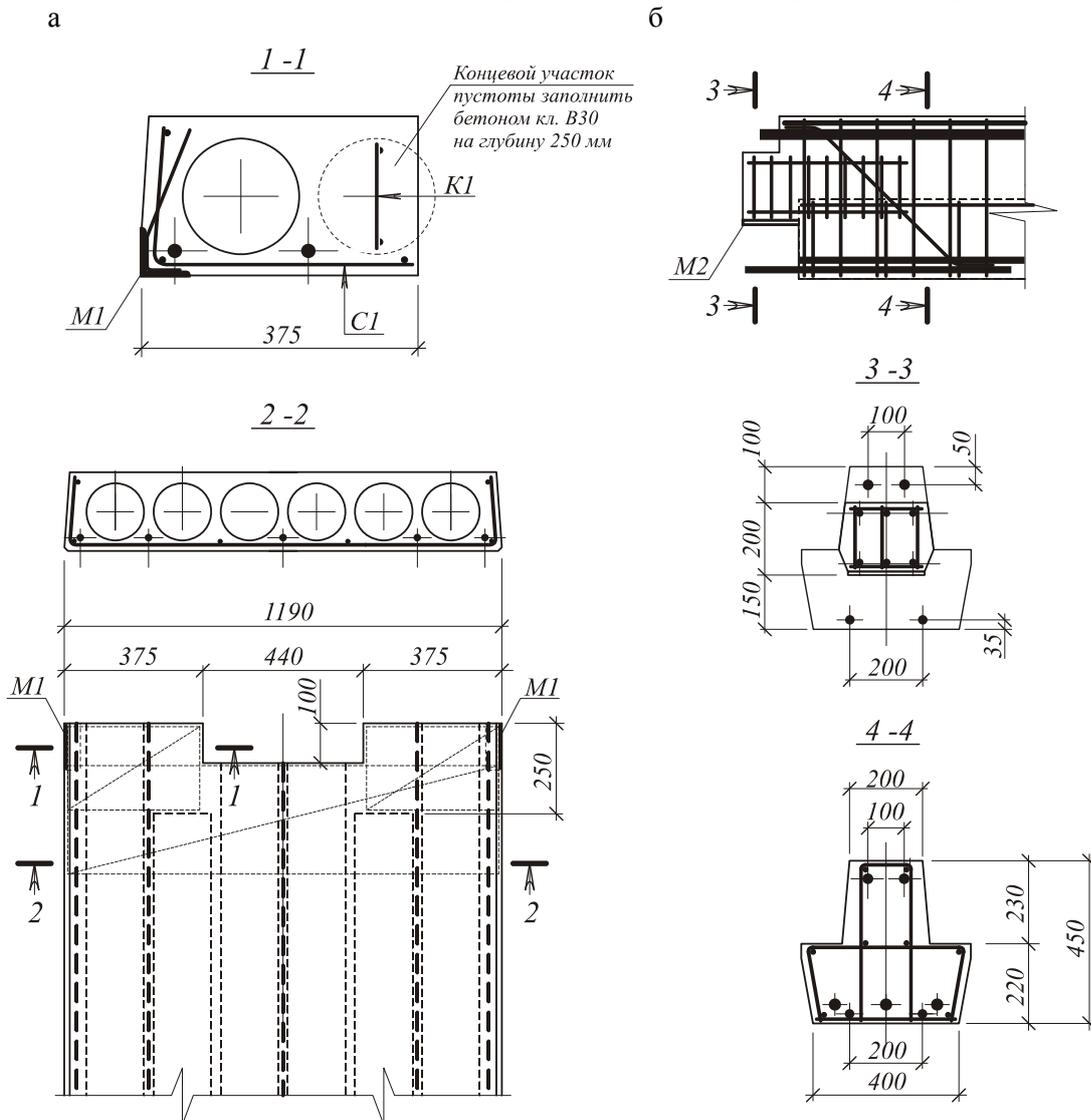


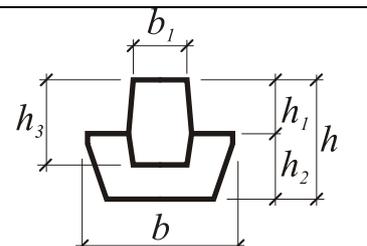
Рис. 3. Фрагменты опорных частей связевой плиты (а) и ригеля (б) перекрытий

Так, например, пустотные предварительно напряженные связевые плиты в торцах имеют вырезы под колонны, причем опорные консоли плит, в отличие от типовых, снабжены закладными деталями для соединения на сварке с ригелями и армируются сварными сетками (каркасами) – рис. 3,а.

Ригели сборные предварительно напряженные, с подрезкой торцов, жестко с помощью закладных деталей и выпусков арматуры соединяются с колоннами (рис. 3,б). В отличие от традиционных ригели неразрезные, а на концах имеют выпуски рабочих стержней в двух уровнях и изготавливаются из высокопрочного бетона классов В60...В80. В результате достигается экономия по расходу арматуры (15-20 %) и бетона (24-28 %). Номинальные размеры ригеля типового и нового приведены в таблице. Исходными материалами для высокопрочного бетона служат: цемент М500, щебень гранитный фракции 5-10, песок разной крупности, микрокремнезем (МК), суперпластификатор.

Номинальные размеры сечения ригеля $l = 6$ м

Серия Класс бетона	Размеры сечения, мм					
	h	h_1	h_2	h_3	b	b_1
1/020-1/87 В30	450	230	220	300	565	300
---- В80	450	230	220	300	465	200



Соединение ригеля с колонной и связевых плит с ригелем сварное с помощью закладных деталей.

Узел сопряжения колонны с элементами перекрытий показан на рис. 4.

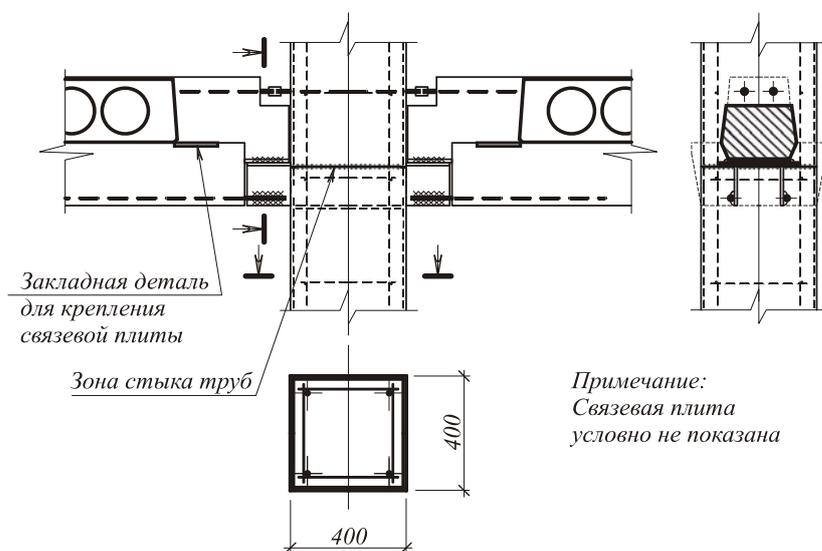


Рис. 4. Узел сопряжения колонны с элементами перекрытий

Предусматривается монтаж элементов каркаса в следующем порядке:

– оболочка М1 в сборке с опорной плитой, каркасом К1 и консолями МК устанавливается в проектное положение и крепится анкерными болтами к фундаменту, затем пластины 3 привариваются к продольной арматуре каркаса К1. Оболочка заполняется бетоном классов В40...В50 на гранитном щебне. В период низких отрицательных температур бетон прогревается электротепляком до набора прочности не менее 50 % проектной;

– устанавливается в проектное положение каркас К2 и соединяется на сварке с пластинами 3;

– устанавливается в проектное положение оболочка М2 и соединяется на сварке с оболочкой М1;

– в оболочку М2 устанавливаются элементы консоли следующего этажа.

Монтаж элементов вышележащих этажей каркаса выполняется аналогично.

Каркас здания базируется на фундаментной плите. Соединение бетонного ядра колонны с фундаментной плитой осуществляется с помощью выпусков арматуры, а оболочки (трубы) – анкерными болтами. Последовательность монтажа ригелей и плит перекрытий выполняется обычным способом

Пространственная жесткость каркаса обеспечивается: в плоскости рам – жестким сопряжением через сварные швы колонн с ригелями, а из плоскости – дисками перекрытий, диафрагмами и ядрами жесткости.

Выводы

1. Разработана конструкция сборно-монолитного каркаса здания, несущими элементами которого являются: трубобетонные колонны квадратного сечения с ядром из бетона класса В40...В50; сборные неразрезные предварительно напряженные ригели из высокопрочного бетона класса В60...В80 с подрезкой торца и выпусками рабочих стержней в двух уровнях; пустотные связевые панели перекрытия с усиленным опорным узлом.

2. Достоинства сборно-монолитного каркаса: простая технология изготовления и монтажа конструкций, минимальный объем монолитного бетона, низкий, относительно известных решений, расход металла и бетона.

3. Сборно-монолитный каркас рекомендуется для строительства зданий различного назначения: жилых, общественных и административно-бытовых с шагом колонн бхб и 6×9(м).

4. Использование разработанного сборно-монолитного каркаса в условиях Севера позволит снизить трудозатраты и сроки строительства зданий.

Список литературы

1. Афонасьев, А.А. Использование трубобетона в жилищном строительстве / А.А. Афонасьев, А.В.Курочкин// Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – №3. – С. 14–15.

2. Гучкин, И.С. Колонна из трубобетона для многоэтажных зданий / И.С.Гучкин, Н.А.Самарцева, Н.Н. Ласьков, С.А.Толушов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 99–101.

3. Кришан, А.Л. Прочность трубобетонных колонн квадратного сечения при осевом сжатии /А.Л.Кришан, А.С.Мельничук // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – №3.

4. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 5–8. – P. 219–225.

References

1. Afonasyev, A.A. The use of concrete in housing / A.A. Afonasyev, A.V. Kurochkin // Industrial and civil construction. – 2011. – №3. – P.14–15.

2. Guchkin, I.S. Pipe concrete column for high-rise buildings / I.S. Guchkin, N.A. Samartseva, N.N. Laskov, S.A. Tolushov // Regional architecture and engineering. – 2016. – №1. – P. 99.101.

3. Krishan, A.L. Strength of square concrete pipe columns under axial compression / A.L. Krishan, A.S. Melnichuk // MGTU Bulletin im. G.I. Nosova. – 2012. – №3.

4. Danilov, A. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials / A. Danilov, I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8. – No. 5–8. – P. 219–225.

УДК 624

Петрозаводский государственный
университет

Россия, 185910, г. Петрозаводск,
просп. Ленина, д.33

Селютина Любовь Федоровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и организация
строительства»
E-mail: selutinalf@mail.ru

Petrozavodsk State University

Russia, 185910, Petrozavodsk, 33,
Lenin avenue

Selutina Lyubov Fyodorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technology
and organization of construction»
E-mail: selutinalf@mail.ru

ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЯ ПОСТРОЙКИ 1914 ГОДА В ПОСЕЛКЕ ЭССОЙЛА

Л.Ф. Селютина

Представлены сведения о конструкциях перекрытий и стропильных ферм двухэтажного здания больницы в п. Эссойла. Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований долговременной прочности древесины на сжатие вдоль волокон.

Ключевые слова: пригруженные перекрытия, стропильная ферма, узел «ласточкин хвост», узел «шип-паз», прочность на сжатие древесины вдоль волокон, испытания

WOODEN STRUCTURES OF THE BUILDING BUILT IN 1914 IN THE VILLAGE OF ESSOILA

L.F. Selutina

Information on the structures of floors and trusses of a two-story hospital building in Essoila is given. The results of experimental and theoretical studies of a long-term compressive strength of wood along the fibers are presented.

Keywords: weighted floors, truss, node dovetail, node spike-groove, compressive strength of wood along

Исторические сведения

В Карелии сосредоточены большие лесные богатства, которые являются местным строительным материалом. Эссойла – поселок в Пряжинском национальном районе Республики Карелия. Возникновение поселка относится к XVI веку. В то время он входил в Сямозерское общество Олонецкого погоста.

Нами были исследованы деревянные конструкции перекрытий и крыши двухэтажного здания больницы 1914 года постройки. Деньги на строительство выделял сам царь, а возводили здание мастера старой закалки, настоящие профессионалы. Строили не по тендеру, строили хорошо, на века. Век это здание и простояло, а может, служило бы и дольше, но в 1997 году было решено, что содержать его невыгодно. Окна и двери заколотили, и с тех пор начался процесс его разрушения. А студёные ветра, дожди, иногда жаркое солнце ускорили процесс разрушения старинного здания.

По сохранившимся сведениям, больница построена из бревен, которые привозили по льду откуда-то из-за Сямозера [1]. По картам 1941 года видно, что берега озера, кроме западного, в болотах (рис. 1). Можно предположить, что именно там и заготавливали древесину. Подтверждением данного вывода являются карты 1985 г., где указано, что на западном берегу озера растут ели и сосны диаметром в узком конце до 25 см.

Эксплуатационное качество древесины с учетом фактора времени определяется прочностью древесины при длительной нагрузке. Изучение истории строительства и характеристика деревянных конструкций здания являются целью нашего исследования.



Рис. 1. Карта местности

Конструкция перекрытий

В конструкции перекрытий несколько слоев (рис. 2). Первый слой (верхний) – настил из керамического кирпича на растворе. Этот слой герметичен. Видно, что кирпич не лучшего качества: много битого, недожжённого и пережжённого. Скорее всего, это бракованные партии с какого-либо местного завода. Второй слой, на который и укладывался кирпич, – шпунтованная доска (с одной стороны доски расположен шип, а с другой – паз или, как его называют мастера, шпунт). Доска эта укладывалась на черепные бруски, которые, в свою очередь, крепились к балкам. Снизу на балки были набиты доски, на которые крепилась дранка и наносилась штукатурка. Воздушная прослойка между герметичным слоем кирпича на растворе и слоем не менее герметичной штукатурки выполняла роль теплоизоляции.

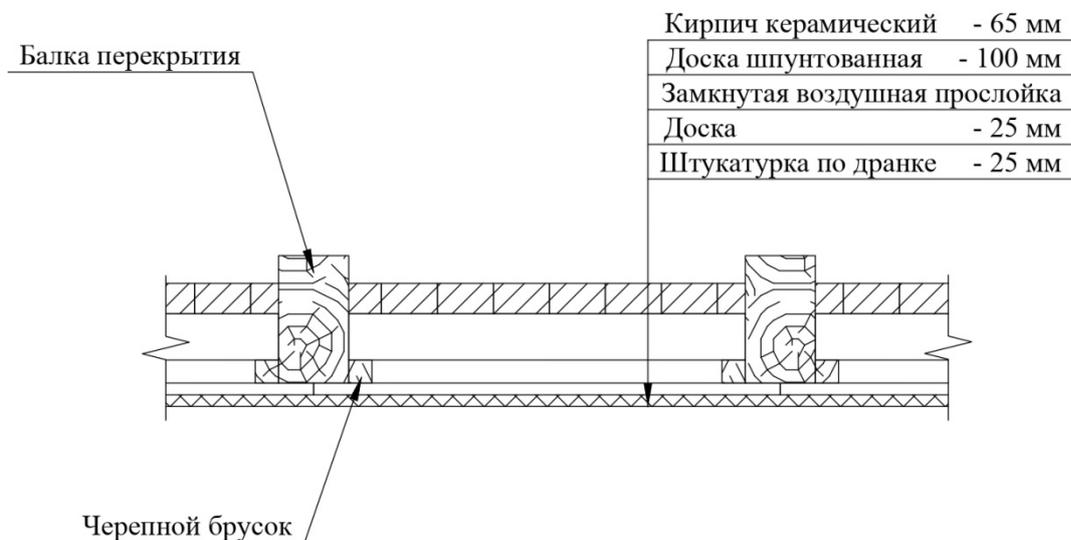


Рис. 2. Конструкция междуэтажного перекрытия здания

Такие пригруженные перекрытия были не редкостью для конца XIX – начала XX в. в различном исполнении: настил под кирпич иногда из плах делался, под кирпич войлок стелили и т.п. Делались они для устранения гулкости и для ускорения процесса протекания осадков здания: благодаря такому решению раньше можно было печи ставить и обшивать здание. Такие перекрытия – не самые низкие по стоимости, и применение их дает преимущества в сроках возведения здания, что в климатических условиях Сямозерья имело главное значение. Больница – объект социально значимый, и ждать целый год, чтобы стены осели, никто не мог. Предположительно, что именно по этой причине строители решили использовать пригруженные кирпичом перекрытия. Осадки прошли гораздо быстрее.

Конструкция стропильных ферм

Стропильные фермы выполнены из окантованных бревен диаметром 400 мм (рис. 3). Использованы ели возрастом около 150 лет к началу строительства здания. (Возраст древесины подсчитан по годичным кольцам.)

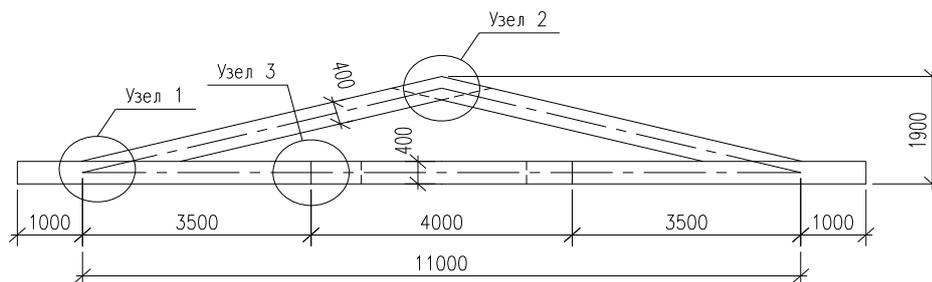


Рис. 3. Схема фермы

Карниз выполнен выпуском бревна нижнего пояса фермы, а в бревне нижнего пояса в месте опирания его на верхний венец выбирается паз полукруглой формы (рис. 4).



Рис. 4. Узел 1 (карнизный узел)

Соединение верхнего и нижнего поясов фермы выполнено в «ласточкин хвост» (рис. 5).



Рис. 5. Узел 1

В коньковом узле выполнено соединение «шип–паз» (рис. 6).

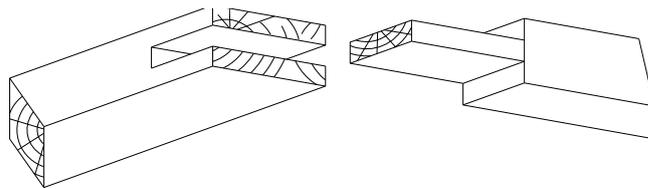


Рис. 6. Узел 2 (коньковый узел)

Выполнение ферм из крупных бревен с прочными и надежными узловыми соединениями определило долговечность и надежность несущих конструкций крыши здания. Данный вывод согласуется с результатами экспериментально-теоретических исследований куполов, выполненных Миряевым Б.В. и Городновым И.И. при изучении напряженно-деформированного состояния покрытия [2].

Пространственная устойчивость крыши в горизонтальной плоскости обеспечивается бревнами нижнего пояса фермы и продольными бревнами (рис. 4, 7), соединенными в местах пересечения с помощью полукруглой выемки и образующими прямоугольные ячейки. Бревна, образующие эти ячейки, расположены параллельно стенам здания. Устойчивость в вертикальной плоскости обеспечивается верхним и нижним поясами фермы, выполненными из крупных бревен с прочными и надежными соединениями «ласточкин хвост», «шип–паз». По скатам крыши неизменяемость обеспечивается обрешеткой.

Узлы пересечения продольных и поперечных бревен чердачного перекрытия решены перепуском бревен (рис. 7).



Рис. 7. Узел соединения бревен нижнего пояса и продольного бревна



Рис. 8. Узел 3

Применение в соединениях металлических связей (болтов, скоб) незначительно (рис. 8).

Определение прочности древесины

Изготовлены малые стандартные образцы – призмы – для испытания на сжатие вдоль волокон.

Определение необходимого числа наблюдений при испытании древесины на прочность при сжатии вдоль волокон выполнено по п.7 [3].

Испытания малых стандартных образцов древесины конструкций здания больницы на сжатие выполнены на машине SHIMADZU. При предельной нагрузке происходило образование складки и смятие торцов образцов. Вид образца после испытания представлен на рис. 9. Диаграммы работы древесины на сжатие вдоль волокон представлены на рис. 10.



Рис. 9. Стандартный образец после испытаний

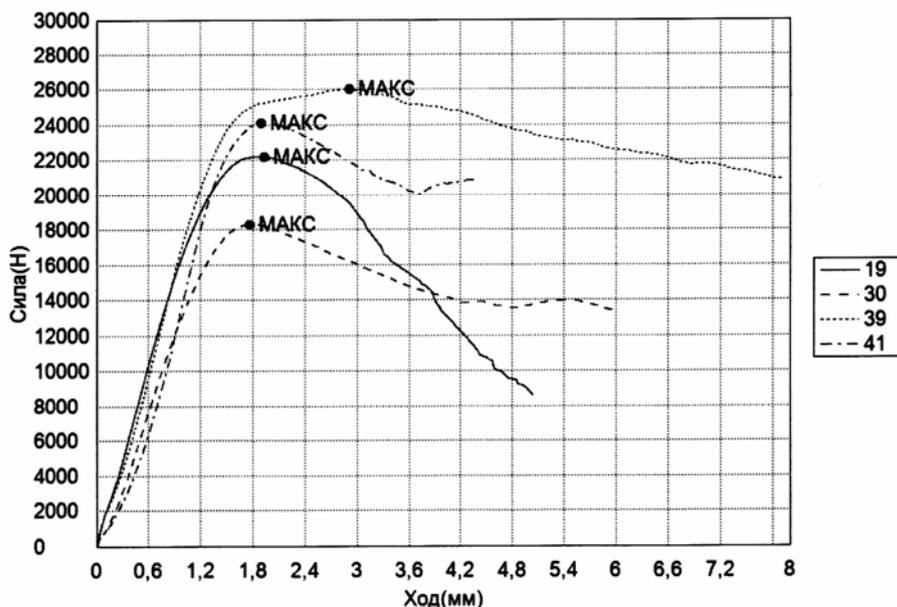


Рис. 10. Диаграммы работы древесины на сжатие вдоль волокон (справа показаны условные обозначения диаграмм по номерам образцов)

Определение среднего значения предела прочности на сжатие вдоль волокон (испытания 2019 г.)

Среднее значение предела прочности на сжатие вдоль волокон составляет 28,4 МПа; среднее квадратическое отклонение $S = 1,379$; вариационный коэффициент $V = 4,856 \%$; средняя ошибка среднего арифметического $m = 0,27$ МПа; показатель точности $P = 0,95 \%$.

Нормативное сопротивление древесины при сжатии вдоль волокон определено по формуле

$$R^H = M \left(1 - t \frac{M}{100} \right),$$

где M – среднее арифметическое; $M = 28,4$ МПа; t – показатель достоверности, $t = 1,96$; V – вариационный коэффициент, $V = 4,856 \%$.

Расчетное сопротивление древесины определено по формуле

$$R = \frac{R^H}{K},$$

где K – коэффициент безопасности по материалу, $K = 2,2$.

Далее рассчитано среднее значение прочности на сжатие вдоль волокон. Среднее значение предела прочности σ_t , определенное в результате испытаний 2019 г., составляет $\sigma_t = 11,62$ МПа.

Определение прочности древесины в год завершения строительства здания (1914 г.)

В начале изучена возможность определения прочности древесины по формуле

$$\sigma_\tau = \sigma_{ст} + \alpha (\lg \tau_{ст} - \lg \tau),$$

где σ_τ – предел прочности при заданной продолжительности действия нагрузки; $\sigma_{ст}$ – предел прочности при стандартных испытаниях; α – средний коэффициент длительного сопротивления древесины ели.

В [4, табл. 4.9] значение коэффициента α указано для эксплуатации в течение 10 000 сут. Для здания больницы время эксплуатации составило 37960 сут. Поэтому средняя длительная прочность древесины определена по [5, формула (III.44)]:

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_t}{k_{1(t)}},$$

где $k_{1(t)}$ – коэффициент длительной прочности древесины для заданного времени t .

Получено, что средняя длительная прочность древесины для срока действия неизменной нагрузки в течение 104 лет $\sigma_t = 11,6$ МПа, а прочность древесины в год завершения строительства (1914 г.) составляла 22,3 МПа.

Выводы

Исследованы деревянные конструкции перекрытий и крыши исторического здания постройки 1914 года в п. Эссойла.

Определены: число годичных слоев, средняя плотность древесины; выполнены испытания малых стандартных образцов.

Установлено, что средний предел прочности древесины на сжатие вдоль волокон после 104 лет эксплуатации конструкций составил 52 % (11,6 МПа) предела прочности в год завершения строительства (22,3 МПа).

Экспериментально-теоретические исследования показали определяющее влияние качества древесины и узловых соединений на долговечность и надежность строительных конструкций.

Результаты испытаний расширяют знания в области длительной прочности древесины, могут быть использованы в научной деятельности и включены в базу данных опытных величин пределов прочности древесины.

Список литературы

1. Подовинников, М.А. Устройство стропильной системы деревянного исторического здания 1914 года постройки в поселке Эссоила / М.А. Подовинников, Э.М. Осипов // StudArctic forum. – 2018. – Вып. 2 (10). – DOI: 10.19393/j 102. art. 2018. 292.
2. Миряев, Б.В. Купольное покрытие жилого дома / Б.В. Миряев, И.И. Городнов // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №4. – С.128–134.
3. Леонтьев, Н.Л. Техника статистических вычислений / Н.Л. Леонтьев. – М.: Лесная промышленность, 1966. – 304 с.
4. Боровиков, А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев; под ред. Б.Н. Уголева. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 293 с.
5. Основные закономерности длительной прочности древесины и пластмасс. – URL: [3net.ru> fulltext/rusles/osidreves/text](http://3net.ru/fulltext/rusles/osidreves/text).

References

1. Podovinnikov, M.A. Construction of a truss system of a historic wooden building built in 1914 in the village of Essoila / M.A. Podovinnikov, E.M. Osipov // StudArctic forum. – 2018. – Iss. 2(10). – DOI: 10.19393/j 102. art. 2018. 292.
2. Miryaev, B.V. Dome cover of a residential building / B.V. Miryaev, I.I. Gorodnov // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 4. – P.128–134.
3. Leontiev, N.L. Technique of statistical calculations / N.L. Leontiev. – M.: Forest industry, 1966. – 304 p.
4. Borovikov, A.M. Handbook of wood / A.M. Borovikov, B.N. Ugolev; ed. by B.N. Ugolev. – M.: Forest industry, 1989. – 293 p.
5. The main regularities of long-term strength of wood and plastics. – URL: [3net.ru> fulltext/rusles/osidreves/text](http://3net.ru/fulltext/rusles/osidreves/text).

УДК 69.059.032

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

ООО «Современные строительные
решения»

Саденко Денис Сергеевич,
кандидат технических наук, инженер
Эл. почта: sadenko_d@list.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Garkin Igor Nikolaevich,
Associate Professor of the department
«Quality management and technology
of building production»
E-mail: igor_garkin@mail.ru

LLC «Modern building solutions»

Sadenko Denis Sergeevich,
Candidate of Sciences, Engineer
E-mail: igor_garkin@mail.ru

ДЕФОРМАТИВНО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

И.Н. Гарькин, Д.С. Саденко

Предложена программа проведения натурных испытаний для проверки надежности, работоспособности и установления возможности безопасной эксплуатации строительных конструкций перекрытия общественного здания с дефектами в виде измененной геометрии и трещин. Определены физико-механические характеристики для оценки прочности, жесткости и трещиностойкости монолитного железобетонного перекрытия. Приведены результаты проверки работоспособности монолитных конструкций в условиях, соответствующих условиям их использования по прямому назначению. Определена несущая способность конструкций.

Ключевые слова: общественные здания и сооружения, дефекты монолитных строительных конструкций, деформационные трещины, техническая экспертиза, натурные испытания, несущая способность, предельное состояние, коэффициент запаса

DEFORMABLE PROPERTIES OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE FLOORS

I.N. Garkin, D.S. Sadenko

A program for conducting full-scale tests is proposed to check the reliability, performance and the possibility of safe operation of building structures with defects of altered geometry and cracks. Physico-mechanical characteristics were determined to assess the strength, stiffness and crack resistance of a monolithic reinforced concrete floor. During the experimental studies, the performance of monolithic structures was checked in conditions corresponding to real ones. Load-bearing ability was determined.

Keywords: reinforced concrete floors, public buildings and structures, defects in monolithic building structures, deformation cracks, bearing capacity, technical expertise, full-scale tests, ultimate condition, safety factor

Наряду с преимуществами монолитному строительству присущи и недостатки, вызванные ошибками при выполнении организационно-технологических решений, высокой интенсификацией и особенностями работы с материалами в летний и зимний периоды времени.

Рассмотрим дефекты, появившиеся при отрицательных температурах на объекте строительства здания общеобразовательной организации в г. Пензе. Представим метод их исследования на примере монолитного перекрытия с оценкой состояния желе-

зобетонных балок монолитного перекрытия техподполья с целью подтверждения нормального функционирования строительных конструкций с дефектами и возможности их безопасной эксплуатации [1]. Дефекты были выявлены на двух этапах производства работ. Первый вид дефектов в виде изменения геометрии ж/б балок (отклонение от проектных отметок нижней поверхности 2 конструкций) был выявлен на стадии снятия опалубки, второй – в виде вертикальных трещин на боковых поверхностях балок – после завершения работ по возведению всего несущего каркаса здания (рис. 1).



Рис. 1. Выявленные дефекты при производстве работ

Возможными причинами появления дефектов являлись технологические и деформационные факторы:

- неуплотненное замороженное песчаное основание под телескопическими стойками;
- раннее снятие опалубки и демонтаж поддерживающих стоек с последующим нагружением ж/б элементов перекрытия вышележащими конструкциями в момент набора прочности бетоном;
- перераспределение усилий в конструкциях в связи с межсезонными деформациями оснований.

По результатам визуально-инструментального обследования [2] установлено наблюдение за трещинами и предложена программа проведения натурных испытаний для подтверждения работоспособности конструкций и определения степени влияния дефектов на их несущую способность [3, 4].

Проведение работ по натурным испытаниям было разделено на несколько этапов. Первый этап – подготовительные работы:

- анализ имеющейся проектной и технической документации;
- освидетельствование конструкций в местах проведения испытаний для определения физико-механических характеристик материала, геометрических размеров, проверка армирования с определением диаметров, расположения арматуры и толщины защитных слоев разрушающими и ультразвуковыми методами;
- подготовка и установка инструментов и приборов (установка индикаторов часового типа, маяков на трещины, фиксация нулевых отметок в середине пролетов строительных конструкций), а также фиксация показаний ультразвукового прибора на каждой трещине для определения динамики их развития (увеличение глубины и ширины раскрытия);
- разметка площадок для установки грузов в помещении над испытываемыми конструкциями.

Второй этап – нагружение конструкций; нагружение участков конструкций производилось поэтапно (табл. 1). Значение контрольной нагрузки для проверки прочности определялось с увеличением нормативной нагрузки на коэффициент безопасности C , соответствующей несущей способности конструкции, определенной расчетом с уче-

том расчетных сопротивлений материалов и принятой схемы нагружения. Значение коэффициента безопасности C для изгибаемых конструкций балок из тяжелого бетона с армированием рабочей (продольной) арматурой класса А500 принималось равным 1,6.

Т а б л и ц а 1

Значения контрольной нагрузки с учетом коэффициента безопасности при поэтапном нагружении строительных конструкций

№ п/п	Местонахождение	Рекомендации по нагружению		Поэтапное нагружение строительных конструкций, кПа (кгс/м ²)		
		Нормативная нагрузка по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» т.8.3, кПа (кгс/м ²)	По требованию ГОСТ 8829-94 по назначению контрольных нагрузок с коэффициентом безопасности к нагрузке $C = 1.6$, кПа (кгс/м ²)	1-й этап	2-й этап	3-й этап
1	Помещение над конструкциями с дефектами	3,0 (300)	4,8 (480)	1,6 (160)	3,2 (320)	4,8 (480)

Каждый этап делится на части, нагрузка на каждой из которых не должна превышать 10 % контрольной нагрузки по прочности и по образованию и ширине раскрытия трещин и 20 % контрольной нагрузки по жесткости.

После приложения каждой части нагрузки испытываемые конструкции следует выдерживать под нагрузкой не менее 10 мин. Выдерживание конструкций после загрузки на каждом этапе продолжалось не менее 30 минут.

После загрузки конструкций во время выдержки под нагрузкой (указана в табл. 1) на каждом этапе необходимо производить тщательный осмотр состояния несущих конструктивных элементов, узлов, стыков и соединений на предмет возникновения новых дефектов и повреждений, а также наблюдение за динамикой развития трещин, появлением прогибов.

После выдерживания нагрузки на 4-м этапе производилось поэтапное разгружение конструкции в обратном порядке.



Рис. 2. Нагружение монолитного перекрытия (по заранее подготовленным площадкам распределения нагрузки)

Результаты проведения испытаний монолитных ж/б балок перекрытия техподполья представлены в табл. 2.

Контрольные показатели при проведении натуральных испытаний

№ п/п	Контролируемые показатели			
	Новые дефекты	Раскрытие трещин по маякам	Показания ультразвукового прибора (увеличение глубины трещины)	Фактический прогиб, мм
1-й этап	не выявлены	не выявлены	2620 (не увеличилась)	0,100
2-й этап	не выявлены	не выявлены	2630 (не увеличилась)	0,140
3-й этап	не выявлены	не выявлены	2620 (не увеличилась)	0,171

Натурные испытания показали, что:

– несущая способность монолитного железобетонного перекрытия подтвердилась; ее фактическое значение превышает нормативное более чем на 60 %, что обеспечивает работоспособность перекрытия в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению;

– изменение геометрии и появление трещин в балках перекрытия шириной раскрытия не более 0,3 мм (мелкие) не влияют на безопасную эксплуатацию конструкций, а также не противоречат требованиям нормативных документов;

– максимальный фактический прогиб после загрузки на 3-м этапе с коэффициентом безопасности к нагрузке 1,6 для ж/б балки монолитного перекрытия составил $f = 0,171$ мм; по нормативным документам вертикальный предельный прогиб f_u для данных конструкций балок составляет $f_u = 30$ мм ($l/200$).

Условия первой и второй групп предельных состояний выполняются. Нормальная эксплуатация строительных конструкций перекрытия в соответствии с условиями, предусмотренными в строительных нормах, по проекту обеспечивается.

Список литературы

1. Гарькин, И.Н. Оценка несущей способности монолитных железобетонных фундаментов: результаты испытаний в полевых условиях / И.Н. Гарькин, Д.С. Саденко, Н.В. Агафонкина // Инженерный вестник Дона. – 2020. – №1.
2. Гарькин, И.Н. Техническая экспертиза: технология приемки ремонтных работ на высотных сооружениях / И.Н. Гарькин, Н.В. Агафонкина // Вестник Евразийской науки. – 2019. – Т. 11, №4 (июль-август).
3. Данилов, А.М. Управление безопасностью объектов повышенного риска / А.М. Данилов, О.А. Голованов, И.А. Гарькина, Э.В. Лапшин // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2007. – Т.2. – С.109–112.
4. Шеин, А.И. Расчет монолитных железобетонных каркасов с учетом последовательности возведения, физической нелинейности и ползучести бетона / А.И. Шеин, О.Б. Завьялова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 5 (244). – С. 64–69.

References

1. Garkin, I.N. Assessment of the bearing capacity of monolithic reinforced concrete foundations: field test results / I.N. Garkin, D.S. Sadenko, N.V. Agafonkina // Engineering Journal of the Don. – 2020. – No. 1.
2. Garkin, I.N. Technical expertise: technology for the acceptance of repair work on high-rise buildings / I.N. Garkin, N.V. Agafonkina // Herald of the Eurasian Science. – 2019. – Vol. 11, No. 4 (July-August).
3. Danilov, A.M. Safety management of high-risk facilities / A.M. Danilov, O.A. Golovanov, I.A. Garkina, E.V. Lapshin // Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality». – 2007. – Vol.2. – P.109–112.
4. Shein, A.I. Calculation of monolithic reinforced concrete frames taking into account the sequence of construction, physical non-linearity and creep of concrete / A.I. Shein, O.B. Zavyalova // Structural mechanics and calculation of structures. – 2012. – № 5 (244). – P. 64–69.

УДК [72+69] : 620.91 – 049.35

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

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Городское
строительство и архитектура»
E-mail: ambereg@rambler.ru

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: vabereg@rambler.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Beregovoy Aleksander Markovich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Urban
construction and Architecture»
E-mail: ambereg@rambler.ru

Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Technology of building materials
and wood processing»
E-mail: vabereg@rambler.ru

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ЭНЕРГОАКТИВНУЮ КОНСТРУКЦИЮ НАРУЖНОЙ СТЕНЫ

А.М. Береговой, В.А. Береговой

Дан анализ трех конструктивных решений по использованию тепла солнечной радиации в архитектурно-строительном проектировании: прямой солнечный обогрев, «массивная стена» и плоский солнечный коллектор. Выполнена оценка теплоаккумулирующей способности второго конструктивного решения и энергоэффективности более усовершенствованной конструкции в виде одного из вариантов плоского солнечного коллектора. Показаны недостатки конструкции «массивная стена», сдерживающие ее применение в проектировании энергоактивных зданий. Установлено, что использование упрощенного варианта плоского солнечного коллектора по сравнению с упомянутыми конструктивными решениями повышает интенсивность поглощения и передачи в помещение тепла солнечной радиации, а также позволяет располагать специальный теплоизоляционный слой в наружной стене.

Ключевые слова: энергоактивная наружная стена, «массивная стена», плоский солнечный коллектор, солнечная радиация, теплопередача, теплоаккумулирующая способность

HEAT TRANSMISSION THROUGH ENERGY-ACTIVE DESIGN OF EXTERIOR WALL

A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy

The analysis of three design solutions for the use of solar radiation heat in architectural design is given: direct solar heating, a «massive wall» and a flat solar collector. The heat storage capacity of the second design solution and the energy efficiency of a more advanced design in the form of one of the options for a flat solar collector are evaluated. The design disadvantages of the «massive wall» are shown, which hinder its use in the design of energy- active buildings.

It is established, that the use of a simplified version of a flat solar collector in comparison with the mentioned design solutions increases the intensity of absorption and transfer of heat of solar radiation into the room, and also allows to place a special heat-insulating layer in the exterior wall.

Keywords: energy-active exterior wall, «massive wall», flat solar collector, solar radiation, heat transmission, heat storage capacity

Анализ решений по использованию тепла солнечной радиации в архитектурно-строительном проектировании показывает, что среди пассивных систем использования солнечной энергии широкую известность получили системы прямого солнечного обогрева и «массивная стена». С наибольшим эффектом эти системы используются при

строительстве зданий в странах с благоприятным климатом и большими значениями суммарной солнечной радиации [1].

При прямом солнечном обогреве солнечные лучи через светопроем падают на поверхность внутренней ограждающей конструкции, например стены или пола, конструктивное решение которой обеспечивает ей высокие теплоаккумулирующие свойства.

В конструктивном решении системы «массивная стена» накопление и передача тепла солнечной радиации в помещение происходят с помощью упомянутой выше наружной теплоаккумулирующей стены. На расстоянии 100...120 мм от ее поверхности располагают один-два слоя из светопрозрачного материала, например, стекла или пленки (рис. 1). Однако упомянутые системы использования тепла солнечной радиации отличаются малой энергоэффективностью. Так, в первом способе инсолированные внутренние поверхности помещения могут недостаточно прогреваться из-за небольшого коэффициента поглощения тепла солнечной радиации. У интенсивно окрашенных и затемненных поверхностей величина этого коэффициента больше, но это может ухудшить архитектурную выразительность интерьера.

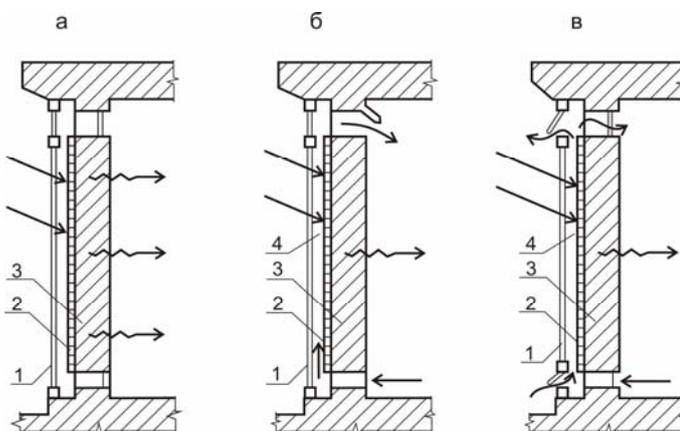


Рис. 1. Конструктивное решение системы «массивная стена»:

- а – в неконвективном режиме функционирования;
- б, в – в конвективном режиме функционирования;
- 1 – стекло; 2 – зачерненная поверхность; 3 – массивная стена;
- 4 – вентилируемая воздушная прослойка

Устройство «массивной стены» требует определенных материально-технических затрат, срок окупаемости которых, по данным зарубежных исследований, даже в условиях благоприятного солнечного климата Западной Европы составляет около 20 лет. Кроме того, определенные неудобства связаны с эксплуатацией больших по площади глухих участков ограждений, закрытых светопрозрачным экраном.

И в первом, и во втором способах использования тепла солнечной радиации отсутствует специальный адсорбер, эффективно поглощающий тепловую энергию солнца, хотя в конструкции «массивная стена» зачерненная поверхность аккумулирующего слоя обладает определенной способностью прогревать воздушную прослойку под светопрозрачным экраном.

Несмотря на указанные недостатки этих способов, в нашей стране продолжают исследования, направленные на повышение энергоэффективности конструктивного решения «массивной стены».

Так, в [2] представлены результаты натурного эксперимента на модели здания, южный фасад которого состоял из многослойной ограждающей конструкции, имитирующей «массивную стену» и содержащей аккумулирующий материал, воздушную прослойку, закрытую стеклопакетом. На основе эксперимента и теоретических исследований получены значения тепловых потоков, поступающих в помещение через теплоаккумулирующий слой, в зависимости от интенсивности солнечного излучения,

температуры наружного воздуха и времени суток. Особенностью этого конструктивного решения является отсутствие как специальной теплоизоляции под теплоаккумулирующим слоем, которая стала бы причиной быстрого затухания теплового потока, поступающего в помещение, так и механического способа побуждения нагретого в прослойке воздуха. Устройство специальной теплоизоляции существенно снизило бы тепловую эффективность предлагаемого конструктивного решения для территорий I и II климатических районов с небольшой активностью солнечного излучения.

В задачу данного исследования входило решение следующих вопросов:

– оценка теплоаккумулирующей способности упомянутой конструкции «массивная стена» и ее доли солнечного тепла в общей тепловой нагрузке здания, а также оценка энергоэффективности усовершенствованного варианта этой конструкции в виде плоского солнечного коллектора (ПСК);

– повышение интенсивности поглощения и передачи в помещение тепла солнечной радиации;

– использование специального теплоизоляционного слоя в конструкции ПСК.

Оценку теплоаккумулирующей способности Q_c конструкции «массивная стена» и ее доли тепла в общей тепловой нагрузке здания можно выполнить с использованием следующих выражений:

$$Q_c = \gamma \cdot c \cdot \delta \cdot F \cdot \Delta t \cdot z, \quad (1)$$

$$Q_s = (t_n^y - t_b) k \cdot F \cdot z, \quad (2)$$

$$k = \lambda / \delta, \quad (3)$$

$$t_n^y = \tau \cdot \alpha \cdot I \cdot R_o^{\text{экв}}, \quad (4)$$

$$Q_c = \gamma \cdot c \cdot \delta^2 \cdot Q_s \cdot \Delta t / (\tau \cdot \alpha \cdot I \cdot R_o^{\text{экв}} - t_b) \cdot \lambda \cdot z. \quad (5)$$

Здесь Q_s – величина теплового потока солнечной радиации; t_n^y – условная температура наружного воздуха.

В работе [3] показано, что для здания с высокой степенью энергоактивности теплоаккумулирующая способность Q_c данной конструкции и доля солнечного тепла от тепловой нагрузки здания могут оказаться достаточными для удовлетворения потребности помещения в отоплении:

$$Q_c = \gamma \cdot c \cdot \delta^2 \cdot \Delta t (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n) / (t_n^y - t_b) \lambda; \quad (6)$$

$$(t_n^y - t_b) \cdot k \cdot F = (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n).$$

Однако в большинстве случаев данная конструкция передает относительно незначительную долю тепла от тепловой нагрузки здания, большая часть которой $Q_{\text{доп}}$ приходится на основную систему отопления:

$$Q_{\text{доп}} = (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n) - (t_n^y - t_b) \cdot k \cdot F \cdot z, \quad (7)$$

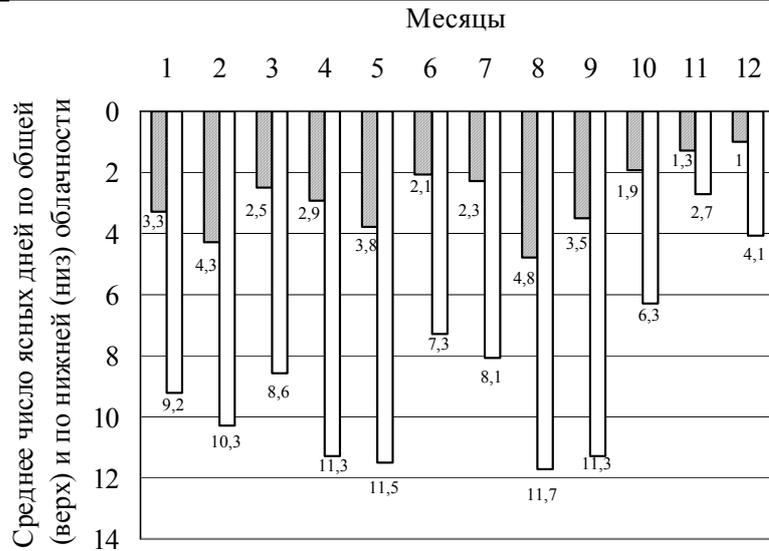
$$Q_{\text{доп}} = (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n) - [(t_n^y - t_b) \lambda \cdot Q_c / \gamma \cdot c \cdot \delta^2 \cdot \Delta t]. \quad (8)$$

Использование дополнительного тепла для зданий с той или иной степенью энергоактивности необходимо практически для всей территории нашей страны ввиду относительно большого числа градусо-суток отопительного периода и незначительного количества ясных дней в холодный период года (рис. 2)

Как уже упоминалось, система прямого солнечного обогрева не является энергоэффективной. Однако в отдельных случаях при благоприятных параметрах климата и солнечной радиации количество полученной солнечной энергии через лучепрозрачное ограждение $Q_s^{\text{ок}}$ может равняться теплопотерям здания Q_o

$$Q_s^{\text{ок}} = (I \cdot \tau \cdot \alpha \cdot F_{\text{ок}}), \quad Q_o = (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n). \quad (9)$$

Так как $Q_s^{\text{ок}} = Q_o$, то $(I \cdot \tau \cdot \alpha \cdot F_{\text{ок}}) = (q_k + q_{\text{вент}}) (t_b - t_n). \quad (10)$

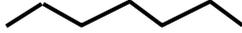


Ри. 2. Характерное число ясных дней для средней полосы европейской части России

Оценку энергоэффективности усовершенствованного варианта конструкции «массивная стена», а также решение второго и третьего вопросов поставленной задачи можно выполнить на основе рассмотрения энергоактивного участка наружного ограждения в виде плоского солнечного коллектора (ПСК). Энергоактивность упрощенной модели ПСК для климатических условий средней полосы европейской части России рассмотрена в [4].

Доля солнечного тепла, поступающего от энергоактивной конструкции, в тепловой нагрузке здания за отопительный период определена в зависимости от площади ПСК на южном фасаде здания с площадью отопления, превышающей 100 м^2 . На повышение энергоэффективности этой конструкции влияют два тепловых потока: тот, который поступает от солнечной радиации, и тот, который проходит через конструкцию из помещения. Величина последнего уменьшается за счет дополнительного слоя теплоизоляции под металлическим адсорбером. С учетом влияния только первого теплового потока найдены минимальные значения доли солнечного тепла, которая для площади ПСК, равной 50 м^2 , составила 12,5 %. Результаты натурного эксперимента указали на большую температуру нагрева адсорбера под воздействием солнечной радиации и высокую температуру поступающего в помещение воздуха (см. таблицу).

Тепловая эффективность ПСК

Наружный возд. $t, ^\circ\text{C}$	Профиль адсорбера	Количество стекол	Адсорбер $t_{\text{адсор}}, ^\circ\text{C}$	Поступающий возд. $t, ^\circ\text{C}$
$-2 ^\circ\text{C}$		2	$105 ^\circ\text{C}$	$60 ^\circ\text{C}$

Таким образом, упрощенная конструкция ПСК по сравнению с системами прямого солнечного обогрева и «массивная стена» обеспечивает более интенсивное поглощение и передачу в помещение тепла солнечной радиации. Это достигается путем использования зачерненного металлического адсорбера с волнообразным профилем, механического побуждения движения нагретого в прослойке воздуха, а затем его поступления в помещение. Кроме того, такая особенность конструктивного решения ПСК позволяет использовать специальный теплоизоляционный слой с наружной стороны стены.

Список литературы

1. Прямая, рассеянная и суммарная солнечная радиация в мире. – URL: https://yandex.ru/images/search?pos=2&img_url=https%3A%2F%2Fkonspekta.net%2Fstudopediainfo%2Fb (дата обращения: 22.01. 2020).
2. Щукина, Т.В. Регулируемый тепловой режим пассивной утилизации солнечного излучения для снижения нагрузок на системы отопления / Т.В. Щукина, Р.А. Шепс, М.Н. Жерлыкина // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – №11 (179). – С. 55–59.
3. Береговой, А.М. Теплоаккумулирующие свойства энергоактивной стены в системе естественной вентиляции и отопления здания / А.М. Береговой, В.А. Береговой, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №1. – С. 74–77.
4. Береговой, А.М. Энергоэффективные здания и их конструкции с учетом использования местных материалов: моногр. / А.М.Береговой, В.А. Береговой. – Пенза: ПГУАС, 2006. – 204 с.

References

1. Direct, scattered and total solar radiation in the world. – URL: https://yandex.ru/images/search?pos=2&img_url=https%3A%2F%2Fkonspekta.net%2Fstudopediainfo%2Fb (circulation date: 22.01. 2020).
1. Shchukina, T.V. Adjustable thermal mode of passive utilization of solar radiation to reduce loads on heating systems / T.V. Shchukina, R.A. Sheps, M.N. Zherlykina // Plumbing, heating, air conditioning. – 2016. – No. 11 (179). – P. 55–59.
3. Beregovoy, A.M. Energy efficient buildings and their design with the use of local materials / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, O.L. Viktorova // Regional architecture and engineering. – 2017. – №1. – P. 74–77.
4. Beregovoy, A.M. Energy efficient buildings and their design with the use of local materials: monograph / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy – Penza: PGUAS, 2006. – 204 p.

УДК 69.059.14

*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

Шейн Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: shein-ai@yandex.ru

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

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: shein-ai@yandex.ru

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

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

УСИЛЕНИЕ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕНДОВ СТРОПИЛЬНЫХ КРЫШ

А.И. Шейн, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев

Рассматриваются несущие элементы в ендовах стропильных деревянных крыш. Показано, что опорные части стропильных ног для таких крыш часто подвержены гниению и полностью выходят из строя, что приводит к аварийному состоянию строительных конструкций. Конструкции большинства крыш в ендовах имеют похожие технические решения, различающиеся в основном только углом наклона стропильных ног к горизонтали и размером их сечения. В связи с этим предлагается типовая схема усиления стропильных ног в ендовах. Техническое решение заключается в креплении стальной обоймы к здоровой части стропила и организации опорного узла на противоположном конце обоймы. Предлагаемая схема усиления может применяться при текущем ремонте зданий.

Ключевые слова: стропильная крыша, диагональное стропило, стропильная нога, ендова, усиление, стальная обойма, угол наклона стропильной ноги

REINFORCEMENT OF VALLEY BEARING ELEMENTS OF ROOF TRUSSES

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

Load-bearing elements in the valley of rafters wooden roofs are considered. It is shown that the supporting parts of the truss legs for such roofs are often subjected to rot and completely fail, which leads to an emergency state of building structures. Most roof structures in the valleys have similar technical solutions, which differ mainly only in the angle of inclination of the truss legs to the horizon and the size of their cross-section. In this regard, a typical model of strengthening the rafters in the valleys is proposed. The technical solution consists of attaching the steel cage to the strong part of the rafters and organizing a support node at the opposite end of the cage. The proposed amplification scheme can be used in the current repair of buildings.

Keywords: rafters roof diagonal, valley rafter, reinforcement, steel cage, angle of inclination of the rafters leg

Большинство разрушений строительных конструкций зданий в период эксплуатации связано с воздействием воды. Поэтому к вопросу содержания крыш, одного из самых главных функциональных элементов любого дома или здания, нужно подходить с особой тщательностью и предельной внимательностью.

До середины 50-х годов прошлого века активно шло строительство зданий сложной (Г-образной, П-образной, О-образной) конфигурации с деревянными стропильными

ми чердачными крышами. В качестве материала несущих конструкций стропильных крыш обычно использовалась древесина хвойных пород. На крышах сложных конфигураций, которые включают сразу несколько скатов, неминуемо получают внутренние стыки. Поэтому для зданий со сложными крышами характерно наличие ендов – сопряженных, перпендикулярных между собой частей крыш (рис. 1 и 2). В таких местах чаще всего скапливаются снежные осадки, дождевая вода, а также всевозможный мусор (рис. 3). Кроме того, их достаточно сложно обслуживать.

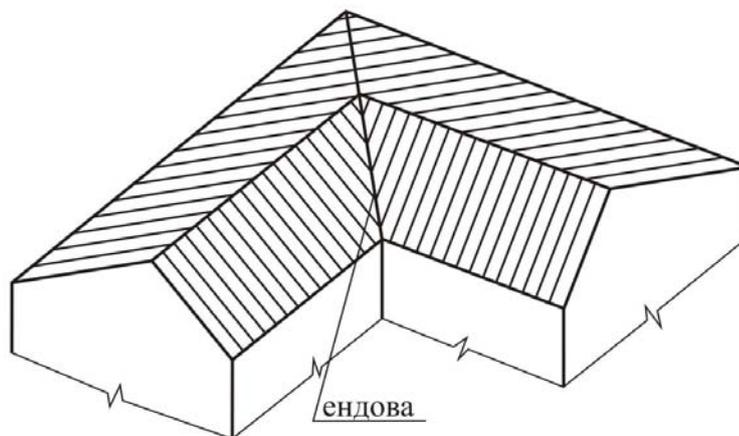


Рис. 1. Фрагмент сложной многоскатной крыши

Ввиду указанных факторов, несущие элементы крыш (стропильные ноги, нарожники, обрешетка) в ендовах очень часто подвержены намоканию и гниению. При этом опорные части стропильных ног полностью выходят из строя, что приводит к аварийному состоянию строительных конструкций зданий.

Пример такой сгнившей диагональной стропильной ноги ендовы показан на рис. 4.

Конструкции большинства крыш в ендовах имеют похожие технические решения, различающиеся в основном только углом наклона стропильных ног к горизонтали и размером их сечения. В связи с этим возможна разработка типовой схемы усиления стропильных ног в ендовах. При этом усиление стропильной системы можно сделать в рамках текущего ремонта, без вскрытия значительной части крыши, снятия обрешетки и замены дефектной стропильной ноги новой. Своевременное усиление стропил поможет предотвратить возможные разрушения кровли и огромные затраты на реконструкцию или капитальный ремонт.

Предлагаемое техническое решение усиления бревенчатой стропильной ноги заключается в креплении стальной обоймы из прокатных швеллеров к здоровой части стропила и организации опорного узла на противоположном конце обоймы. Обойму фиксируют болтами, опирая накладку нижней частью на мауэрлат или стену. При этом пришедшую в негодность часть бревна стропила необходимо отпилить и удалить до полностью здоровой древесины. Перед началом работ следует установить временные опоры, фиксирующие проектное положение стропильной ноги. После демонтажа сгнившей части стропила ее можно (при необходимости) заменить свежей древесиной аналогичного диаметра для обеспечения необходимой жёсткости.

На рис. 5 представлено предлагаемое техническое решение усиления диагонального стропила ендовы чердачной крыши.

Основные размеры и форма стальной обоймы определяются диаметром стропильной ноги d и углом наклона к горизонту α . Для большинства чердачных крыш диаметр брёвен для стропильных ног составляет $d = 18 - 20$ см, угол α колеблется в пределах от 4 градусов – для пологих крыш – и до 40 градусов – для крутых. Оптимальный номер швеллера для стальной обоймы – №22. После удаления загнившей части стропильной ноги по месту назначается длина исходной заготовки швеллера. Для обеспечения надёжной работы усиления рекомендуется заводить швеллеры на «здоровую» древесину стропильной ноги не менее $4d$ стяжными болтами диаметром 16–20 мм с шагом 20–30 см. Стропильная нога предварительно обрабатывается антисептическим составом.

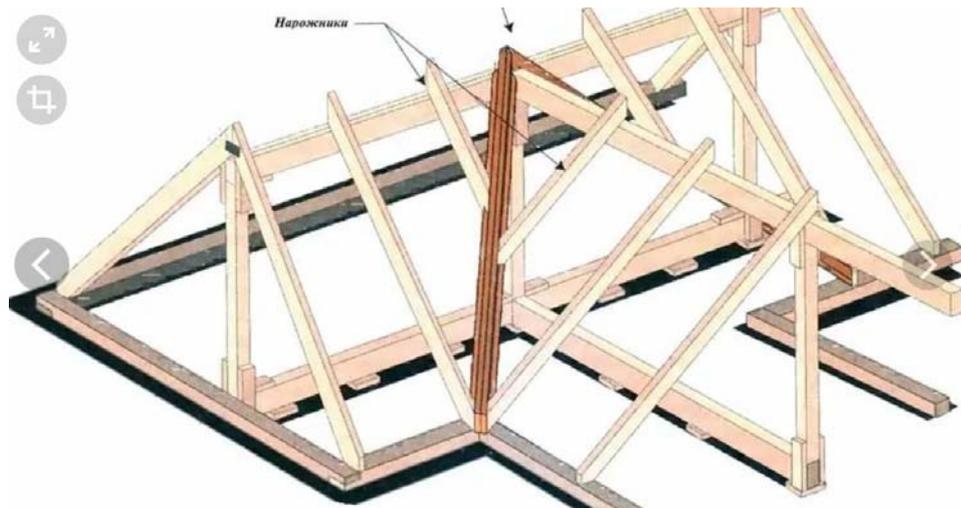


Рис. 2. Пример образования ендовы в месте сопряжения скатов крыши



Рис. 3. Скопление снега в нижней части ендовы



Рис. 4. Сгнившее в опорной части диагональное стропило ендовы

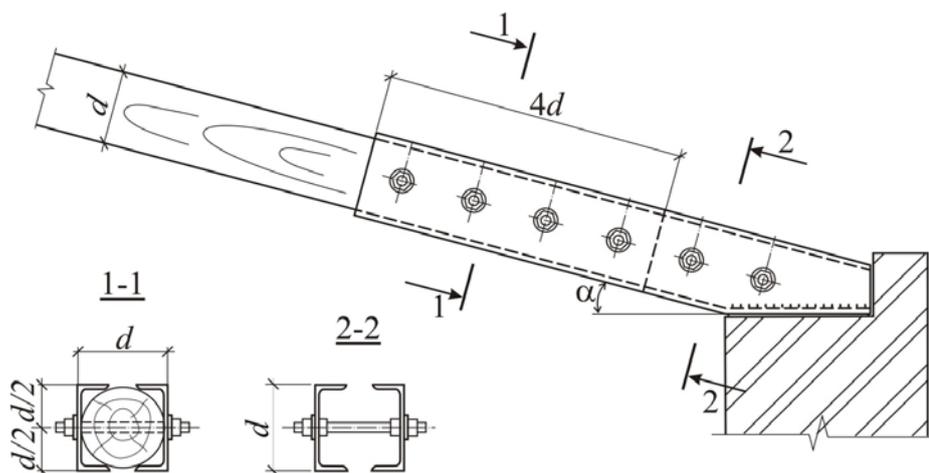


Рис.5. Техническое решение усиления диагонального стропила ендовы чердачной крыши

После определения угла наклона α стропильной ноги к горизонту и полной длины заготовки из стенок швеллеров в месте опирания удаляется часть в виде прямоугольного треугольника с углом α к нижнему поясу швеллера (см. рис. 5). Оставшаяся часть полки подгибается и приваривается к стенке, образуется опорный узел. Длина горизонтальной части опорного узла определяется размерами несущей стены. Подготовленные заготовки устанавливаются в проектное положение и соединяются стяжными болтами.

Если к диагональному стропилу примыкает нарожник, то для его опирания к швеллеру усиления предварительно приваривается опорный столик с упором. Стропильная нога и нарожник соединяются между собой стальными скобами.

Выводы. Предлагаемый узел усиления стропил ендов можно успешно применять при текущем ремонте крыш. Своевременное усиление стропил поможет предотвратить возможные разрушения кровли и огромные затраты на реконструкцию или капитальный ремонт. Размеры стальных элементов усиления определяются двумя параметрами стропильной крыши: диаметром стропильной ноги d и углом ее наклона к горизонту α .

Список литературы

1. Шеин, А.И. Опыт обследования зданий и сооружений / А.И. Шеин, С.В. Бакушев, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2017. – №5. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file
2. Зернов, В.В. Опыт использования запаса несущей способности стропильной фермы при реконструкции производственного цеха / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2018. – №7. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no7/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/7.20/at_download/file
3. Зернов, В.В. Поэтапное усиление строительных конструкций надземной части галереи подачи песка и щебня РБУ / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Я.А. Азимова // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №3. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/3.24/at_download/file
4. Шеин, А.И. Влияние конструктивного и эксплуатационного отказов на долговечность строительных конструкций / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2. – С.64–71.
5. Зернов, В.В. Вариант замены несущих строительных конструкций при реновации здания ресторана «Бочка» в г. Пензе / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Моде-

лирование и механика конструкций. – 2018. – №8. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/8.14/at_download/file

6. Шейн, А.И. Нормативно-правовые документы и регламенты в обеспечении надёжности зданий и сооружений / А.И. Шейн, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, И.В. Зернов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3 (32). – С.94–98.

References

1. Shein, A.I. Experience of inspection of buildings and structures / A.I. Shein, S.V. Bakushev, V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2017. – No. 5. – Systems' requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/5.16/at_download/file

2. Zernov, V.V. Experience of using the load-bearing capacity of a truss in the reconstruction of a production shop / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2018. – No. 7. – Systems' requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no7/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/7.20/at_download/file

3. Zernov, V.V. Step-by-Step strengthening of building structures of the aboveground part of the gallery for feeding sand and rubble of the RBU / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, Ya.A. Azimova // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – No. 3. – Systems' requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/3.24/at_download/file

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

5. Zernov, V.V. Variant of replacement of load-bearing building structures during renovation of the restaurant «Barrel» in Penza / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2018. – No. 8. – Systems' requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/8.14/at_download/file

6. Shein, A.I. Normative-legal documents and regulations in ensuring the reliability of buildings and structures / A.I. Shein, V.V. Zernov, M. B. Zaitsev, I.V. Zernov // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 3 (32). – P. 94–98.

УДК 519.633

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Бакушев Сергей Васильевич,**
доктор технических наук,
профессор кафедры «Механика»
E-mail: bakuchsv@mail.ru*Penza State University of Architecture and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Bakushev Sergey Vasilevich,**
Doctor of Sciences,
Professor of the department «Mechanics»
E-mail: bakuchsv@mail.ru

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ИДЕАЛЬНО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЁННОМ СОСТОЯНИИ

С.В. Бакушев

Получены дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для сплошной среды, нелинейной в отношении изменения объёма и идеально упругопластической в отношении изменения формы, находящейся в условиях осесимметричного идеально упругопластического деформирования как с учётом, так и без учёта геометрической нелинейности. Физические зависимости основаны на вычислении секущих модулей объёмного и сдвигового деформирования при аппроксимации диаграмм билинейными функциями. Согласно гипотезе о независимости, вообще говоря, друг от друга диаграмм нелинейного объёмного и идеально упругопластического сдвигового деформирования, рассмотрено пять основных случаев физических зависимостей, зависящих от взаимного расположения точек излома билинейных диаграмм объёмного и сдвигового деформирования. На первом участке диаграмм секущий модуль и объёмного, и сдвигового деформирования постоянен, на втором участке – секущий модуль объёмного деформирования является функцией объёмной деформации, а секущий модуль сдвига является функцией интенсивности деформаций сдвига. Модуль упрочнения при сдвиге идеально упругопластической среды принимается равным нулю. Подставив соответствующие физические уравнения в дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды, записываемые с учётом и без учёта геометрической нелинейности в цилиндрической системе координат, получили разрешающие дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для сплошной среды, находящейся в условиях осесимметричного идеально упругопластического деформирования. Приведённые в статье дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях могут использоваться при определении напряжённо-деформированного состояния сплошных сред, которые находятся в условиях осесимметричного идеально упругопластического деформирования, с учётом и без учёта геометрической нелинейности, и физические соотношения для которых аппроксимированы билинейными функциями.

Ключевые слова: сплошная среда, дифференциальные уравнения равновесия, осесимметричная деформация, идеальная пластичность, билинейные замыкающие уравнения

DIFFERENTIAL EQUATIONS OF EQUILIBRIUM OF AXISYMMETRIC DEFORMATION OF ELASTIC-PERFECTLY- PLASTIC CONSTRUCTION ELEMENT AT COMBINED STRESS STATE

S.V. Bakushev

There have been received displacement differential equations of equilibrium that is nonlinear, regarding volume change and elastic-perfectly-plastic, regarding form change, being in the conditions

of axially symmetric elastic-perfectly-plastic deformation, both regarding and regardless geometrical nonlinearity. Physical dependences are based on calculation of secant modulus of volume and shearing deformation at approximation of bilinear function diagrams. Bearing in mind the hypothesis about independence of nonlinear volume deformation diagram and elastic-perfectly-plastic shearing deformation diagram, there have been analyzed five main cases of physical dependences, depending on mutual arrangement of breaking points of bilinear diagrams of volume and shearing deformation. At the first part of the diagram the secant module of both volume and shearing deformation is constant; at the second part the secant module of volume deformation is a function of volume deformation, whereas the secant module of shearing is a function of shearing deformation intensity. Hardening module at shearing of elastic-perfectly-plastic continuum is considered to be equal to zero. Putting corresponding bilinear physical equations into differential equations of equilibrium of continuum, regarding and regardless geometrical nonlinearity at cylindrical coordinate system, we have received resolving differential equations of equilibrium in displacements for continuum, being in the conditions of axially symmetric elastic-perfectly-plastic deformation. Provided in the present article differential equations of equilibrium in displacements can be used at determination of strain-stress state of continuum at axially symmetric elastic-perfectly-plastic deformation, regarding and regardless geometrical nonlinearity, physical relations of which are approximated by bilinear functions.

Keywords: continuum, differential equations of equilibrium, axially symmetrical deformation, perfect plasticity, bilinear closing equations

Введение. Вопросы построения дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях для деформируемых твёрдых тел, находящихся в условиях сложного напряжённо-деформированного состояния, в частности в условиях плоской деформации, осесимметричной и центрально-симметричной деформации, рассматривались в работах [1...4]. При этом замыкающие уравнения произвольного, вообще говоря, вида аппроксимировались билинейными функциями. Оптимальное расположение точек излома билинейных диаграмм объёмного и сдвигового деформирования, определяемое на основании метода наименьших квадратов, рассматривалось в работе [5].

Для деформируемых тел, находящихся в условиях сложного напряжённого и деформированного состояний, замыкающие уравнения описываются двумя зависимостями [6]. Первая зависимость для геометрически линейной модели сплошной среды устанавливает связь между первыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций и механически интерпретируется как взаимосвязь между объёмной деформацией и средним напряжением, то есть определяет изменение объёмной деформации в процессе нагружения тела. Для геометрически нелинейной модели сплошной среды первая зависимость устанавливает связь между первыми инвариантами тензоров обобщённых напряжений и нелинейных деформаций и механически интерпретируется как взаимосвязь между геометрически нелинейным аналогом объёмной деформации и средним обобщённым напряжением. Вторая зависимость с механической точки зрения определяет деформацию сдвига, то есть изменение, вообще говоря, формы тела в процессе его деформирования. Эта зависимость для геометрически линейной модели сплошной среды устанавливает функциональную взаимосвязь между вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций. Для геометрически нелинейной модели сплошной среды вторая зависимость устанавливает функциональную взаимосвязь между вторыми инвариантами девиаторов обобщённых напряжений и нелинейных деформаций.

В нелинейной теории упругости в самом общем виде физические уравнения были записаны В.В.Новожиловым на основе тензорных свойств понятий «напряжение» и «деформация» и соосности тензоров напряжений и деформаций. Поскольку характер и форма замыкающих уравнений остались открытыми, то это придало его нелинейной теории упругости универсальный характер. Отсюда следует возможность использования его физических уравнений для описания механического поведения деформируемых тел с самыми различными диаграммами объёмного и сдвигового деформирования.

В данной работе строятся дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях для случая осесимметричного деформирования $u_r = u(r)$, $u_\varphi = 0$, $u_z = 0$ идеально упругопластической в отношении сдвиговых деформаций сплошной среды при аппроксимации замыкающих уравнений, описывающих диаграммы объёмного и сдвигового деформирования билинейными функциями без учёта (рис. 1 и 2) и с учётом (рис. 3 и 4) геометрической нелинейности. Аппроксимируемая диаграмма объёмного деформирования принимается нелинейной (на рис. 1 и 3 показана пунктирной линией). Аппроксимируемая диаграмма сдвигового деформирования принимается также нелинейной с протяжённой площадкой текучести (на рис. 2 и 4 показана пунктирной линией).

Вопросам расчёта идеально упругопластических сплошных сред и деформируемых тел, находящихся в условиях осесимметричного деформирования, в последнее время уделяется пристальное внимание. Так, в работе [7] для тел, описываемых жесткопластической и упругопластической моделями и находящихся в условиях плоской деформации, плоского напряжённого состояния и осесимметричной деформации, исследуются характеристические направления соответствующих систем дифференциальных уравнений. В статье [8] обсуждаются вопросы существования решения задачи об осесимметричном плоско-деформированном состоянии при выполнении режима полной пластичности для жесткопластического тела. Определены условия, при выполнении которых на границе осесимметричной цилиндрической области зарождается пластическая зона, соответствующая выбранному режиму пластичности. В работе [9] рассматриваются вопросы определения напряжённо-деформированного состояния при нагружении упругопластического полупространства осесимметричной нагрузкой общего, вообще говоря, вида, возникающей при внедрении сферического индентора в деформируемое полупространство. При этом рассмотрены условия начала пластической деформации в приповерхностном слое и на поверхности полупространства. В работе [10] исследуется решение плоской осесимметричной упругопластической задачи на примере толстостенной трубы, находящейся под действием внутреннего равномерного давления. Зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций в материале конструкции описывается диаграммой Прандтля. Показано, что прочность трубы обеспечивается наличием у внешней поверхности трубы зоны упругого деформирования. Исследованию упругопластических процессов и предельных состояний при растяжении (сжатии) – кручении в осесимметричных телах при больших деформациях посвящены работы [11, 12, 13]. Определение напряжённо-деформированного состояния упругопластических осесимметричных тел (дисков, цилиндров), подверженных термомеханическим воздействиям, рассматривается в [14, 15]. В статье [16] рассматриваются вопросы построения математических моделей, описывающих напряжённо-деформированные состояния цилиндрического и сферического тел для материалов с пористой структурой, сжатый скелет которой обладает упрочняющимися упругопластическими свойствами. Дана оценка влияния величины начальной пористости и предела текучести материала на положение границы раздела сред упругого и пластического деформирования. В работах [17, 18] рассматриваются вопросы усиления толстостенных цилиндров с помощью нагартовки. В статье [17] оценивается напряжённо-деформированное состояние двухслойного комбинированного штампа после его усиления. Усиление толстостенного цилиндра с помощью «вращательной нагартовки» рассматривается в статье [18]. Вопросам автофретирования цилиндрических отверстий в ортотропном материале посвящена работа [19].

Значительное внимание уделяется в настоящее время упругопластическому расчёту тонкостенных конструкций, в частности оболочек. Так, в работе [20] на основании теории осесимметричного упругопластического деформирования и энергетического принципа теории жесткопластического деформирования оболочек представлены математические модели и результаты расчётов верхней и нижней границ предельной нагрузки для тонких оболочек, основанные на анализе возникновения и развития в элементах конструкций упругопластических деформаций. В работах [21, 22] на основе

геометрически нелинейной теории оболочек типа Тимошенко и теории пластичности с изотропным и кинематическим упрочнением излагается методика численного решения нелинейных нестационарных задач осесимметричного упругопластического деформирования оболочек вращения с учётом кручения при заданных кинематических и силовых нагружениях при больших деформациях. Решение строится вариационно-разностным методом в сочетании с явной схемой интегрирования уравнений движения по времени. В работе [23] рассматривается метод численного решения нелинейных нестационарных задач осесимметричного упругопластического деформирования оболочек вращения при учёте кручения при больших деформациях, позволяющий моделировать осесимметричное упругопластическое деформирование и оценивать предельные состояния оболочек вращения в широком диапазоне скоростей нагружения от квазистатических до динамических.

Физические уравнения для геометрически линейной модели. В соответствии с рис. 1 и 2 секущие модули объёмного расширения (сжатия) $K = K(\varepsilon, \Gamma)$ и сдвига $G = G(\varepsilon, \Gamma)$ для геометрически линейной модели на первом прямолинейном участке диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ будут величинами постоянными:

$$K = \frac{1}{3} K_0 = \text{const}, \quad (1)$$

$$G = G_0 = \text{const}. \quad (2)$$

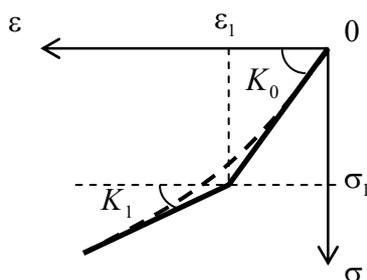


Рис. 1. Диаграмма $\sigma \approx \varepsilon$

Figure 1. Chart $\sigma \approx \varepsilon$

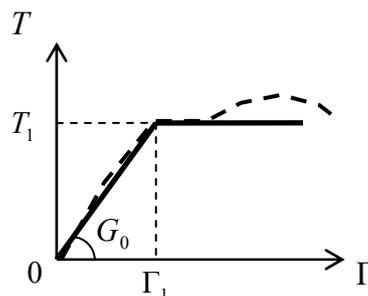


Рис. 2. Диаграмма $T \approx \Gamma$

Figure 2. Chart $T \approx \Gamma$

На втором прямолинейном участке диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ секущий модуль объёмного расширения (сжатия) $K = K(\varepsilon, \Gamma)$ и секущий модуль сдвига $G = G(\varepsilon, \Gamma)$ будут определяться выражениями:

$$K = K(\varepsilon) = \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] \neq \text{const}, \quad (3)$$

$$G = G(\Gamma) = G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \neq \text{const}. \quad (4)$$

Здесь K_0 – начальный модуль объёмного расширения (сжатия); G_0 – начальный модуль сдвига; K_1 – модуль упрочнения при объёмном расширении (сжатии); σ – первый инвариант тензора напряжений; ε – первый инвариант тензора деформаций; T – интенсивность касательных напряжений; Γ – интенсивность деформаций сдвига.

В соответствии с рис. 2 модуль упрочнения при сдвиге идеально упруго-пластической среды принимается равным нулю.

Поскольку построение билинейных диаграмм объёмного и сдвигового деформирования выполняется, вообще говоря, независимо друг от друга, а при осесимметричном деформировании $\varepsilon = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}$ и $\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr}\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2}$, то установить связь между точками излома билинейных диаграмм $\sigma \approx \varepsilon$ и $T \approx \Gamma$ в явном виде не представляется возможным.

Здесь $\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}$; $\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u}{r}$, причём

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} &= \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon_{\varphi\varphi}}{\partial r} = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right); \\ \frac{\partial \Gamma}{\partial r} &= \frac{2}{3\Gamma} \left[(2\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi}) \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial r} + (2\varepsilon_{\varphi\varphi} - \varepsilon_{rr}) \frac{\partial \varepsilon_{\varphi\varphi}}{\partial r} \right] = \\ &= \frac{2}{3\Gamma} \left[\left(2 \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \left(2 \frac{u}{r} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \right]. \end{aligned}$$

Ввиду этого, рассмотрим пять основных случаев физических зависимостей.

Случай 1: $K_0 \neq K_1$. Точки излома совпадают, то есть $|\varepsilon_1| = \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_0 < \Gamma_1$. Здесь интенсивности Γ_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}| = |\varepsilon_1|$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $0 \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_0| < |\varepsilon_1|$ и $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$. Здесь объёмной деформации $|\varepsilon_0|$ соответствуют такие компоненты деформации, что $\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr}\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2} = \Gamma_1$.

В этом случае физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования с учётом формул (1) и (2) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{1}{3} K_0 \varepsilon + 2G_0 \left(\varepsilon_{rr} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{3} K_0 \varepsilon + 2G_0 \left(\varepsilon_{\varphi\varphi} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{zz} &= \left(\frac{1}{3} K_0 - \frac{2}{3} G_0 \right) \varepsilon. \end{aligned} \tag{5}$$

Случай 2: $K_0 \neq K_1$. Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon_1| \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_0|$ и $\Gamma_0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$. Здесь объёмной деформации $|\varepsilon_0|$ соответствуют такие компоненты деформации, что $\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr}\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2} = \Gamma_1$, а интенсивности Γ_0 – такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}| = |\varepsilon_1|$.

В этом случае физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования с учётом формул (2) и (3) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] \varepsilon + 2G_0 \left(\varepsilon_{rr} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] \varepsilon + 2G_0 \left(\varepsilon_{\varphi\varphi} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{zz} &= \left\{ \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] - \frac{2}{3} G_0 \right\} \varepsilon.\end{aligned}\quad (6)$$

Случай 3: $K_0 \neq K_1$. Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon_0| \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma_1 \leq \Gamma \leq \Gamma_0$. Здесь объёмной деформации $|\varepsilon_0|$ соответствуют такие компоненты деформации, что $\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr} \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2} = \Gamma_1$, а интенсивности Γ_0 – такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}| = |\varepsilon_1|$.

В этом случае физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования с учётом формул (1) и (4) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{1}{3} K_0 \varepsilon + 2G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left(\varepsilon_{rr} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{3} K_0 \varepsilon + 2G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left(\varepsilon_{\varphi\varphi} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{zz} &= \left[\frac{1}{3} K_0 - \frac{2}{3} G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \right] \varepsilon.\end{aligned}\quad (7)$$

Случай 4: $K_0 \neq K_1$. Точки излома совпадают, то есть $|\varepsilon_1| = \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma \geq \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq \varepsilon_0$ и $\Gamma \geq \Gamma_1$. Здесь объёмной деформации $|\varepsilon_0|$ соответствуют такие компоненты деформации, что $\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr} \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2} = \Gamma_1$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| > \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon| \geq |\varepsilon_1|$ и $\Gamma \geq \Gamma_0$. Здесь интенсивности Γ_0 соответствуют такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}| = |\varepsilon_1|$.

В этом случае физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования с учётом формул (2) и (4) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] \varepsilon + 2G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left(\varepsilon_{rr} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] \varepsilon + 2G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left(\varepsilon_{\varphi\varphi} - \frac{1}{3} \varepsilon \right); \\ \sigma_{zz} &= \left\{ \frac{1}{3} \left[K_1 + (K_0 - K_1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right] - \frac{2}{3} G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \right\} \varepsilon.\end{aligned}\quad (8)$$

Случай 5: $K_0 = K_1$. Точка излома на диаграмме $\sigma \approx \varepsilon$ отсутствует. При этом, если $0 \leq \Gamma \leq \Gamma_1$, то физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования будут иметь вид (5); если $\Gamma \geq \Gamma_1$, то физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования будут иметь вид (7).

Построение дифференциальных уравнений для геометрически линейной модели. Подставив физические уравнения (5)–(8) в дифференциальное уравнение равновесия осесимметричного идеально упругопластического деформирования сплошной среды:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} + F_r = 0, \quad (9)$$

получим четыре вида разрешающих уравнений в перемещениях, имеющих одну и ту же структуру:

$$A \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + B + F_r = 0. \quad (10)$$

Коэффициенты A и B в уравнении (10) зависят от вида физических уравнений.

1. Для физических уравнений (5):

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{3} K_0 + \frac{4}{3} G_0; \\ B &= \frac{1}{r} \left(\frac{1}{3} K_0 + \frac{4}{3} G_0 \right) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

2. Для физических уравнений (6):

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{3} K_1 + \frac{4}{3} G_0; \\ B &= \frac{1}{r} \left(\frac{1}{3} K_1 + \frac{4}{3} G_0 \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

3. Для физических уравнений (7):

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{3} K_0 + \frac{4}{3} G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left[1 + \frac{1}{3\Gamma^2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \left(\frac{u}{r} - 2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right]; \\ B &= \left[\frac{1}{3} K_0 - \frac{2}{3} G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} + \frac{4}{9r} G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(2 \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - 2 \frac{u}{r} \right) \right] \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) + \\ &+ G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \frac{2}{r}. \end{aligned} \quad (13)$$

4. Для физических уравнений (8):

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{3} K_1 + \frac{4}{3} G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left[1 + \frac{1}{3\Gamma^2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \left(\frac{u}{r} - 2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right]; \\ B &= \left[\frac{1}{3} K_1 - \frac{2}{3} G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} + \frac{4}{9r} G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma^3} \left(2 \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - 2 \frac{u}{r} \right) \right] \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) + \\ &+ G_0 \frac{\Gamma_1}{\Gamma} \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \frac{2}{r}. \end{aligned} \quad (14)$$

В формулах (11)–(14)

$$\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr} \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)^2 - \frac{\partial u}{\partial r} \frac{u}{r} + \left(\frac{u}{r}\right)^2}.$$

Таким образом, дифференциальные уравнения в перемещениях для осесимметричного деформирования сплошной среды при билинейной аппроксимации физических соотношений без учёта геометрической нелинейности построены.

Физические уравнения для геометрически нелинейной модели. Аппроксимация замыкающих уравнений произвольной формы в отношении изменения объёма и замыкающих уравнений в отношении изменения формы, описывающих диаграмму сдвиговых деформаций с протяжённой площадкой текучести, билинейными функциями для геометрически нелинейной модели сплошной среды, в смысле В.В.Новожилова, представлена на рис. 3 и 4.

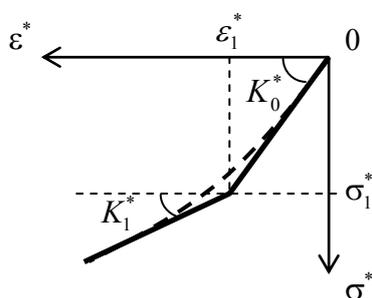


Рис. 3. Диаграмма $\sigma^* \approx \varepsilon^*$

Figure 3. Chart $\sigma^* \approx \varepsilon^*$

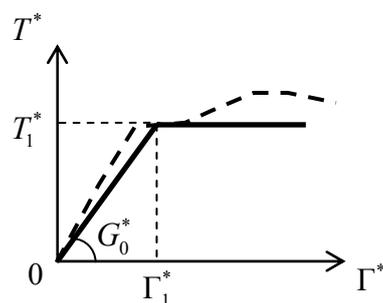


Рис. 4. Диаграмма $T^* \approx \Gamma^*$

Figure 4. Chart $T^* \approx \Gamma^*$

Секущие модули объёмного расширения (сжатия) $K^* = K^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$ и сдвига $G^* = G^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$ для геометрически нелинейной модели на первом прямолинейном участке диаграмм $\sigma^* \approx \varepsilon^*$ и $T^* \approx \Gamma^*$ будут определяться выражениями:

$$K^* = \frac{1}{3} K_0^* = \text{const}, \quad (15)$$

$$G^* = G_0^* = \text{const}. \quad (16)$$

На втором прямолинейном участке диаграмм $\sigma^* \approx \varepsilon^*$ и $T^* \approx \Gamma^*$ секущий модуль объёмного расширения (сжатия) $K^* = K^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$ и секущий модуль сдвига $G^* = G^*(\varepsilon^*, \Gamma^*)$ будут определяться выражениями:

$$K^* = K^*(\varepsilon^*) = \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \neq \text{const}, \quad (17)$$

$$G^* = G^*(\Gamma^*) = G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \neq \text{const}. \quad (18)$$

Здесь K_0^* – геометрически нелинейный аналог начального модуля объёмного расширения (сжатия); G_0^* – геометрически нелинейный аналог начального модуля сдвига; K_1^* – геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при объёмном расширении (сжатии); σ^* – первый инвариант тензора обобщённых напряжений; ε^* – первый инвариант тензора нелинейных деформаций; T^* – интенсивность обобщённых касательных напряжений; Γ^* – интенсивность нелинейных деформаций сдвига.

В соответствии с рис. 4 геометрически нелинейный аналог модуля упрочнения при сдвиге идеально упругопластической среды равен нулю.

При осесимметричном деформировании с учётом геометрической нелинейности

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{rr}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^* \text{ и } \Gamma^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^{*2} - \varepsilon_{rr}^* \varepsilon_{\varphi\varphi}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{*2}}, \text{ причём } \varepsilon_{rr}^* = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2; \varepsilon_{\varphi\varphi}^* = \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2.$$

Кроме того,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial r} &= \frac{\partial \varepsilon_{rr}^*}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon_{\varphi\varphi}^*}{\partial r} = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(1 + \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right); \\ \frac{\partial \Gamma^*}{\partial r} &= \frac{2}{3\Gamma^*} (2\varepsilon_{rr}^* - \varepsilon_{\varphi\varphi}^*) \frac{\partial \varepsilon_{rr}^*}{\partial r} + \frac{2}{3\Gamma^*} (2\varepsilon_{\varphi\varphi}^* - \varepsilon_{rr}^*) \frac{\partial \varepsilon_{\varphi\varphi}^*}{\partial r} = \\ &= \frac{2}{3\Gamma^*} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \\ &+ \frac{2}{3\Gamma^*} \left[2 \frac{u}{r} + \left(\frac{u}{r} \right)^2 - \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right] \frac{1}{r} \left(1 + \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right). \end{aligned}$$

Рассмотрим пять основных случаев физических зависимостей для геометрически нелинейной модели.

Случай 1: $K_0^* \neq K_1^*$. Точки излома совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| = \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_0^* < \Gamma_1^*$. Здесь интенсивности Γ_0^* соответствуют такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{rr}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^*| = |\varepsilon_1^*|$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $0 \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_0^*| < |\varepsilon_1^*|$ и $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$. Здесь объёмной деформации $|\varepsilon_0^*|$ соответствуют такие компоненты деформации, что $\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^{*2} - \varepsilon_{rr}^* \varepsilon_{\varphi\varphi}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{*2}} = \Gamma_1^*$.

В этом случае физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования с учётом формул (15) и (16) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^* &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2G_0^* \left(\varepsilon_{rr}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi}^* &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2G_0^* \left(\varepsilon_{\varphi\varphi}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{zz}^* &= \left(\frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_0^* \right) \varepsilon^*. \end{aligned} \tag{19}$$

Случай 2: $K_0^* \neq K_1^*$. Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| < \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon_0^*| \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_0^*|$ и $\Gamma_0^* \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$. Здесь объёмной деформации $|\varepsilon_0^*|$ соответствуют такие компоненты деформации, что $\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^{*2} - \varepsilon_{rr}^* \varepsilon_{\varphi\varphi}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{*2}} = \Gamma_1^*$, а интенсивности Γ_0^* – такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{rr}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^*| = |\varepsilon_1^*|$.

В этом случае физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования с учётом формул (16) и (17) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2G_0^* \left(\varepsilon_{rr}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2G_0^* \left(\varepsilon_{\varphi\varphi}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{zz}^* &= \left\{ \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] - \frac{2}{3} G_0^* \right\} \varepsilon^*.\end{aligned}\quad (20)$$

Случай 3: $K_0^* \neq K_1^*$. Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon_0^*| \leq |\varepsilon^*| \leq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma_1^* \leq \Gamma^* \leq \Gamma_0^*$. Здесь объёмной деформации $|\varepsilon_0^*|$ соответствуют такие компоненты деформации, что $\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^{*2} - \varepsilon_{rr}^* \varepsilon_{\varphi\varphi}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{*2}} = \Gamma_1^*$, а интенсивности Γ_0^* – такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{rr}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^*| = |\varepsilon_1^*|$.

В этом случае физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования с учётом формул (15) и (18) будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}^* &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left(\varepsilon_{rr}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi}^* &= \frac{1}{3} K_0^* \varepsilon^* + 2G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left(\varepsilon_{\varphi\varphi}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{zz}^* &= \left[\frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right] \varepsilon^*.\end{aligned}\quad (21)$$

Случай 4: $K_0^* \neq K_1^*$. Точки излома совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| = \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1| < \Gamma_1$. При этом $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_0^*|$ и $\Gamma \geq \Gamma_1^*$. Здесь объёмной деформации $|\varepsilon_0^*|$ соответствуют такие компоненты деформации, что $\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^{*2} - \varepsilon_{rr}^* \varepsilon_{\varphi\varphi}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{*2}} = \Gamma_1^*$.

Точки излома не совпадают, то есть $|\varepsilon_1^*| > \Gamma_1^*$. При этом $|\varepsilon^*| \geq |\varepsilon_1^*|$ и $\Gamma^* \geq \Gamma_0^*$. Здесь интенсивности Γ_0^* соответствуют такие компоненты деформации, что $|\varepsilon_{rr}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^*| = |\varepsilon_1^*|$.

В этом случае физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования с учётом формул (16) и (18) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left(\varepsilon_{rr}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{\varphi\varphi}^* &= \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] \varepsilon^* + 2G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left(\varepsilon_{\varphi\varphi}^* - \frac{1}{3} \varepsilon^* \right); \\ \sigma_{zz}^* &= \left\{ \frac{1}{3} \left[K_1^* + (K_0^* - K_1^*) \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon^*} \right] - \frac{2}{3} G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \right\} \varepsilon^*. \end{aligned} \quad (22)$$

Случай 5: $K_0^* = K_1^*$. Точка излома на диаграмме $\sigma^* \approx \varepsilon^*$ отсутствует. При этом, если $0 \leq \Gamma^* \leq \Gamma_1^*$, то физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования будут иметь вид (19); если $\Gamma^* \geq \Gamma_1^*$, то физические уравнения осесимметричного идеально упругопластического деформирования будут иметь вид (21).

Построение дифференциальных уравнений для геометрически нелинейной модели. Подставив физические уравнения (19) – (22) в дифференциальное уравнение равновесия осесимметричного идеально упругопластического деформирования сплошной среды при учёте геометрической нелинейности:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \sigma_{rr}^* \right] + \frac{1}{r} \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \sigma_{rr}^* - \left(1 + \frac{u}{r} \right) \sigma_{\varphi\varphi}^* \right] + F_r^* = 0, \quad (23)$$

получим четыре вида разрешающих уравнений в перемещениях, имеющих одну и ту же структуру:

$$A \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + B + DF_r = 0. \quad (24)$$

Здесь $D = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \left(1 + \frac{u}{r} \right)$.

Коэффициенты A и B в уравнении (24) зависят от вида физических уравнений.

1. Для физических уравнений (19):

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{3} K_0^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \frac{2}{3} G_0^* \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \\ &+ \left(\frac{1}{3} K_0^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2; \\ B &= \left(\frac{1}{3} K_0^* - \frac{2}{3} G_0^* \right) \frac{1}{r} \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \left(1 + \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) + \\ &+ \frac{1}{r} \left\{ \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \left[\frac{1}{3} K_0^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \right. \right. \\ &+ \left. \frac{2}{3} G_0^* \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] \right\} - \left(1 + \frac{u}{r} \right) \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{3} K_0^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \frac{2}{3} G_0^* \left[2 \frac{u}{r} + \left(\frac{u}{r} \right)^2 - \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (25)$$

2. Для физических уравнений (20)

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{3} K_1^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \frac{2}{3} G_0^* \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \\
 &+ \left(\frac{1}{3} K_1^* + \frac{4}{3} G_0^* \right) \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{3} (K_0^* - K_1^*) \varepsilon_1^*; \\
 B &= \left(\frac{1}{3} K_1^* - \frac{2}{3} G_0^* \right) \frac{1}{r} \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \left(1 + \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) + \\
 &+ \frac{1}{r} \left\langle \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \left\{ \frac{1}{3} K_1^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \right. \right. \\
 &+ \frac{2}{3} G_0^* \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \frac{1}{3} (K_0^* - K_1^*) \varepsilon_1^* \left. \right\rangle - \\
 &- \left(1 + \frac{u}{r} \right) \left\{ \frac{1}{3} K_1^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \right. \\
 &+ \frac{2}{3} G_0^* \left[2 \frac{u}{r} + \left(\frac{u}{r} \right)^2 - \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right] + \frac{1}{3} (K_0^* - K_1^*) \varepsilon_1^* \left. \right\rangle.
 \end{aligned} \tag{26}$$

3. Для физических уравнений (21):

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{3} K_0^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + G_0^* \frac{2\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \\
 &+ \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \times \left\{ \frac{1}{3} K_0^* + G_0^* \frac{4\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} - G_0^* \frac{4\Gamma_1^*}{9\Gamma^{*3}} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right]^2 \right\}; \\
 B &= \left\{ \frac{1}{3} K_0^* - 2G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} - G_0^* \frac{4\Gamma_1^*}{9\Gamma^{*3}} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] \right\} \times \\
 &\times \left[2 \frac{u}{r} + \left(\frac{u}{r} \right)^2 - \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right] \left\{ \frac{1}{r} \left(1 + \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \right. \\
 &+ \frac{1}{r} \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \left\{ \frac{1}{3} K_0^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \right. \\
 &+ G_0^* \frac{2\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] \left. \right\} - \frac{1}{r} \left(1 + \frac{u}{r} \right) \times \\
 &\times \left\{ \frac{1}{3} K_0^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + G_0^* \frac{2\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} \left[2 \frac{u}{r} + \left(\frac{u}{r} \right)^2 - \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right] \right\}.
 \end{aligned} \tag{27}$$

4. Для физических уравнений (22):

$$\begin{aligned}
 A = & \frac{1}{3} K_1^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \frac{2}{3} G_0^* \frac{\Gamma_1^*}{\Gamma^*} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \\
 & + \frac{1}{3} (K_0^* - K_1^*) \varepsilon_1^* + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \left\{ \frac{1}{3} K_1^* + G_0^* \frac{4\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} - G_0^* \frac{4\Gamma_1^*}{9\Gamma^{*3}} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right]^2 \right\}; \\
 B = & \left\{ \frac{1}{3} K_1^* - G_0^* \frac{2\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} - G_0^* \frac{4\Gamma_1^*}{9\Gamma^{*3}} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] \right\} \times \\
 & \times \left[2 \frac{u}{r} + \left(\frac{u}{r} \right)^2 - \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right] \left\{ \frac{1}{r} \left(1 + \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \right. \\
 & + \frac{1}{r} \left(1 + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \left\{ \frac{1}{3} K_1^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \right. \\
 & + G_0^* \frac{2\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} \left[2 \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{u}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \frac{1}{3} (K_0^* - K_1^*) \varepsilon_1^* \left. \right\} - \\
 & - \frac{1}{r} \left(1 + \frac{u}{r} \right) \left\{ \frac{1}{3} K_1^* \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \right. \\
 & + G_0^* \frac{2\Gamma_1^*}{3\Gamma^*} \left[2 \frac{u}{r} + \left(\frac{u}{r} \right)^2 - \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right] + \frac{1}{3} (K_0^* - K_1^*) \varepsilon_1^* \left. \right\}.
 \end{aligned} \tag{28}$$

В уравнениях (27) и (28)

$$\begin{aligned}
 \Gamma^* &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{rr}^{*2} - \varepsilon_{rr}^* \varepsilon_{\varphi\varphi}^* + \varepsilon_{\varphi\varphi}^{*2}} = \\
 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right]^2 - \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \right] \left[\frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \left[\frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right]^2}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, дифференциальные уравнения в перемещениях для осесимметричного деформирования сплошной среды при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений с учётом геометрической нелинейности построены.

Выводы. Представленные в статье дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях могут найти применение при определении напряжённо-деформированного состояния элементов конструкций, которые находятся в условиях осесимметричного деформирования, как с учётом, так и без учёта геометрической нелинейности, и физические соотношения для которых описываются билинейными функциями.

Список литературы

1. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды для плоской деформации в декартовых координатах при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений (геометрически линейная модель) / С.В. Бакушев // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.76–85.

2. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды для плоской деформации в декартовых координатах при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений (геометрически нелинейная модель) / С.В. Бакушев // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №2(39). – С.86–100.
3. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия осесимметричной деформации при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений / С.В. Бакушев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2019. – №1. – С.8–17.
4. Бакушев, С.В. Дифференциальные уравнения равновесия центрально-симметричной деформации при билинейной аппроксимации замыкающих уравнений / С.В. Бакушев // Известия ВУЗов. Строительство. – 2018. – №11 (719). – С.5–19.
5. Бакушев, С.В. Аппроксимация диаграмм деформирования билинейными функциями / С.В. Бакушев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2019. – №2 (283). – С.2–11.
6. Бакушев, С.В. Геометрически и физически нелинейная механика сплошной среды: Плоская задача / С.В. Бакушев. – М.: Книжный дом «Либроком», 2013. – 312 с.
7. Коврижных, А.М. Уругопластическое деформирование, локализация и разрушение материалов / А.М. Коврижных, С.А. Коврижных // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 2, № 3. – С.132–136.
8. Артемов, М.А. Математическое моделирование уругопластического состояния цилиндрической области / М.А. Артемов, Е.С. Барановский, Н.С. Потапов // Современные наукоёмкие технологии. – 2016. – № 9–2. – С.191–195.
9. Огар, П.М. Влияние формы осесимметричной нагрузки на напряжённо-деформированное состояние уругопластического полупространства / П.М. Огар, В.А. Тарасов // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 1 (5). – С.14–20.
10. Барашков, В.Н. Анализ уругопластического напряжённого состояния цилиндрической трубы, нагруженной внутренним давлением / В.Н. Барашков, М.Ю. Шевченко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – Т. 20, № 3. – С.100–111.
11. Artem'eva, A.A. Large deformations and limiting states of elastoplastic shells of revolution under combined complex loadings / A.A. Artem'eva, V.G. Bazhenov, D.A. Kazakov, A.I. Kibets, Y.V. Nagornykh // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2015. – Vol. 79, N 4. – P. 394–402.
12. Bazhenov, V.G. Numerical and experimental study of elastoplastic tension-torsion processes in axisymmetric bodies under large deformations / V.G. Bazhenov, D.V. Zhegalov, E.V. Pavlenkova // Mechanics of Solids. – 2011. – Vol. 46, N 2. – P. 204–212.
13. Cheremnykh, S. Deformation of cylindrical shells of steel 45 under complex loading / S. Cheremnykh, V. Zubchaninov, V. Gulyaev // E3S Web of Conferences. – 2019. – 97:04025. – DOI 10.1051/e3sconf/20199704025.
14. Павленкова, Е.В. Теоретическое и экспериментальное исследования уругопластических процессов деформирования и предельных состояний тел вращения при пропорциональных и сложных нагружениях кручением-растяжением (сжатием) / Е.В. Павленкова, Д.В. Жегалов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4–4. – С.1678–1680.
15. Александров, С.Е. Деформация тонкого диска под действием термомеханической нагрузки / С.Е. Александров, А.Р. Пирумов, О.В. Чесникова // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Машиностроение. – 2013. – № 45. – С.27–34.
16. Гоцев, Д.В. Математическое моделирование напряжённо-деформированных состояний пористых цилиндрических и сферических тел при сжатии с учётом неупругого поведения сжатого скелета / Д.В. Гоцев, А.Е. Бунтов, Н.С. Перунов // Механика предельного состояния и смежные вопросы: материалы Всероссийской научной школы-конференции, посвящённой 85-летию профессора Д.Д. Ивлева. – 2015. – С.91–99.

17. Hu, C. An alternative design method for the double-layer combined die using autofrettage theory / C. Hu, F. Yang, Z. Zhao, F. Zeng // *Mechanical Sciences*. – 2017. – 8:267-276. – DOI 10.5194/ms-8-267-2017.
18. Zare, H.R. A novel autofrettage method for strengthening and design of thick-walled cylinders / H.R. Zare, H. Darijani // *Materials & Design*. – 2016. – 105:366-374.
19. Rynkovskaya, M. A Theory of Autofrettage for Open-Ended, Polar Orthotropic Cylinders / M. Rynkovskaya, S. Alexandrov, Lihui Lang // *Symmetry*. – 2019. – 11(2):280. – DOI 10.3390/sym11020280.
20. Серазутдинов, М.Н. Оценка границ предельной нагрузки для тонкостенных конструкций / М.Н. Серазутдинов // *Вестник Технологического университета*. – 2018. – Т. 21, № 12. – С.159–164.
21. Баженов, В.Г. Численное решение обобщенных осесимметричных задач динамики упругопластических оболочек вращения при больших деформациях / В.Г. Баженов, Е.В. Павлѐнкова, А.А. Артемьева // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2012. – Т. 5, № 4. – С.427–434.
22. Баженов, В.Г. Исследование больших упругопластических деформаций цилиндрических оболочек при комбинированных нагружениях внутренним давлением и кручением / В.Г. Баженов, А.А. Артемьева // *Проблемы прочности и пластичности*. – 2014. – Т. 76, № 3. – С.217–223.
23. Миронова, Л.И. К вопросу о моделировании упругопластического состояния цилиндра в случае локального нагрева поверхности движущимся тепловым источником постоянной интенсивности / Л.И. Миронова, В.М. Терехов, А.С. Аверин // *Технический оппонент*. – 2018. – № 1. – С.68–72.

References

1. Bakushev, S.V. Differential equations of solid environment equilibrium for flat deformation in cartesian coordinates at bilinear approximation of trailing equations (geometrically linear model) / S.V. Bakushev // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – N 1(38). – P.76–85.
2. Bakushev, S.V. Differential equations of solid environment equilibrium for flat deformation in cartesian coordinates at bilinear approximation of trailing equations (geometrically nonlinear model) / S.V. Bakushev // *Regional architecture and engineering*. – 2019. – N 2(39). – P.86–100.
3. Bakushev, S.V. Differential equations of equilibrium an the axially symmetric deformation at bilinear approximation trailing equations / S.V. Bakushev // *Structure mechanics and analysis of constructions*. – 2019. – N 1. – P.8–17.
4. Bakushev, S.V. Differential equations of equilibrium of central-symmetric deformation at bilinear approximation trailing equations / S.V. Bakushev // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2018. – N 11 (719). – P.5–19.
5. Bakushev, S.V. Approximations of warp diagrams using bilinear functions / S.V. Bakushev // *Structure mechanics and analysis of constructions*. – 2019. – N 2 (283). – P. 2–11.
6. Bakushev, S.V. Geometrical and physic non-linear mechanic of continuous mediums: Plane problem / S.V. Bakushev. – M.: The Book House «LIBROCOM». Publ., 2013. –312 p.
7. Kovrizhnykh, A.M. Elastoplastic deformation, localization and failure of materials / A.M. Kovrizhnykh, S.A. Kovrizhnykh // *Interexpo Geo-Siberia*. – 2016. – Vol. 2, N 3. – P. 132–136.
8. Artemov, M.A. Mathematical modeling of elastic-plastic state of a cylindrical domain / M.A. Artemov, E.S. Baranovskiy, N.S. Potapov // *Knowledge intensive technology*. – 2016. – N 9–2. – P.191–195.

9. Ogar, P.M. Influence of axisymmetric form of load on stressedly-deformed state of elastoplastic half-space / P.M. Ogar, V.A. Tarasov // *Systems. Methods. Technologies.* – 2010. – N 1(5). – P.14–20.
10. Barashkov, V.N. Elastoplastic stress state of cylindrical pipe under internal pressure / V.N. Barashkov, M.U. Shevchenko // *City of Tomsk State University of Architecture and Engineering newsletter.* – 2018. – Vol. 20, N 3. – P.100–111.
11. Artem'eva, A.A. Large deformations and limiting states of elastoplastic shells of revolution under combined complex loadings / A.A. Artem'eva, V.G. Bazhenov, D.A. Kazakov, A.I. Kibets, Y.V. Nagornykh // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics.* – 2015. – Vol. 79, N 4. – P. 394–402.
12. Bazhenov, V.G. Numerical and experimental study of elastoplastic tension-torsion processes in axisymmetric bodies under large deformations / V.G. Bazhenov, D.V. Zhegalov, E.V. Pavlenkova // *Mechanics of Solids.* – 2011. – Vol. 46, N 2. – P. 204–212.
13. Cheremnykh, S. Deformation of cylindrical shells of steel 45 under complex loading / S. Cheremnykh, V. Zubchaninov, V. Gulyaev // *E3S Web of Conferences.* – 2019. – 97:04025. – DOI 10.1051/e3sconf/20199704025.
14. Pavlyonkova, E.V. Theoretically and experimentally studying the elastoplastic deformation processes and ultimate states of bodies of revolution under proportional and complex loading by torsion-tension (compression) / E.V. Pavlyonkova, D.V. Zhegalov // *Nizhniy Novgorod University named after N.I. Lobachevskii newsletter.* – 2011. – N 4-4. – P.1678–1680.
15. Alexandrov, S.E. Deformation of a thin disk subject to thermo-mechanical loading / S.E. Alexandrov, A.R. Pirumov, O.V. Chesnikova // *Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science Newsletter. Series: Mechanic engineering* – 2013. – N 45. – P. 27–34.
16. Gotzev, D.V. Mathematic simulation of stress and strain state of open-textured cylindrical and globe solids under compression with regards to inelastic behaviour of compressed shell / D.V. Gotzev, A.E. Buntov, N.S. Perunov // *Limit state mechanics and related issues: All Russia school research conference materials, dedicated to the 85th anniversary of D.D. Ivlev.* – 2015. – P. 91–99.
17. Hu, C. An alternative design method for the double-layer combined die using autofrettage theory / C. Hu, F. Yang, Z. Zhao, F. Zeng // *Mechanical Sciences.* – 2017. – 8:267-276. – DOI 10.5194/ms-8-267-2017.
18. Zare, H.R. A novel autofrettage method for strengthening and design of thick-walled cylinders / H.R. Zare, H. Darijani // *Materials & Design.* – 2016. – 105:366-374.
19. Rynkovskaya, M. A Theory of Autofrettage for Open-Ended, Polar Orthotropic Cylinders / M. Rynkovskaya, S. Alexandrov, Lihui Lang // *Symmetry.* – 2019. – 11(2):280. – DOI 10.3390/sym11020280.
20. Serazutdinov, M.N. Evaluating the limits of the ultimate load for thin-wall structures / M.N. Serazutdinov // *Technology university newsletter.* – 2018. – Vol. 21, N 12. – P. 159–164.
21. Bazhenov, V.G. Numerical solution of generalized dynamic axisymmetric problems for elastoplastic shells of revolution under large deformations / V.G. Bazhenov, E.V. Pavlyonkova, A.A. Artemyeva // *Computational mechanics of continuum.* – 2012. – Vol. 5, N 4. – P.427–434.
22. Bazhenov, V.G. Analysis of large elastoplastic deformations for cylindrical shells under combined loading of inner pressure and torsion / V.G. Bazhenov, A.A. Artemyeva // *Resistibility and plasticity issues.* – 2014. – Vol. 76, N 3. – P. 217–223.
23. Mironova, L.I. On the Modeling of the Elastic-Plastic State of a Cylinder in the Case of Local Surface Heating by a Moving Thermal Source of Constant Intensity / L.I. Mironova, V.M. Terekhov, A.S. Averin // *Engineering reviewer.* – 2018. – N 1. – P. 68–72.

УДК 624.012.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Начертательная геометрия
и графика»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Descriptive
Geometry and Graphics»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ОТНОСИТЕЛЬНЫМ ПРОЛОТОМ СРЕЗА a/h_0 ОТ 1 ДО 3

О.В. Снежкина

Производится моделирование железобетонной балки как трехшарнирной арки с затяжкой (статически определимой системы), а именно: железобетонная балка (как арочная система) представляется горизонтальным растянутым арматурным поясом и сжатой бетонной полосой криволинейного очертания. Назначение затяжки в балке состоит в погашении изгибающего момента, присущего простой балке (достаточно полно отражает работу железобетонных балок с малым и средним относительным пролетом среза).

Ключевые слова: железобетонные балки, относительный пролет среза, прочность, физическое моделирование, трехшарнирная арка с затяжкой

SIMULATION THE WORK OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH A RELATIVE SPAN OF THE CUT a/h_0 FROM 1 TO 3

O.V. Snezhkina

A reinforced concrete beam is modeled as a three-hinged arch with a puff (statically determinable system), namely, a reinforced concrete beam (like an arched system) is represented by a horizontal stretched reinforcing belt and a compressed concrete strip of a curved shape. The purpose of tightening the beam is to compensate the bending moment inherent to a simple beam (it fully reflects the work of reinforced concrete beams with a small and medium relative span of the cut).

Keywords: reinforced concrete beams, relative span of a slice, strength, physical modeling, three-hinged arch with a puff

При проектировании железобетонных балок в Российской Федерации согласно действующему Своду правил рекомендуется использовать два метода расчета. Оценка прочности обычных балок осуществлялась на основе традиционного нормативного подхода по наклонному (наиболее опасному) и нормальному сечениям. Расчет прочности коротких балок (с малым относительным пролетом среза $a/h_0 \leq 1$) рекомендуется производить на основе каркасно-стержневой модели, состоящей из сжатых прямолинейных наклонных полос бетона и растянутого арматурного пояса. Расчет коротких балок на основе каркасно-стержневой модели ограничен условными границами относительного пролета среза $a/h_0 \leq 1$. Расчет на основе нормативного подхода показывает существенные расхождения при оценке прочности наклонного сечения [1–3]. Наиболее заметны расхождения между опытными и расчетными величинами в балках с относительным пролетом среза $a/h_0 \leq 3$ [4]. Таким образом, целый класс балок (со сред-

ним относительным пролетом среза ($1 \leq a/h_0 \leq 3$) не имеет методики расчета, отражающей физическую работу этих конструкций. Ниже рассматривается методика расчета, объединяющая два существующих метода расчета прочности железобетонных балок.

Оказалось, что тенденция снижения разрушающей нагрузки при увеличении a/h_0 от 1 до 3, как и в балках с $a/h_0 \leq 1$, сохраняется. При этом закономерность изменения разрушающих усилий в железобетонных балках с относительным пролетом среза $1 \leq a/h_0 \leq 3$ гармонически продолжает соответствующие закономерности для балок с $a/h_0 \leq 1$ [5, 6]. Кроме того, принципиально не изменяются характер трещинообразования и виды разрушения. Учитывая, что расчетная каркасно-стержневая модель [5, 6] отражает физическую работу коротких железобетонных элементов, рассматривали модернизацию этой модели в границах a/h_0 от 1 до 3. Методологические основы анализа и синтеза сложных многокритериальных систем достаточно полно представлены в [7, 8].

В железобетонных балках с малым и средним пролетом среза определены следующие виды разрушений: разрушение по сечению, нормальному к оси элемента; разрушение по наклонному сечению [4–6]. Разрушение по нормальному сечению в коротких балках аналогично разрушению в обычных балках. Разрушение наклонного сечения в коротких железобетонных балках происходит по одной из следующих трех схем. Первый случай – разрушение по сжатой бетонной полосе характеризуется появлением серии мелких параллельных трещин, которое свойственно разрушению бетонных призм при сжатии. Второй случай – образование магистральной трещины, траектория которой примерно повторяет диагональ сжатой бетонной полосы. Третий случай – разрушение сжатых наклонных бетонных полос сопровождается развитием трещин, выделяющих сжатые наклонные полосы (наблюдается в большинстве экспериментальных образцов).

Для оценки прочности коротких железобетонных балок (и их разновидностей) разработан метод расчета, базирующийся на каркасно-стержневой модели, состоящей из наклонных сжатых полос и растянутого арматурного пояса [5, 6]. В основе метода расчета прочности лежит расчетная схема, показанная на рис. 1. Расчет коротких балок рекомендуется производить по сжатой и растянутой зонам. Согласно расчетной модели, предельное состояние по сжатой зоне наступает при достижении предела прочности в бетоне R_b , а по растянутой – при достижении предела прочности в арматуре R_s .

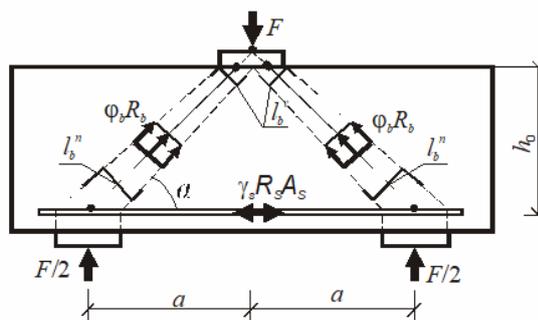


Рис. 1. Расчетная модель прочности железобетонных балок ($a/h_0 \leq 1$)

Методикой предлагается: расчет прочности сжатой зоны коротких балок (с учетом поперечной арматуры F_{sw}) производить по соотношению

$$F \leq 2\phi_b \gamma_b R_b b l_b \sin \alpha + F_{sw}. \quad (1)$$

Расчет прочности растянутой зоны определяется по формуле

$$F \leq \gamma_s R_s A_s \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

В развитие каркасно-стержневой модели [5, 6] для расчета коротких железобетонных элементов предлагается расчет железобетонных балок с относительным пролетом среза от 1 до 3 производить на основе модернизированной каркасно-стержневой

модели в виде трехшарнирной арки с затяжкой (рис. 2). Рассматриваемая модель имеет два шарнира, расположенных непосредственно на опорах на уровне продольной арматуры, с помощью третьего шарнира связываются между собой две полуарки, опирающиеся шарнирно на опоры. Таким образом, работа железобетонной балки с пролетом среза от 1 до 3 моделируется как распорная система с горизонтальным растянутым поясом, представленным продольной арматурой и сжатой бетонной аркой криволинейного очертания. Назначение затяжки в балке состоит в погашении изгибающего момента, присущего простой балке.

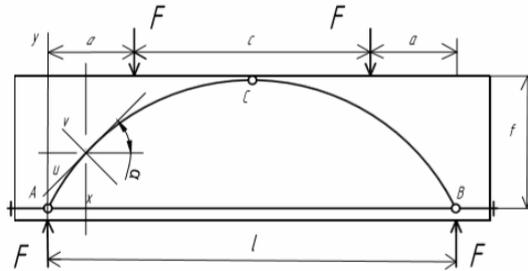


Рис. 2. Расчетная модель прочности железобетонных балок с $1 \leq a/h_0 \leq 3$

В рассматриваемой системе пролет арки l представляет собой расстояние между опорными площадками, а стрела подъема арки f – расстояние от наиболее удаленной точки оси арки (ключевого шарнира) до линии, соединяющей центры опор.

При определении изгибающего момента в сечении C получим:

$$M_c^0 - Hf = 0, \quad (3)$$

где M_c^0 – изгибающий момент от заданных сил в сечении простой балки.

Тогда усилие в горизонтальном растянутом арматурном поясе (распор)

$$H = M_c^0 / f. \quad (4)$$

Согласно (4) распор возрастает с увеличением изгибающего момента (назначение распора в арке состоит именно в погашении изгибающего момента, присущего простой балке). Таким образом, данная модель (арка с затяжкой) наиболее полно отражает работу железобетонных балок с малым и средним пролетом среза по сравнению с принятой моделью в своде правил. При изменении формы оси арки (при условии, что шарниры A и B остаются на месте, а ключевой шарнир передвигается по вертикали вверх или вниз) распор изменяется обратно пропорционально величине стрелы арки f . Таким образом, более пологая арка ($a/h_0 = 3$) имеет больший распор, чем арка с большим значением f ($a/h_0 = 1$).

Линия арки достигает своего оптимального положения в случае, когда суммарный изгибающий момент на всем протяжении криволинейной оси системы обращается в нуль.

На основании этого условия для любой заданной вертикальной нагрузки при любом расположении шарниров A , B и C можно подобрать рациональное сечение арки, обеспечивающее отсутствие изгиба. Так, в случае нагружения равномерно распределенной нагрузкой q по пролету l рациональная ось арки описывается уравнением квадратной параболы (относительно системы координат с началом в точке A):

$$y = 4fx(l-x)/l^2. \quad (5)$$

Очевидно, что в состоянии системы ничего не изменится, если шарнир будет помещен не в середине пролета, а в произвольной точке, так как момент во всех сечениях равен нулю.

Тогда для произвольного сечения арки (опоры которой расположены на одном уровне) поперечная сила от вертикальной нагрузки

$$Q = (V_A - \sum P_i) \cos \alpha - H \sin \alpha, \quad (6)$$

где под знаком суммы стоят силы, расположенные слева от рассматриваемого сечения (рис. 3).

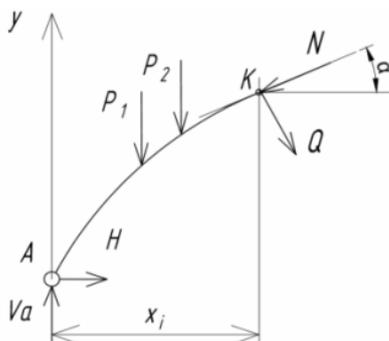


Рис. 3. Схема усилий при расчете железобетонных балок со средним относительным пролетом среза ($1 \leq a/h_0 \leq 3$)

Учитывая, что поперечная сила в соответствующем сечении простой арки с горизонтальной осью (при заданном нагружении) определяется выражением

$$Q^0 = V_A - \sum P_i, \quad (7)$$

получаем:

$$Q = Q^0 \cos \alpha - H \sin \alpha. \quad (8)$$

Как видим, в трехшарнирной арке не только эпюра изгибающих моментов, но и эпюра поперечных сил имеет меньшие значения, чем в простой балке.

Спроецировав все силы на касательную к оси арки в сечении K , определим продольную силу как

$$N = -(Q^0 \sin \alpha - H \cos \alpha). \quad (9)$$

Уменьшение моментов и поперечных сил в сечении влечет за собой появление усилия, характеризующего сжатый наклонный бетонный подкос.

В рассматриваемой расчетной модели предельное состояние по сжатой зоне предлагается оценивать аналогично коротким балкам. При этом ширину сжатого бетонного подкоса рекомендуется определять из условия равновесия в стадии разрушения согласно действующему Своду правил:

$$l_b = R_s A_s / R_b b. \quad (10)$$

Расчет прочности сжатой зоны балок с $1 \leq a/h_0 \leq 3$ (с учетом поперечной арматуры) производить по продольной силе по наиболее опасному сечению:

$$N \leq N_b + N_s, \quad (11)$$

где N – продольное усилие в сжатой бетонной полосе, определяемое от внешних сил по зависимости (9); N_b – продольное усилие, воспринимаемое бетоном,

$$N_b = \varphi_b \gamma_b R_b b l_b, \quad (12)$$

N_s – усилие, воспринимаемое поперечной арматурой; φ_b – коэффициент, учитывающий влияние бетона, окружающего расчетную полосу; γ_b – коэффициент, полученный на основе экспериментов.

Расчет прочности растянутой зоны определяется по условию

$$H \leq \gamma_s R_s A_s, \quad (13)$$

где H – продольное усилие в горизонтальном растянутом арматурном поясе (распор), определяемое от внешних сил по зависимости (4); γ_s – опытный коэффициент; A_s – площадь растянутой продольной арматуры.

Расчеты прочности сжатой наклонной и растянутой зон производятся независимо друг от друга.

Выводы

Предложен инженерный метод оценки прочности железобетонных балок без распределенной арматуры со средним относительным пролетом среза ($1 \leq a/h_0 \leq 3$) по арочной модели.

Приводится методика расчета, объединяющая два существующих подхода к оценке прочности железобетонных балок.

Расчет прочности рекомендуется производить по сжатой и растянутой зонам. По разработанной модели, предельное состояние по сжатой зоне наступает при достижении предела прочности сжатой наклонной бетонной полосы, а по растянутой – при достижении предела прочности арматуры в горизонтальной затяжке (распоре).

Список литературы

1. Филатов, В.Б. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил / В.Б. Филатов, А.С. Арцыбасов, М.А. Багаутдинов, Д.И.Гордеев, А.И. Картунов, Р.А. Никитин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С. 642–645.
2. Кодыш, Э.Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Теркин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №6. – С.25–28.
3. Snezhkina, O.V. Strength assessment modeling for reinforced concrete beams in transverse forces zone / O.V. Snezhkina // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). – 2019. – Vol. 1. – P.504–508. – URL: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.99>
4. Снежкина, О.В. Оценка прочности железобетонных балок по экспериментальным данным / О.В. Снежкина, А.А. Киселев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 2(31). – С.127–132.
5. Баранова, Т.И. Каркасно-стержневые расчетные модели и инженерные методы расчета железобетонных конструкций / Т.И. Баранова, А.С. Залесов. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 240 с.
6. Лаврова, О.В. Прочность железобетонных коротких балок на основе каркасно-стержневых моделей / О.В. Лаврова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1(34). – С. 91–96.
7. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38). – С. 119–123.
8. Garkina, I. Property modelling and durability of composite materials / I. Garkina, A. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019.

References

1. Filatov, V.B. Analysis of calculation models when calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete beams on the action of transverse forces / V.B. Filatov, A.S. Artsybasov, M.A. Bagautdinov, D.I. Gordeev, A.I. Kortunov, R.A. Nikitin // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2014.– Vol. 16, No. 4 (3). – P. 642–645.

2. Kodysh, E.N. Improving the regulatory framework for the design of reinforced concrete structures / E.N. Kodysh, N.N. Terkin // *Industrial and civil construction*. – 2016. – No. 6. – P.25–28.
3. Snezhkina, O.V. Strength assessment modeling for reinforced concrete beams in transverse forces zone / O.V. Snezhkina // *Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST)*. – 2019. – Vol. 1. – P.504–508. – URL: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.99>
4. Snezhkina, O.V. Strength assessment of reinforced concrete beams according to experimental data / O.V. Snezhkina, A.A. Kiselev // *Regional architecture and engineering*. – 2017. – No. 2 (31). – P.127–132.
5. Baranova, T.I. Frame-rod calculation models and engineering methods for calculating reinforced concrete structures / T.I. Baranova, A.S. Zalesov. – M.: Publishing house of the DIA, 2003. – 240 p.
6. Lavrova, O.V. Strength of reinforced concrete short beams based on frame-rod models / O.V. Lavrova // *Regional architecture and engineering*. – 2018. – №1 (34). – P. 91–96.
7. Garkina, I.A. Unified concept of system design of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional Architecture and engineering*. – 2019. – No. 1 (38) – P. 119-123.
8. Garkina, I. Property modelling and durability of composite materials / I. Garkina, A. Danilov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.16

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»

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Инженерно-вычислительные
системы»
E-mail: koshev@pguas.ru

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

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Grishin Boris Mikhailovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the department «Water supply,
sewerage and hydraulic engineering»
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Bikunova Marina Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Water supply, sewerage
and hydraulic engineering»

Koshev Alexander Nikolaevich,
Doctor of Chemistry Science, Professor of the
department «Information and computing
systems»
E-mail: koshev@pguas.ru

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОАГУЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ПРИ БЕЗНАПОРНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ПУЗЫРЬКАМИ ВОЗДУХА РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ

Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, А.Н. Кошев, А.И. Шеин

Теоретический анализ процесса гидропневматического перемешивания природной воды с раствором коагулянта показал, что при всплывании в толще обрабатываемой воды полидисперсных пузырьков воздуха могут образовываться локальные турбулентные возмущения с градиентом скорости до 2500 с^{-1} и выше.

Наличие локальных зон с повышенными значениями градиента скорости приводит к более равномерному распределению раствора коагулянта в объеме смесителя, ускорению процесса коагуляции примесей и повышению эффекта последующего осветления воды отстаиванием. Экспериментально установлено, что при гидропневматическом перемешивании максимальный эффект осветления обрабатываемой коагулянтами природной воды достигается при соотношении объемов мелкодисперсных и крупнодисперсных пузырьков воздуха, равном 3:1, при этом оптимальные дозы коагулянта могут быть снижены на 8-12 %.

Ключевые слова: природная вода, коагуляция примесей, гидропневматическое перемешивание, локальный градиент скорости, дисперсность пузырьков воздуха, эффект осветления

THE EFFECTIVENESS OF WATER COAGULATION TREATMENT WITH NON-PRESSURE MIXING BY AIR BUBBLES OF VARIOUS DISPERSION

B.M. Grishin, M. V. Bikunova, A. N. Koshev, A.I. Shein

Theoretical analysis of natural water hydropneumatic mixing process with a coagulant solution has shown that when polydisperse air bubbles pop up in the treated water column, local turbulent perturbations with a velocity gradient of up to 2500 s^{-1} and higher can be formed.

The presence of local zones with increased values of the velocity gradient leads to a more uniform coagulant distribution in the mixer volume, speeding up the process of impurities coagulation and increasing the effect of subsequent water clarification by settling. It has been experimentally established that with hydropneumatic mixing, the maximum effect of natural water clarification treated with the coagulant is achieved when the ratio of fine and coarse air bubbles volumes is equal to 3:1, while the optimal doses of the coagulant can be reduced by 8-12 %.

Keywords: natural water, impurities coagulation, hydropneumatic mixing, local velocity gradient, dispersion of air bubbles, clarification effect

Коагуляционная обработка очень часто применяется при очистке воды от органических и неорганических примесей различного происхождения. От того, как осуществляется этот процесс на водоочистой станции, в основном зависит качество очищенной воды, используемой потребителями. На эффективность коагуляционной обработки воды и последующей её очистки оказывают влияние многочисленные факторы. Наряду с качеством воды, типом реагента и его дозой, важную роль в коагуляции примесей играет выбор способа перемешивания воды с коагулянтом.

Значительного увеличения плотности коагуляционных структур можно достичь осуществлением процесса смешения раствора коагулянта с водой в присутствии пузырьков воздуха (Егоров А.И.). Пузырьки воздуха, являясь центрами хлопьеобразования, в определенной степени предотвращают разрушение образовавшихся коагуляционных структур за счёт увеличения поверхности контакта с коагулирующими частицами и демпфирования турбулентных пульсаций в потоке воды.

При гидропневматическом безнапорном перемешивании воды с раствором коагулянта общий усредненный скоростной градиент в смесителе складывается из двух составляющих

$$G = G_W + G_a, \quad (1)$$

где G_W – усредненный градиент скорости, возникающий за счёт гидравлического сопротивления движению жидкости, с^{-1} ; G_a – усредненный градиент скорости, возникающий за счёт всплывания массы пузырьков воздуха, с^{-1} .

Значения G_W и G_a , приведенные к общему объему смесителя, обычно сопоставимы по величине [1].

По данным [2], величина G при перемешивании в безнапорном режиме должна находиться в пределах $110\text{-}450 \text{ с}^{-1}$. Существующие конструкции типовых гидравлических безнапорных смесителей даже при обеспечении рекомендуемых значений G , как правило, не позволяют достичь быстрого и равномерного перемешивания раствора коагулянта с водой. При введении в гидравлический смеситель пузырьков воздуха кроме увеличения количества центров хлопьеобразования ускоряется процесс равномерного распределения раствора коагулянта в объеме смесителя за счёт создания всплывающими пузырьками воздуха локальных градиентов скорости

$$G_L = \sqrt{\frac{N_b}{m_b \cdot v}}, \text{ с}^{-1}, \quad (2)$$

где N_b – мощность, затрачиваемая на перемешивание жидкости при всплывании пузырька объемом W_b , Вт; m_b – масса перемешиваемой пузырьком жидкости, кг; v – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Величина N_B может быть определена по формуле

$$N_B = F_{Ar} \frac{\Delta l}{\Delta t} = F_{Ar} \cdot v_B, \quad (3)$$

где Δl – расстояние, которое пройдёт пузырёк воздуха за время Δt со скоростью v_B ; F_{Ar} – сила Архимеда, действующая на пузырёк воздуха,

$$F_{Ar} = W_B \cdot g(\rho - \rho_a), \text{ Н}; \quad (4)$$

здесь W_B – объём пузырька диаметром d_B , м³; ρ и ρ_a – соответственно плотности воды и воздуха, кг/м³.

С учётом (3) и (4) формулу (2) можно представить в виде

$$G_L = \sqrt{\frac{W_B g(\rho - \rho_a) v_B}{m_{B1} \cdot v}}, \text{ с}^{-1}, \quad (5)$$

где m_{B1} – масса жидкости в локальном объёме перемешивания за единичным пузырьком.

Величина локального градиента скорости G_L значительно больше усредненных величин G_a и G_W за счёт того, что суммарный объём области турбулентных возмущений, образующихся за всплывающими пузырьками воздуха, намного меньше общего объёма смесителя.

При площади поперечного сечения пузырька воздуха $f_B = \frac{\pi d_B^2}{4}$ масса перемешиваемой им жидкости за время Δt

$$m_B = \frac{\pi d_B^2}{4} \cdot v_B \cdot \Delta t \cdot \rho, \text{ кг}. \quad (6)$$

Подставив в формулу (5) выражение (4), получим:

$$G_L = \sqrt{\frac{4W_B g}{\pi d_B^2 \cdot v \cdot \Delta t} \cdot \frac{\rho - \rho_a}{\rho}}, \text{ с}^{-1}. \quad (7)$$

Учитывая, что объём пузырька воздуха $W_B = \frac{\pi d_B^3}{6}$, формулу (7) можно представить в виде:

$$G_L = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{d_B g}{v \cdot \Delta t} \cdot \frac{\rho - \rho_a}{\rho}} = K_1 K_t \sqrt{d_B}, \text{ с}^{-1}, \quad (8)$$

где $K_1 = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{g}{v} \cdot \frac{\rho - \rho_a}{\rho}}$ – коэффициент, учитывающий физические свойства жидкости,

$\text{с}^{-0,5} \cdot \text{м}^{-0,5}$; $K_t = \sqrt{\frac{1}{\Delta t}}$ – коэффициент, учитывающий время локального перемешивания, $\text{с}^{-0,5}$.

При среднем диаметре пузырька воздуха $d_B > 1,3$ мм наблюдается турбулентный режим его всплывания со скоростью $v_B = 0,26-0,3$ м/с и траекторией движения в виде спирали, что ускоряет процесс перемешивания раствора коагулянта с водой. Расчёты, произведенные в соответствии с рекомендациями Бабенкова Е.Д., показывают, что время локального перемешивания Δt составляет порядка 0,01 с.

График зависимости $G_L = f(d_B)$ при $\Delta t = 0,01$ с, $v = 10^{-6}$ м²/с, $\rho = 1000$ кг/м³ и $\rho_a = 1,29$ кг/м³ для пузырьков воздуха, всплывающих в турбулентном режиме, показан на рис. 1.

Из графика видно, что при увеличении диаметра пузырька d_B с 1,5 до 10 мм локальный градиент скорости G_L возрастает с 943 до 2560 с⁻¹.

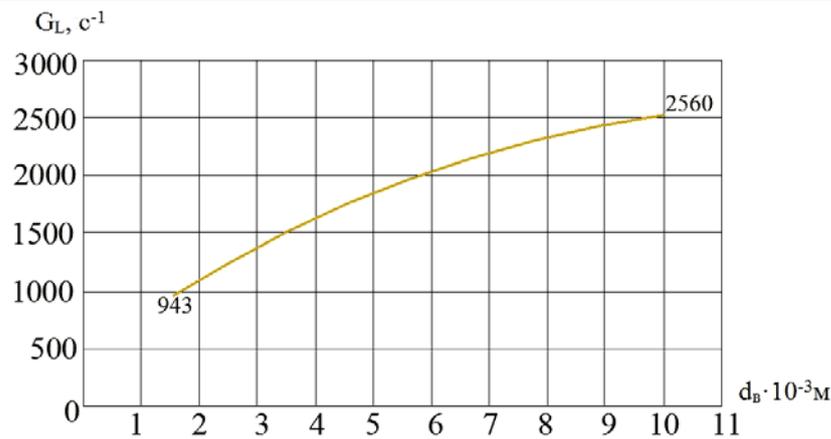


Рис. 1. Зависимость локального градиента скорости G_L от диаметра d_b всплывающего пузырька воздуха

Экспериментальные исследования процесса гидропневматического перемешивания проводились на речной воде, замутненной с помощью тонкоизмельченной каолиновой глины. Концентрация взвешенных веществ в исходной воде на разных этапах экспериментов поддерживалась на двух уровнях: $C_0=(0,33-0,34) \cdot 10^{-4}$ и $C_0=(1,1-1,13) \cdot 10^{-4}$, температура составляла 20-22⁰С, щелочность находилась в пределах 2,2–2,3 ммоль/л, рН менялся от 7,6 до 7,85.

Эксперименты проводились на лабораторной установке, состоящей из приёмного бака, повысительного насоса, компрессора и вертикального смесителя диаметром 100 мм и высотой 3 м, оснащенного трубчатыми аэраторами, позволяющими получать пузырьки воздуха крупностью 8-10 мм.

В трубопровод водной суспензии перед смесителем вводился раствор коагулянта (сульфата алюминия с содержанием Al_2O_3 16 %) и поток суспензии с тонкодисперсными пузырьками воздуха (0,2-0,4 мм), полученными в вихревом смесительном устройстве (ВСУ), которое используется для создания водовоздушных смесей при различных технологиях очистки природных и сточных вод [3]. Таким образом, в вертикальном смесителе 4 для ускорения процессов коагуляции взвешенных веществ образовывалась водовоздушная смесь из мелких и крупных пузырьков воздуха с различным объёмным соотношением. В процессе экспериментов соотношение коэффициентов воздухонасыщения (объёмов) мелких (ϕ_s) и крупных (ϕ_l) пузырьков воздуха изменялось от 2:1 до 3:1. Полученные опытные данные сравнивались с результатами экспериментов при использовании только тонкодисперсной водовоздушной смеси.

Суммарный коэффициент воздухонасыщения $\phi=\phi_s+\phi_l$ в вертикальном смесителе в процессе экспериментов изменялся от 0,092 до 0,185. При использовании в экспериментах только тонкодисперсной водовоздушной смеси принималось, что $\phi_s=\phi$. Величина суммарного градиента скорости G (см. формулу (1)) находилась в пределах 350-360 с^{-1} при времени перемешивания водовоздушной смеси с коагулянтном порядка 60-65 с.

Доза коагулянта D_k в экспериментах при концентрации взвеси в исходной воде $C_0=(0,33-0,34) \cdot 10^{-4}$ изменялась от 12 до 28 мг/л, а при $C_0=(1,1-1,12) \cdot 10^{-4}$ – от 27 до 43 мг/л по товарному продукту.

Водная суспензия после гидропневматического смешения с раствором коагулянта попадала в переливную камеру смесителя, из которой забирались пробы воды на анализ. Отбор проб осуществлялся в стеклянные цилиндры, где они отстаивались в течение 60 минут.

Эффективность коагуляции оценивалась по эффекту осветления воды после отстаивания

$$E = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где C_0 и C – концентрации взвешенных веществ соответственно в исходной воде и воде после отстаивания.

Концентрации взвешенных веществ в воде определялись фотометрическим методом.

На рис. 2–4 представлены результаты исследований по осветлению воды с концентрацией $C_0=0,33 \cdot 10^{-4}$ после её перемешивания с коагулянтом в присутствии пузырьков воздуха различной степени дисперсности. Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что с увеличением степени воздухо насыщения воды в смесителе с $\varphi=0,092$ до $\varphi=0,185$ эффект осветления отстаиванием также увеличивается в пределах 5-6 %. При небольшом воздухо насыщении ($\varphi=0,092$) максимальный эффект осветления ($E=82-83\%$) наблюдался при использовании только мелких пузырьков воздуха (график 1, рис. 2), а оптимальная доза коагулянта составляла порядка 25,5 мг/л (точка А). С увеличением воздухо насыщения максимальный эффект осветления воды был достигнут при соотношении $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$ (графики 2, рис. 3, 4), а оптимальная доза коагулянта уменьшилась до 21 мг/л (точка В, рис. 4), в то время как при $\varphi_s = \varphi$ оптимальная доза сульфата алюминия составила 24 мг/л (точка А, рис. 4). Эффект осветления при соотношении $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$ был минимальным, а оптимальные дозы коагулянта во всех случаях превышали 26 мг/л (точки С на графиках 3, рис. 2–4).

Результаты экспериментов по отстаиванию воды с исходной концентрацией взвешенных веществ $C_0=1,1 \cdot 10^{-4}$ показаны на рис. 5–7. Максимальный эффект осветления ($E=91-93\%$) во всех опытах был получен при использовании водовоздушной смеси с соотношением объёмов мелкодисперсных и крупнодисперсных пузырьков воздуха, равным 3:1 (графики 2 на рис. 5–7). При увеличении общего воздухо насыщения воды в смесителе с $\varphi=0,092$ до $\varphi=0,185$ оптимальная доза коагулянта для соотношения $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$ уменьшалась с 41,5 до 38 мг/л (точки В на графиках рис. 5–7). Для соотношения $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$ и $\varphi_s = \varphi$ эффект осветления был ниже (графики 1 и 3 на рис. 5–7) и при увеличении φ оптимальные дозы коагулянта практически не уменьшались (точки А и С на графиках рис. 5–7). Следует также отметить, что с увеличением доз коагулянта влияние величины воздухо насыщения на эффект осветления уменьшалось, что связано, очевидно, с образованием достаточного количества центров хлопьеобразования за счёт повышенных концентраций взвешенных частиц и продуктов гидролиза коагулянта.

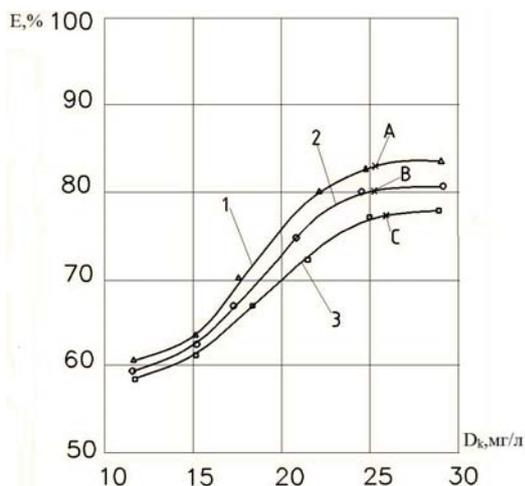


Рис. 2. Зависимость эффекта осветления воды от доз коагулянта для $C_0=0,33 \cdot 10^{-4}$, $\varphi=0,092$ при:

1 – $\varphi_s = \varphi$, $\varphi_l = 0$; 2 – $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$;

3 – $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$

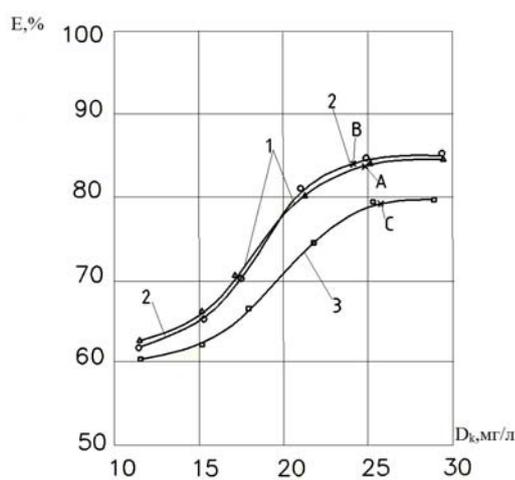


Рис. 3. Зависимость эффекта осветления воды от доз коагулянта для $C_0=0,33 \cdot 10^{-4}$, $\varphi=0,14$ при:

1 – $\varphi_s = \varphi$, $\varphi_l = 0$; 2 – $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$;

3 – $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$

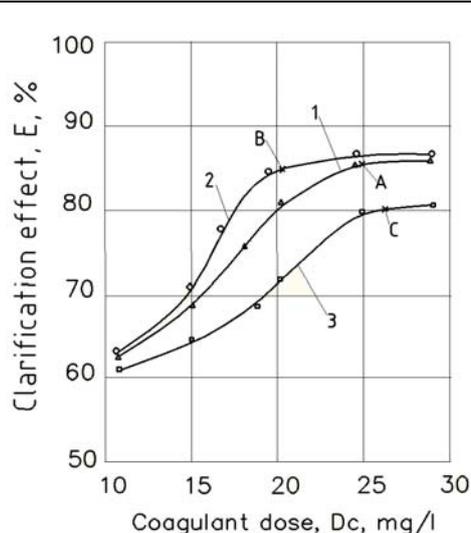


Рис. 4. Зависимость эффекта осветления воды от доз коагулянта для $C_0=0,33 \cdot 10^{-4}$, $\varphi=0,185$ при:

1 – $\varphi_s=\varphi$, $\varphi_l=0$; 2 – $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$;

3 – $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$

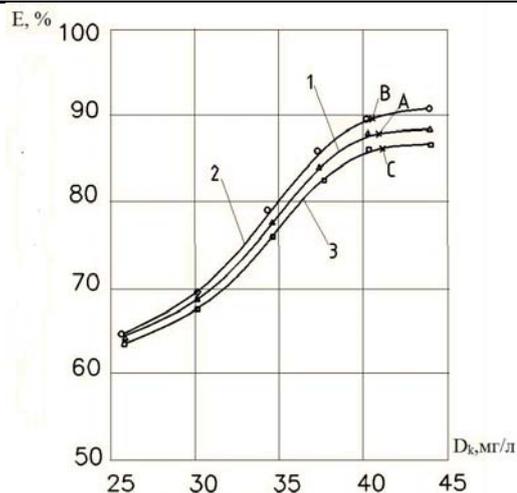


Рис. 5. Зависимость эффекта осветления воды от доз коагулянта для $C_0=1,1 \cdot 10^{-4}$, $\varphi=0,092$ при:

1 – $\varphi_s=\varphi$, $\varphi_l=0$; 2 – $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$;

3 – $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$

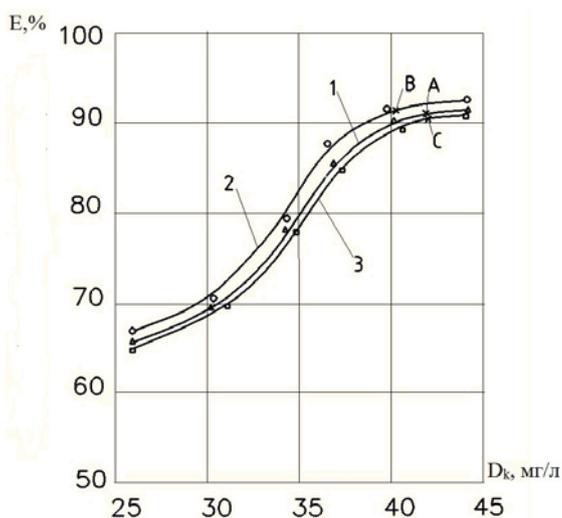


Рис. 6. Зависимость эффекта осветления воды от доз коагулянта для $C_0=1,1 \cdot 10^{-4}$, $\varphi=0,14$ при:

1 – $\varphi_s=\varphi$, $\varphi_l=0$; 2 – $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$;

3 – $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$

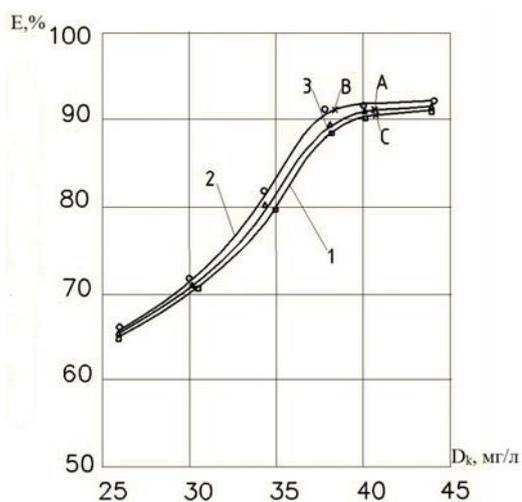


Рис. 7. Зависимость эффекта осветления воды от доз коагулянта для $C_0=1,1 \cdot 10^{-4}$, $\varphi=0,185$ при:

1 – $\varphi_s=\varphi$, $\varphi_l=0$; 2 – $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$;

3 – $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$

Ухудшение эффекта осветления при $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$ объясняется разрушением образующихся коагуляционных структур за счёт высоких значений локальных градиентов скорости, вызванных всплыванием большого количества крупных пузырьков воздуха.

ВЫВОДЫ

1. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что наличие крупных пузырьков воздуха в полидисперсной водовоздушной смеси при гидропневматическом перемешивании воды с раствором коагулянта может приводить к повышению эффективности процессов коагуляции примесей за счёт возникновения в потоке обра-

батываемой воды локальных градиентов скорости, значительно превышающих по величине усреднённые значения скоростного градиента, отнесенного к общему объёму смесителя.

2. При коагуляционной обработке воды с объёмными концентрациями взвешенных веществ $0,33 \cdot 10^{-4}$ и $1,1 \cdot 10^{-4}$ наилучшие условия коагуляции примесей, обеспечивающие максимальный эффект последующего осветления воды отстаиванием (91-93 %), достигаются при воздухомыщении φ полидисперсной водовоздушной смеси от 0,14 до 0,185 и соотношении объёмов мелкодисперсных ($d=0,2-0,4$ мм) и крупнодисперсных ($d=8-10$ мм) пузырьков воздуха φ_s/φ_l , равном 3:1. Увеличение доли крупнодисперсных пузырьков воздуха в общем объёме водовоздушной смеси до 33 % приводит к ухудшению процесса коагуляции примесей за счёт разрушения образующихся коагуляционных структур.

3. Оптимальные дозы коагулянта – сернокислого алюминия – при соотношении объёмов пузырьков в смесителе $\varphi_s/\varphi_l = 3:1$ могут быть уменьшены на 8-12 % по сравнению с соотношениями $\varphi_s/\varphi_l = 2:1$ и $\varphi_s = \varphi$, при этом более значимая экономия коагулянта достигается при меньших значениях мутности исходной воды.

4. Полученные результаты исследований целесообразно использовать при проектировании и реконструкции гидравлических и гидропневматических безнапорных смесительных устройств на станциях водоподготовки.

Список литературы

1. Драгинский, В.Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева, С.В. Гетманцев. – М., 2005. – 576 с.
2. Yamuna, S.V. Application of low-mixing energy for the coagulation process / S.V. Yamuna, A.G. Graham // Water Research. – 2015. – №84. – P. 333–341.
3. Grishin, B.M. Water purification of a surface source with the use of concentrated coagulation and aeration / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, A.N. Koshev, N.G. Vilkova, K.L. Chertes // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol 11, № 14. – P. 8149–8152.

References

1. Draginskii, V.L. Coagulation in natural water treatment technology / V.L. Draginskii, L.P. Alekseeva, S.V. Getmantsev. – M., 2005. – 576 p.
2. Yamuna, S.V. Application of low-mixing energy for the coagulation process / S.V. Yamuna, A.G. Graham // Water Research. – 2015. – №84. – P. 333–341.
3. Grishin, B.M. Water purification of a surface source with the use of concentrated coagulation and aeration / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, A.N. Koshev, N.G. Vilkova, K.L. Chertes // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol 11, № 14. – P. 8149–8152.

УДК 621.6.036

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054, Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77,
тел.: (8452) 51-50-18

Усачев Александр Прокофьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Теплогасоснабжение,
вентиляция, водообеспечение
и прикладная гидрогазодинамика»
E-mail: usachev-ap@mail.ru

АО "Гипрониигаз"

410012, Россия, г. Саратов,
проспект им. Кирова С.М., д. 54,
тел.: (845-2) 74-94-95

Шурайц Александр Лазаревич,
доктор технических наук, генеральный
директор АО «Гипрониигаз»
E-mail: Shuraits@niigaz.ru

Бирюков Александр Валерьевич,
кандидат технических наук, директор
научно-исследовательского центра
АО «Гипрониигаз»
E-mail: Biryukov@niigaz.ru

АО "Ревизия контроллинг Консалтинг"

Пикалов Александр Анатольевич,
аспирант, эксперт по надзору
E-mail: pikalov-181978@yandex.ru

*Saratov State Technical University named
after Gagarin Yu.A.*

410054, Russia, Saratov,
77, Politechnicheskaya St.,
tel.: (8452) 51-50-18

Usachev Alexander Prokofievich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and Applied
Hydrogasodynamics»
E-mail: usachev-ap@mail.ru

Joint Stock Company "Giproniigas"

410012, Russia, Saratov,
54, Kirov Avenue,
tel.: (845-2) 74-94-95

Shurayts Alexander Lazarevich,
Doctor of Sciences, General Director of JSC
«Gipronigas»
E-mail: Shuraits@niigaz.ru

Biryukov Alexander Valeryevich,
Candidate of Sciences, Director of the
research center of Giproniigaz PLC
E-mail: Biryukov@niigaz.ru

*Stock Company «Audit, Controlling,
Consulting»*

Pikalov Alexander Anatolievich,
Postgraduate student, Expert on supervision
E-mail: pikalov-181978@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОСАЖДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ФИЛЬТРУЮЩИМИ КАРТРИДЖАМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА

А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Бирюков, А.А. Пикалов

Представлены разработанные принцип и методические положения по предотвращению осаждения механических примесей в зазоре между фильтрующими картриджами предварительной и тонкой очистки газового двухступенчатого фильтра путем увеличения размера ячеек первых по направлению течения газа фильтрующих слоев тонкой очистки по сравнению с размерами ячеек сетки предварительной очистки.

Ключевые слова: методические положения, предотвращение осаждения, механические примеси, зазор, фильтрующие картриджи, предварительная и тонкая очистка, газовый двухступенчатый фильтр

DEVELOPMENT THE METHODOLOGY FOR PREVENTION DEPOSITION OF MECHANICAL IMPURITIES IN THE GAP BETWEEN FILTER CARTRIDGES OF PRELIMINARY AND THIN CLEANING OF A TWO-STAGE GAS FILTER

A.P. Usachev, A.L. Shuraitis, A.V. Biryukov, A.A. Pikalov

The article is devoted to the development of the principle and methodology for preventing the deposition of mechanical impurities in the gap between the filter cartridges for preliminary and fine cleaning of a two-stage gas filter by increasing the cell size of the first fine filter layers in the direction of the gas flow, in comparison with the size of the cells of the preliminary filter.

Keywords: methodology, prevention of sedimentation, mechanical impurities, clearance, filter cartridges, preliminary and fine cleaning, two-stage gas filter

1. Актуальность разработки методических положений по предотвращению осаждения механических примесей в зазоре между фильтрующими картриджами предварительной и тонкой очистки газового двухступенчатого фильтра

Обеспечение надежной эксплуатации современного оборудования по регулированию выходного давления природного газа в головных пунктах редуцирования газа (ПРГ) достигается за счет применения устройств по двухступенчатой очистке газа, содержащих цилиндрические фильтры высокой пропускной способности предварительной и тонкой очистки [1]. Фрагмент общего вида ПРГ, на котором выделена одна линия редуцирования с установленными на ней цилиндрическими фильтрами высокой пропускной способности предварительной и тонкой очистки общей пропускной способностью 500,0 тыс. м³/ч, приведен на рис. 1, а. Схема двухступенчатой цилиндрической установки (ДЦУ) предварительной и тонкой очистки газа от механических примесей показана на рис. 1, б.

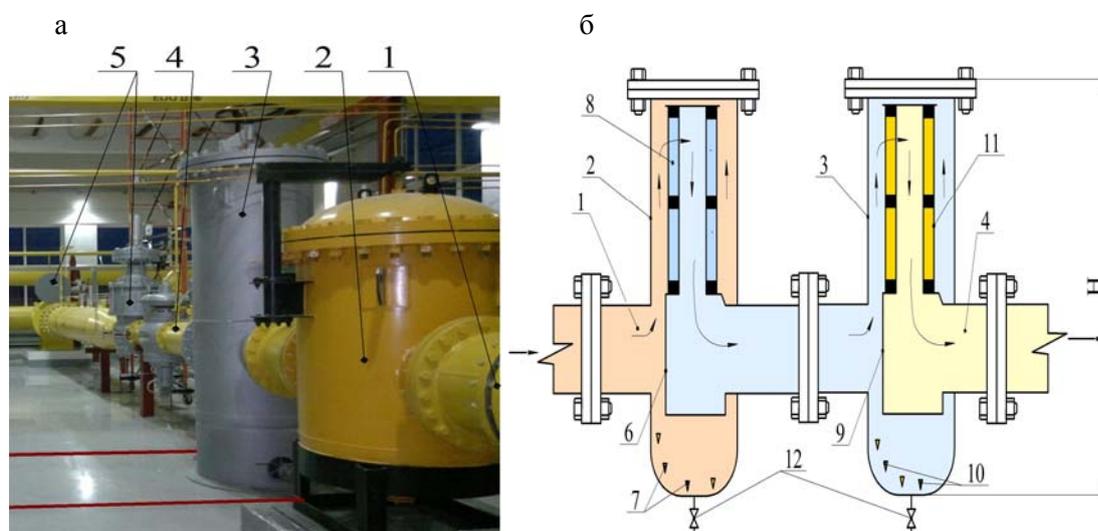


Рис. 1. а – фрагмент общего вида ПРГ; б – схема существующей ДЦУ предварительной и тонкой очистки газа от механических примесей:

1, 4 – входной и выходной патрубки; 2, 3 – цилиндрические корпуса фильтров предварительной и тонкой очистки; 5 – газорегулирующее оборудование; 6, 9 – отбойники крупных и мелких механических примесей; 7, 10 – сборники крупных и мелких механических примесей; 8, 11 – фильтрующие картриджи предварительной и тонкой очистки; 12 – штуцера и краны для удаления крупных и мелких твердых частиц

Недостаток существующих ДЦУ очистки заключается в высокой капитало- и металлоемкости вследствие размещения цилиндрических фильтрующих картриджей (ЦФК) в отдельных корпусах 2 и 3, эксплуатируемых при высоком давлении и

имеющих в этом случае значительные толщины соединительных фланцев и стенок цилиндрических обечаек.

2. Разработка принципа и методических положений по предотвращению осаждения механических примесей в зазоре между фильтрующими картриджами предварительной и тонкой очистки

Для снижения капиталоемкости и металлоемкости существующих ДЦУ газовой очистки АО «Гипрониигаз» [2] предложен новый принцип размещения во внутреннем объеме одного корпуса 1 (рис. 2) двух установленных ЦФК сеток предварительной 7 и тонкой 8 очистки, находящихся на минимально допустимом расстоянии друг от друга, при котором сетка фильтрующего картриджа предварительной очистки 7 в местах сближения с ЦФК тонкой очистки 8 не засоряется интенсивнее по сравнению с участками, расположенными на больших расстояниях, и, следовательно, не происходит увеличения потерь давления между фильтрующими слоями предварительной 7 и тонкой 8 очистки.

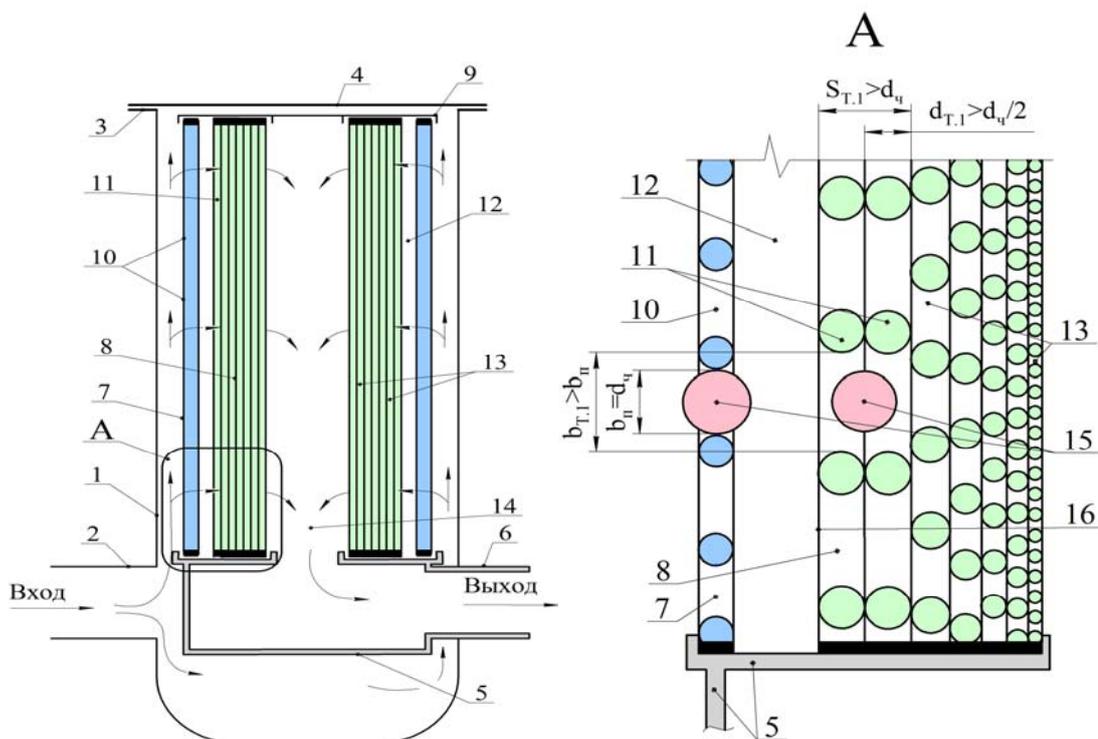


Рис. 2. Схема устройства по предотвращению осаждения твердых частиц в нижней части зазора между ЦФК предварительной и тонкой очистки и сохранению пропускной способности фильтра, фрагмент А (геометрические параметры сеток на увеличенной нижней части ЦФК предварительной и тонкой очистки):

1 – вертикальный цилиндрический корпус; 2, 6 – входной и выходной патрубки; 3, 4 – фланец и крышка фильтра; 5 – стакан; 7, 8 – ЦФК предварительной и тонкой очистки; 9 – крышка для ЦФК 7 и 8; 10 – ячейки ЦФК предварительной очистки; 11 – первые по направлению течения газа фильтрующие слои ЦФК тонкой очистки; 12 – зазор между ЦФК предварительной и тонкой очистки; 13 – третий и последующие за ним по направлению течения газа фильтрующие слои ЦФК тонкой очистки; 14 – внутреннее пространство для выхода очищенного газа; 15 – максимальный диаметр твердой частицы, который проходит через ячейки сетки ЦФК предварительной очистки; 16 – граница между зазором 12 и первыми по направлению течения газа фильтрующими слоями ЦФК тонкой очистки

Недостатком данной ДЦУ является осаждение и накопление твердых частиц в нижней части зазора между ЦФК предварительной и тонкой очистки, поскольку выходящие из ЦФК предварительной очистки твердые частицы с размером больше ячеек первых слоев фильтрующего полотна, соударяясь с его поверхностью, частично оседают на ней, а частично падают в нижнюю часть зазора между ЦФК предварительной и тонкой очистки. Постепенно скапливаясь, твердые частицы образуют сплошной слой и закупоривают ячейки нижней части ЦФК предварительной и тонкой очистки, что приводит к уменьшению их пропускной способности.

В целях предотвращения осаждения твердых частиц в нижней части зазора 12 между ЦФК предварительной и тонкой очистки и сохранения их пропускной способности АО «Гипрониигаз» предложено следующее соотношение размеров ячеек сеток ЦФК предварительной и тонкой очистки:

1) фильтрующий элемент предварительной очистки 7 выполнен из плетеной металлической сетки, которая имеет ячейки 10 размером b_n и поэтому может пропускать твердые частицы 15 максимальным диаметром d_q , равным размеру b_n ячеек сетки ЦФК 7 предварительной очистки, то есть $d_q = b_n$;

2) фильтрующий элемент тонкой очистки 8 выполнен из многослойного полотна, состоящего из ряда сеток, расположенных одна за другой, внутри которых будут осажаться твердые частицы. При этом хотя бы два первых по направлению течения газа слоя 11 имеют ячейки с размером $b_{т.1}$, большим, чем максимальный диаметр твердых частиц 15, то есть:

$$b_{т.1} > d_q. \quad (1)$$

Диаметр 11 нитей слоев $d_{т.1}$, уложенных один за другим, должен быть больше половины максимального диаметра $d_q/2$ твердых частиц 15, то есть:

$$d_{т.1} > d_q/2, \quad (2)$$

а толщина $S_{т.1}$ хотя бы двух первых по направлению течения газа слоев превышать максимальный диаметр d_q твердых частиц 15, то есть:

$$S_{т.1} > d_q. \quad (3)$$

Для каждого последующего слоя 13 размеры ячеек уменьшаются, но они всегда ниже, чем d_q . Последний слой имеет минимальные размеры ячеек. Следует отметить, что при принятии размеров ячейки условно учитывался только эффект фильтрации, то есть возможность твердой частицы определенного размера проходить через ячейку такого же размера.

Устройство работает следующим образом. Природный газ поступает через входной патрубок 2 и проходит через боковую поверхность фильтрующего картриджа предварительной очистки 7 из плетеной металлической сетки с размером ячейки b_n . Крупные твердые частицы диаметром более d_q , находящиеся в газе, оседают на наружной поверхности ЦФК предварительной очистки 7, а диаметром $d_q = b_n$ проходят через его ячейки. Далее газ проходит через боковую фильтрующую поверхность первых по направлению течения газа слоев 11 ЦФК 8 тонкой очистки, имеющих ячейки с размером $b_{т.1} > b_n$. Твердые частицы диаметром, равным $d_q = b_n$, свободно проходят через первые по направлению течения газа слои 11 картриджа 8 тонкой очистки, имеющие ячейки с размером $b_{т.1} > d_q$, и оседают в их толще. Поскольку нити первых слоев 11 выполняются диаметром $d_{т.1} > d_q/2$, а суммарная их толщина, равная $S_{т.1} = 2 \cdot d_{т.1}$, будет больше диаметра частицы 15, то есть $S_{т.1} > d_q$, то, как показано на фрагменте А рис. 2, частицы 15 не будут выступать своим центром тяжести за границу 16 и, как следствие, попадать в нижнюю часть зазора 12. В этом случае не образуется сплошной слой в нижней части зазора 12 между ЦФЭ предварительной и тонкой очистки, закупоривающий ячейки нижней части ЦФК предварительной и тонкой очистки и не уменьшается пропускная способность ДЦУ.

3. Экспериментальная проверка принципа и методических положений по предотвращению осаждения механических примесей в зазоре между фильтрующими картриджами предварительной и тонкой очистки

С целью проверки возможности сведения к минимуму количества твердых частиц, оседающих в нижней части 14 зазора 12 между ЦФК предварительной 7 и тонкой 8 очистки, и сохранения пропускной способности фильтра был изготовлен, а затем испытан в научно-производственном центре АО «Гипрониогаз» (г. Саратов) газовый двухступенчатый фильтр внутренним диаметром $D=160$ мм с ЦФК предварительной очистки, выполненным на основе металлической сетки высокой точности из бронзы с квадратной ячейкой размером 0,2 мм согласно [3].

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Для испытания в качестве рабочей среды использовался воздух высокого давления с находящимися в нем песчаными частицами следующих фракций: 0,25; 0,2; 0,15; 0,1; 0,05 мм в равных долях 0,2 д.е. в общей массе песчаной смеси. Приготовленная песчаная смесь указанного дисперсионного состава засыпалась в сосуд 8, откуда через дозировочное отверстие 9 поступала в поток воздуха. Выравнивание давлений в сосуде 8 и подводящем к нему трубопроводе осуществлялось с помощью линии 7. Подсасывание песчаной смеси из сосуда 8 осуществлялось с помощью эжектора 10, а равномерное ее распределение в потоке воздуха с помощью распределителя 11. Для контроля изменения пропускной способности и определения по расходу газа значений его скорости на входе в ячейки ЦФК предварительной и тонкой очистки использовался вихревой счетчик 27 с турбулизатором 26, прибор по обработке сигналов 31 с выводом на компьютер 34 для графического отображения значений перепадов давления и расхода. Определение времени проверки количества осевших твердых частиц в нижней части зазора 12 осуществлялось в зависимости от значений перепада давлений до и после ЦФК предварительной очистки 13, 15 и ЦФК тонкой очистки 14 и 16 с помощью датчиков-преобразователей дистанционных 17 и 18.

Фильтрующие картриджи тонкой очистки были выполнены в двух вариантах.

Первый вариант. Фильтрующее полотно картриджа 8 выполнено на основе сетки высокой точности с количеством слоев, равным семи, из бронзы согласно [3]. Номер сетки в ряду n , размеры квадратных ячеек $b_{т.1}$, диаметры проволоки $d_{т.1}$ ЦФК тонкой очистки для варианта №1 приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Номер сетки в ряду n , размеры квадратных ячеек $b_{т.1}$, диаметры проволоки $d_{т.1}$ для ЦФК тонкой очистки по варианту №1

Номер сетки n	1	2	3	4	5	6	7
Размер ячейки $b_{т.1}$, мм	0,22	0,22	0,18	0,14	0,1	0,071	0,04
Диаметр проволоки $d_{т.1}$, мм	0,12	0,12	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03

Первые два слоя 11 по направлению течения газа имеют ячейки с размером $b_{т.1} > b_n$, то есть $0,22 > 0,2$ мм, когда твердые частицы максимальным размером, равным $d_q = b_n$, то есть $d_q = 0,2$ мм, свободно проходят через ячейки с размером $b_{т.1} > d_q$ ($0,22 > 0,2$ мм). Металлические нити этих двух первых слоев 11 выполняются диаметром $d_{т.1}$, большим половины максимального диаметра $d_q/2$ твердых частиц 15, то есть $d_{т.1} > d_q/2$, а толщина слоя, равная $S_{т.1} = 2 \cdot d_{т.1}$, будет больше диаметра частицы 15, то есть $S_{т.1} > d_q$ ($0,22 > 0,2$ мм). Поскольку толщина $S_{т.1}$ превышает максимальный диаметр d_q твердой частицы 15, то есть $S_{т.1} > d_q$, то, как показано на фрагменте А рис. 2, она не выступает своим центром тяжести за границу 16 этого слоя и, как следствие, не падает в нижнюю часть зазора 12.

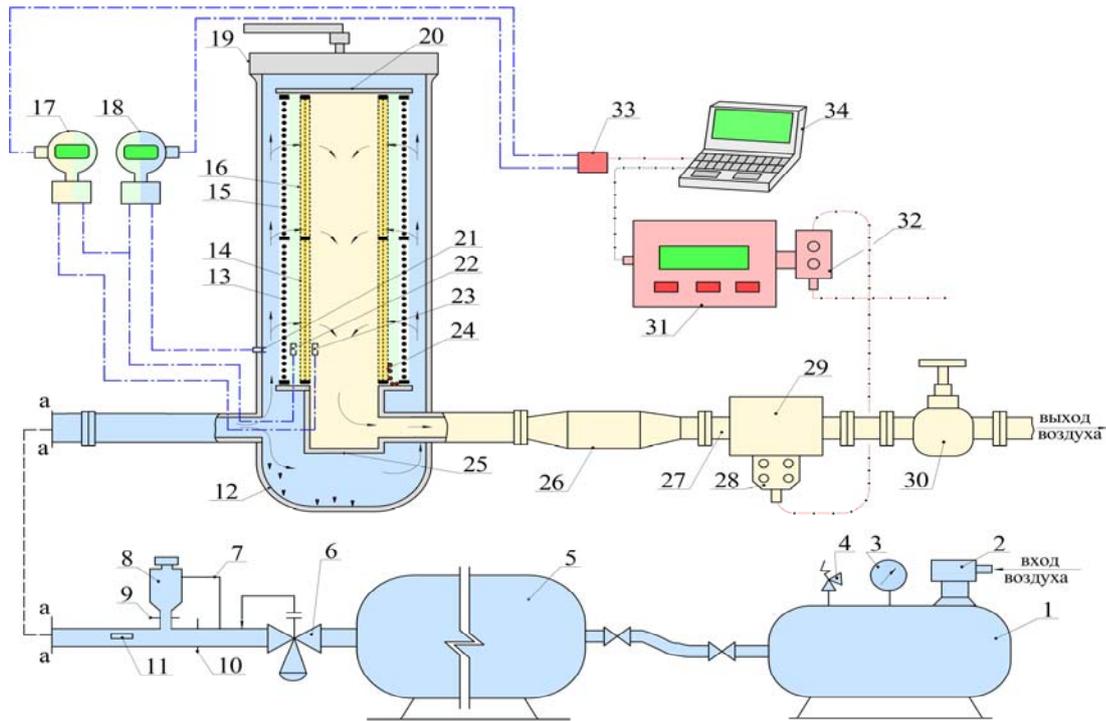


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

1 – стальной ресивер; 2 – компрессор для подачи воздуха; 3 – манометр давления; 4 – клапан сбросной; 5 – резервуары для хранения сжатого воздуха; 6 – регулятор для поддержания давления после себя; 7 – трубка выравнивания давления; 8 – сосуд для аккумуляции песчаных частиц; 9 – дозировочное отверстие песчаных частиц; 10 – сопло для эжектирования песчаных частиц; 11 – распределитель песчаных частиц в потоке газа; 12 – двухступенчатое цилиндрическое устройство; 13 и 15 – нижний и верхний цилиндрические фильтрующие элементы предварительной очистки; 14 и 16 – нижний и верхний цилиндрические фильтрующие элементы тонкой очистки; 17, 18 – датчики-преобразователи дистанционные для измерения перепада давления на ЦФК предварительной очистки 13, 15 и на ЦФК тонкой очистки 14 и 16; 19 – крышка ДЦУ; 20 – крышка ЦФК; 21, 22 и 23 – датчики давления неочищенного, предварительно и тонкоочищенного газа; 24 – отложения механических примесей; 25 – стакан; 26 – турбулизатор для счетчика-расходомера; 27 – счетчик вихревой для определения расхода; 28, 29 – клемная коробка и первичные преобразователи температуры, давления и расхода; 30 – вентиль, обеспечивающий плавное регулирование подачи воздуха; 31 – прибор по обработке сигналов; 32 – регистратор замеренных значений; 33, 34 – соответственно интерфейс и компьютер, имеющий программу графического отображения показаний и управления процессами контроля значений перепадов давления и расхода

Второй вариант. Фильтрующее полотно картриджа 8 выполнено на основе сетки высокой точности с количеством слоев, равным семи, из бронзы согласно [3]. Номер сетки в ряду n , размеры квадратных ячеек $b_{т.1}$, диаметры проволоки $d_{т.1}$ для ЦФК тонкой очистки по варианту 2 приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Номер сетки в ряду n , размеры квадратных ячеек $b_{т.1}$, диаметры проволоки $d_{т.1}$ для ЦФК тонкой очистки по варианту №2 [3]

Номер сетки n	1	2	3	4	5	6	7
Размер ячейки $b_{т.1}$, мм	0,14	0,14	0,12	0,1	0,071	0,05	0,04
Диаметр проволоки $d_{т.1}$, мм	0,09	0,09	0,09	0,09	0,05	0,036	0,03

Первые по направлению течения газа слои 11 имеют ячейки с размером $b_{т.1} < b_n$ ($0,14 < 0,2$), когда твердые частицы максимальным размером, равным $d_ч = b_n$, не проходят

через ячейки с размером $b_{т1} > d_ч$ ($0,14 < 0,2$). Металлические нити двух первых слоев 11 выполняются диаметром $d_{т.1}$, меньшим половины максимального диаметра $d_ч/2$ твердых частиц 15, то есть $d_{т.1} < d_ч/2$ ($0,09 < 0,2/2$). Тогда толщина слоя первых двух нитей, равная $S_{т.1} = 2 \cdot d_{т.1}$ ($S_{т.1} = 2 \cdot 0,09$), будет меньше максимального диаметра частицы 15, то есть $S_{т.1} < d_ч$ ($0,18 < 0,2$). Поскольку толщина $S_{т.1}$ не превышает максимальный диаметр $d_ч$ твердой частицы 15, то есть $S_{т.1} < 0,2$ мм, то она выступает своим центром тяжести за границу 16 этого слоя и, как следствие, падает в нижнюю часть зазора 12.

Результаты испытаний показали следующее. Для первого варианта отмечено наличие отдельных твердых частиц в нижней части зазора 12 без образования сплошного слоя, закупоривающего ячейки нижней части ЦФК предварительной и тонкой очистки.

Для второго варианта зарегистрировано образование сплошного слоя высотой 23,0 мм, закупоривающего ячейки нижней части ЦФК предварительной и тонкой очистки и снижающего их пропускную способность.

Выводы

1. Предложен принцип предотвращения осаждения твердых частиц в нижней части зазора между ЦФК предварительной и тонкой очистки и сохранения пропускной способности фильтра путем увеличения размера ячеек первых по направлению течения газа слоев ЦФК тонкой очистки по сравнению с размерами ячеек ЦФК предварительной очистки. При этом диаметр волокон этих слоев, уложенных один за другим, больше половины максимального диаметра твердых частиц, а их толщина превышает максимальный диаметр твердых частиц.

2. Опытная проверка предлагаемого варианта показала отсутствие оседания твердых частиц в нижней части зазора между ЦФК предварительной и тонкой очистки, предотвращение закупоривания их ячеек и снижения пропускной способности.

Список литературы

1. Промышленное газовое оборудование: справочник. – 6-е изд., перераб. и доп. – Саратов: Газовик, 2013. – 1280 с.
2. Устройство для очистки от твердых частиц природного газа высокого давления: патент на полезную модель / Шурайц А.Л., Усачев А.П., Салин Д.В., Хомутов А.О. – № 174446, зарегистрирован 13.10.2017 г.
3. ГОСТ 6613-86. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2006. – 12 с.

References

1. Industrial gas equipment: reference. – 6-e publish. – Saratov: Gazovik, 2013. – 1280 p.
2. A device for cleaning solid particles of natural gas of high pressure: patent for utility model / Shuraitis A.L., Usachev A.P., Salin D.V., Khomutov A.O. – No. 174446, registered October 13, 2017.
3. GOST 6613-86. Woven wire mesh with square cells. Technical conditions – M.: Standartinform, 2006. – 12 p.

УДК 697.921.2

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

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

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

Ивашенко Никита Юрьевич,
аспирант
E-mail: dnib@mail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Averkin Aleksandr Grigorievich,
Doctor of Sciences,
Professor of the department « Heat, gas supply
and ventilation »
E-mail: algraw@mail.ru

Koroleva Tamara Ivanovna,
Candidate of Economic Sciences,
Professor of the department «Heat, gas supply
and ventilation»
E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Ivaschenko Nikita Yuryevich,
Postgraduate student
E-mail: dnib@mail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ КАНАЛЬНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

А.Г. Аверкин, Т.И. Королева, Н.Ю. Ивашенко

Актуализированы способы интенсификации работы канальной естественной вентиляции. Представлены дифференциальные уравнения, описывающие обтекание криволинейной поверхности воздушным потоком. Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности работы дефлекторов. Выявлен профиль внешней поверхности дефлектора, позволяющий увеличить движущую силу естественной вентиляции (располагаемое давление).

Ключевые слова: вытяжной канал естественной вентиляции, дефлектор, дифференциальное уравнение, ветер, воздушный поток, криволинейная поверхность, экспериментальный стенд, эффективность процесса

PROCESSES MODELING AND IMPROVEMENT THE EQUIPMENT OF CHANNEL NATURAL VENTILATION

A.G. Averkin, T.I. Koroleva, N.Y. Ivaschenko

The methods of intensifying the operation of channel natural ventilation are updated. Differential equations are presented to describe the air flow around a curved surface. The results of experimental studies on the evaluation of the deflectors effectiveness are given. The profile of the outer surface of the deflector is revealed, which allows to increase the driving force of natural ventilation (available pressure).

Keywords: natural ventilation exhaust channel, deflector, differential equation, wind, air flow, curved surface, experimental stand, process efficiency

Введение

Основные достоинства применения систем естественной канальной вентиляции [1]:

- отсутствие затрат электроэнергии на их работу;
- нет необходимости приобретения дорогостоящего инженерного оборудования;
- исключен износ;
- большой срок службы;
- минимальны затраты на обслуживание и эксплуатацию.

Работа естественной канальной вентиляции основана на наличии располагаемого давления ΔP_e .

$$\Delta P_e = H_i(\rho_n - \rho_v)g, \quad (1)$$

где H_i – расстояние по вертикали от центра вытяжной решетки на входе воздуха в расчетное ответвление до устья вытяжной шахты, м; ρ_n, ρ_v – плотность соответственно наружного и внутреннего воздуха, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Потери давления по основному расчетному направлению должны быть меньше ΔP_e на величину запаса 5-10 %. Увязку ответвлений с основным направлением проводят с учетом разницы располагаемого давления для отдельных ответвлений.

Располагаемое давление для систем вытяжной вентиляции с естественным побуждением рассчитывается на температуру наружного воздуха +5°C.

Потеря давления в воздуховодах зависит от скорости движения воздуха. В системах вентиляции с естественным побуждением при незначительной величине расчетного давления воздух движется с небольшими скоростями (от 0,5 до 1,5 м/с). При этом в вертикальных каналах верхнего этажа зданий задаются скоростью 0,5 м/с, а для этажей, располагаемых ниже, скорость принимается на 0,1-0,2 м/с больше, чем для предыдущего. В сборных воздуховодах и в вытяжной шахте скорость воздуха принимается равной 1-1,5 м/с.

Для устойчивой работы естественной вентиляции нами в [2] предлагается использовать специальные насадки, устанавливаемые на выходе (устьях) вытяжных шахт, т.е. дефлекторы. Их работа основана на использовании энергии ветра, т.е. нетрадиционных источников энергии.

Располагаемое давление в контуре естественной циркуляции равно сумме гравитационного и ветрового давлений. Гравитационное давление зависит от разности плотностей внешнего и внутреннего воздуха, которые, в свою очередь, зависят от его соответствующих температур и от расстояния по вертикали от центра воздухозаборного устройства (окна, клапан и пр.) до верха вытяжной шахты. Ветровое давление зависит от скорости и направления ветра, а также условий окружающей застройки. Располагаемое давление расходуется на преодоление сопротивления вытяжной системы и приточных отверстий. Последние могут представлять совокупность неплотностей в оконных проемах и балконных дверях (неорганизованная инфильтрация) либо специально встроенные приточные отверстия (организованная инфильтрация). Наиболее распространенным дефлектором является дефлектор ЦАГИ: до сих пор ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию эффективных дефлекторов. Аналогичные исследования проводятся в Пензенском ГУАС.

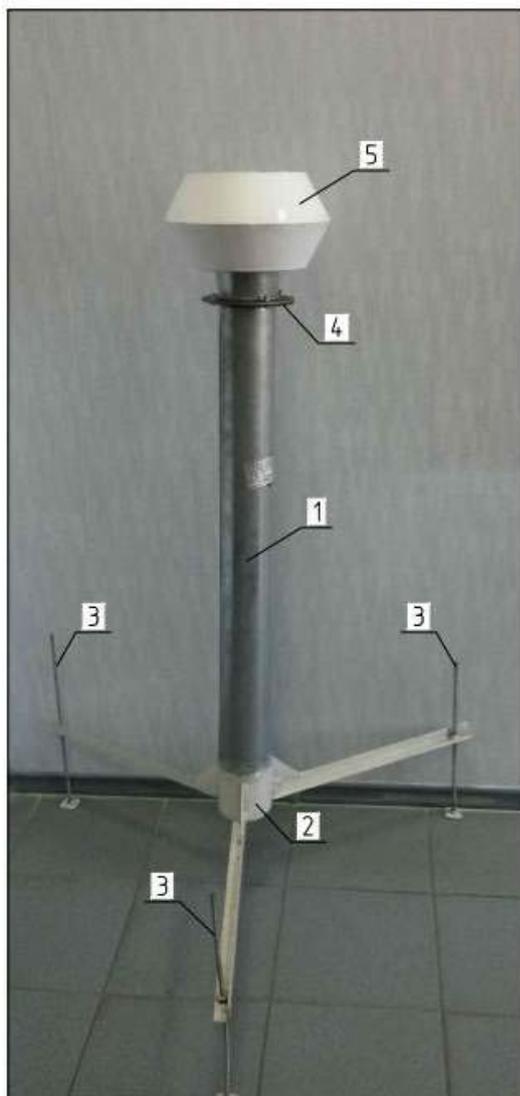
Материалы и методы исследования

При наличии ветра статическое давление воздуха на выходе из канала (патрубка) снижается на величину увеличения динамического давления, создаваемого ветровым потоком. Как и отмечалось выше, располагаемое давление естественной вентиляции повышается. По нашему мнению, в дефлекторах ЦАГИ не в полной мере используется энергия ветра.

Для большего повышения располагаемого давления предлагается осуществить модернизацию дефлектора ЦАГИ. Для этого был спроектирован, изготовлен и смонтирован лабораторный стенд (рис. 1), который позволяет осуществлять сравнительную оценку эффективности работы различных дефлекторов. В частности, проведены экспериментальные исследования работы классического дефлектора ЦАГИ и его модификации.

Экспериментальный стенд состоит из вертикальной цилиндрической трубы 1 диаметром $D=100$ мм, которая закреплена на крестовине 2. Крестовина имеет на концах винтовые отверстия для шпилек 3. Шпильки позволяют регулировать высоту расположения низа трубы над неподвижной опорой (полом). Труба заканчивается фланцем 4, который служит для крепления экспериментального дефлектора 5.

а



б



Рис. 1. Экспериментальный стенд с дефлектором:
а – общий вид, б – экспериментальный дефлектор

Для оценки эффективности работы дефлектора, закрепленного на цилиндрической трубе, создавалось искусственное ветровое давление. Имитация ветра осуществлялась с помощью радиального вентилятора, расположенного на той же высоте, что и дефлектор. Скорость ветра в опытах варьировалась от 4 до 10 м/с.

Экспериментальные исследования проводились с применением элементов математического метода планирования и обработки опытов.

Основная часть

Проведена сравнительная оценка эффективности работы дефлектора ЦАГИ и модифицированных на его основе других конструкций.

Цилиндрическая поверхность обечайки дефлектора при ее обтекании ветровым потоком позволяет использовать лишь часть энергии потока при его срыве (сходе) вблизи верхнего и нижнего оснований. Вектор скорости ветрового потока направлен перпендикулярно поверхности цилиндрической обечайки дефлектора, т.е. параллельно плоскости его оснований. Поэтому увеличение динамического давления на цилиндрической обечайке уменьшает статическое давление на ее торцовых поверхностях на меньшую величину, как следует из уравнения Бернулли. Из-за снижения статического давления воздушного потока на выходе из дефлектора повышается располагаемое

давление только на определенную величину, т.е. имеется резерв повышения скорости ижекции внутреннего воздуха, поступающего из канала естественной вентиляции.

Для повышения эффективности работы типового дефлектора с наружной обечайкой предлагается заменить цилиндрическую поверхность на поверхность усеченных конусов с меньшими основаниями, обращенных к выходу воздушного потока из дефлектора. Схема экспериментального дефлектора приведена на рис. 2.

При проведении экспериментальных исследований все опыты дублировались и были рандомизированы, их воспроизводимость оценивалась по критерию Кохрена. При этом варьировался угол β при вершине конусной наружной поверхности дефлектора от 104 до 168 градусов путем изменения высоты обечайки h , мм [3].

Первая серия экспериментов осуществлялась на дефлекторе ЦАГИ с применением экспериментального стенда (см. рис. 1). Эффективность работы дефлектора оценивалась по величине скорости воздуха в вертикальном канале (цилиндрической трубе), она измерялась с помощью комбинированного прибора ТКА-ПКМ-52 (рис. 3).

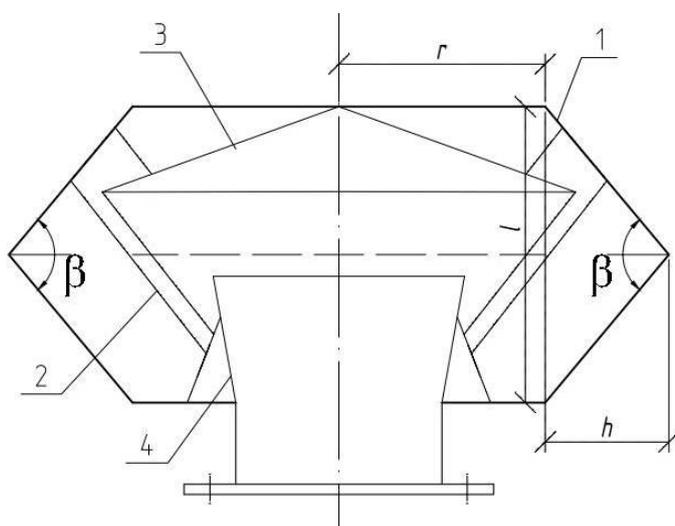


Рис. 2. Экспериментальный дефлектор с криволинейной поверхностью:

1 – обечайка с конусной поверхностью; 2 – лапки; 3 – зонт; 4 – диффузор с патрубком



Рис. 3. Измерительный прибор ТКА ПКМ-52

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице. Здесь же представлены опытные данные по эффективности работы дефлектора с поверхностью усеченных конусов.

Экспериментальные данные

Радиус обечайки r , мм	Длина обечайки l , мм	Высота обечайки h , мм	Угол вершины β , град	Скорость воздуха в канале v_k^{cp} , м/с
<i>Дефлектор ЦАГИ</i>				
100	155	-	180	3,03
<i>Экспериментальный дефлектор</i>				
100	155	7,5	168	3,07
100	155	15	158	3,14
100	155	22,5	144	3,21
100	155	30	138	3,88
100	155	37,5	128	-
100	155	45	120	3,91
100	155	52,5	112	2,78
100	155	60	104	2,70

Как видно из таблицы, средняя скорость потока воздуха v_k^{cp} в вертикальной цилиндрической трубе лабораторного стенда равнялась приблизительно 3 м/с, в то же время она повышалась при увеличении высоты конуса h обечайки, достигая максимальной величины при $h=45$ мм и $v_k^{cp}=3,91$ м/с (увеличение на 27,4 %). При дальнейшем повышении h скорость снижалась (ниже 3 м/с).

Применение криволинейной конусной поверхности обечайки дефлектора способствовало значительному повышению динамического давления ветрового потока в его торцевой части соответственно снижению статического давления и, как следствие, увеличению скорости эжекции внутреннего воздуха в цилиндрическом канале. Это подтверждают данные эксперимента, приведенные в таблице.

Вывод

Применение специальных насадок (дефлекторов), устанавливаемых на устьях вытяжных шахт, например, конструкции ЦАГИ, позволяет увеличить располагаемое давление за счет снижения статического давления воздушного потока на выходе, соответственно повысить скорость воздуха в каналах вытяжной естественной вентиляции. Изменив наружную цилиндрическую форму обечайки дефлектора на криволинейную поверхность в виде усеченных конусов, можно существенно повысить скорость воздуха в вытяжном канале, т.е. увеличить эффективность работы системы.

Список литературы

1. Крамаренко, П.Т. Естественная вентиляция жилых зданий повышенной этажности / П.Т. Крамаренко, И.П. Грималовская // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2018. – № 4. – С. 75–78.
2. Аверкин, А.Г. К вопросу совершенствования системы естественной вентиляции в жилых зданиях / А.Г. Аверкин, Н.Ю. Иващенко // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2018. – № 1 (14). – С. 164–172.
3. <https://abakbot.ru/online-2/334-treug1>

References

1. Kramarenko, P.T. Natural ventilation of residential buildings with high floors / P.T. Kramarenko, I.P. Grimalovskaya // Volga Scientific Journal / Nizhegor. state architecture.-builds. un-t. – Nizhny Novgorod, 2018. – No. 4. – P. 75–78.
2. Averkin, A.G. On the issue of improving the natural ventilation system in residential buildings / A.G. Averkin, N.Yu. Ivashchenko // Education and Science in the Modern World. Innovation system. – 2018. – No. 1 (14). – P. 164–172.
3. <https://abakbot.ru/online-2/334-treug1>

УДК 728.37

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

Васин Леонид Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: leo@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

Vasin Leonid Anatolievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Information-
computing systems»
E-mail: leo@pguas.ru

КОНЦЕПЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСВЕЩЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЛЫМ ДОМОМ

Л.А. Васин

Приведен способ создания системы управления освещением в жилом доме с управлением климатических параметров. Представлены основные принципы и правила функционирования системы, сформулированы системные требования к ее разработке.

Приведены несколько вариантов построения системы управления освещением помещений, даны рекомендации по выбору системных компонентов. Разработаны структурные схемы систем освещения и их интеграции в управляющую систему умного дома. Приведен пример выбора технических средств для практической реализации проекта единой системы управления инженерными сетями.

Сформулированы принципы интеллектуального управления системой освещения для обеспечения комфортных условий при ее использовании в жилом доме. Показан пример использования системы с применением энергосберегающих технологий и возобновляемых источников электроэнергии.

Ключевые слова: строительство, инженерные системы, технология «умный дом», система освещения, открытая платформа системы управления, сценарии работы, датчики освещенности, сетевые протоколы

MANAGEMENT OF ENGINEERING NETWORKS: INTELLECTUAL SYSTEM OF TERMOREGULATION OF A RESIDENTIAL HOUSE

L.A. Vasin

A method of creating a lighting control system in a residential building with automation of climatic parameters is given. The basic principles and rules for the functioning of the system are developed, system requirements for the development of such a system are formulated.

Several options for building lighting control systems for the rooms are given, and a selection of system components is made. Structural schemes of lighting systems and integration into the control system of a smart home have been developed. An example of the selection of technical means for practical implementation in the project of creating a unified system for managing utility networks is given.

The principles of intelligent control of the lighting system are formulated to ensure comfortable conditions when it is used in a residential building. An example of using the system using energy-saving technologies and renewable energy sources is shown.

Keywords: construction, engineering systems, smart home technology, lighting system, open control system platform, operation scenarios, light sensors, network protocols

Введение

Для поддержания нормальных условий проживания и пребывания людей в помещениях должны соблюдаться необходимые нормы по обеспечению микроклиматических параметров. Их соблюдение осуществляется инженерными системами различного назначения, такими, как климатические, энергетические, осветительные и другие. Создание оптимальных параметров освещенности является важным условием, от которого напрямую зависит зрение и работоспособность человека, качество выполняемых работ, а также возможность полноценного отдыха.

Нормы уровней освещенности варьируются в зависимости от назначения помещений. Допустимые нормы регламентированы в санитарно-эпидемиологических требованиях к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях (актуализированная редакция СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»). Такие нормы регламентируют уровни освещенности в различных помещениях при выполнении человеком различных видов работ [1].

Распределение светового потока зависит от уровней освещенности, регистрируемой соответствующими датчиками. Чем больше датчиков, тем адекватнее освещенность в различных зонах жилого дома. В таблице приведены уровни освещенности в зависимости от назначения жилого пространства.

Уровни освещенности

Тип помещения	Нормы освещенности (Лк)
Проход чердака и подвала	20
Туалет, душевая, ванная	50
Холл, коридор	50
Гардероб	75
Баня, бассейн	100
Спальня, кухня	150
Детская	200
Личный кабинет, библиотека, подсобка, комната с бильярдом	300

Для регулировки уровней освещенности используют системы управления с различными алгоритмами функционирования. Они обеспечивают автоматическое регулирование освещенности и содержат следующие компоненты: осветительные системы, измерительные и регулирующие компоненты, а также локальное устройство управления или модули сопряжения с главной информационно-управляющей системой.

Автоматизированная система управления освещением в жилом доме полностью автоматизирует процесс создания освещенности необходимого уровня, а также, адаптируясь к различным ситуациям, производит изменение управляемых алгоритмов. Осветительная система обеспечивает непосредственное создание светового потока с помощью осветительных приборов, расположенных в помещениях различного класса: жилых, нежилых, вспомогательных или подсобных. В измерительный комплекс входят датчики освещенности, расположенные в контролируемых зонах, в которых возможно присутствие людей. Дополнительно в системе имеется возможность применения дополнительных датчиков, например движения, для более точного анализа поведения жильцов.

Управление системой освещения и распределения светового потока в помещениях жилого дома может быть представлено как самостоятельная (изолированная) автоматизированная система. В этом случае она не интегрирована в систему «умный дом» и обладает базовыми функциями управления на основе специализированных микропроцессорных контроллеров [2].

Автоматизация системы освещения часто реализуется как интегрированная система в основную систему «умный дом». Такое использование организует взаимодействие с системой охраны, основанной на функционировании датчиков движения и

присутствия. Это позволяет организовать взаимодействие с другими элементами «умного дома» и более качественно обеспечивать управление процессом освещения. Глобальная система «умный дом» имеет возможность анализировать информацию, поступающую с датчиков освещения, и в качестве дополнительных каналов получения информации использовать дополнительные датчики других подсистем управления инженерными сетями. Такая интеграция позволяет трансформировать локальный процесс управления освещением в глобальную среду автоматизации жилого дома с возможностью облачного управления посредством сети Интернет.

В состав системы управления освещением входят следующие компоненты:

- 1) осветительные приборы;
- 2) измерительные датчики;
- 3) электротехническое оборудование;
- 4) управляющий контроллер;
- 5) ручное управляющее оборудование.

Осветительные приборы представляют самую большую группу устройств, входящих в систему. Их количество и расположение регламентируются формированием светового потока под соответствующие уровни освещенности, мощность осветительных приборов, а также дизайнерскими решениями при проектировании интерьера помещений. В состав группы измерительного оборудования входят датчики освещения, вмонтированные в детали интерьера жилых помещений. Сигналы этих элементов обрабатывает специализированный контроллер, который может быть интегрирован в систему «умного дома». Электротехническое оборудование обеспечивает электроэнергией осветительные приборы, формирует функции защиты от поражения электрическим током. Управляющее оборудование представлено ручными выключателями, переключателями, кнопками. Это оборудование непосредственно взаимодействует с пользователями в ручном режиме и выбирается исходя из конструктивных и цветовых дизайнерских решений. Для эффективного использования системы освещения необходимо находить оптимальный баланс между ручным и автоматическим управлением. Ручное управление всегда должно быть логически выше, чем автоматическое; должна быть предусмотрена возможность переводить управление освещенности в ручной режим.

Основным аспектом построения системы, управляющей инженерными коммуникациями, является экономическая составляющая, а также создание комфортной среды проживания с освобождением жильцов от рутинных операций. Это достигается путем создания сценариев управления инженерными системами, в частности освещением. Такие системы формируют необходимые зоны освещения при физическом нахождении или прогнозируемом поведении проживающих в жилом доме. Кроме этого, комплексная интеграция систем освещения и охраны позволяет обеспечивать необходимое освещение охраняемых зон для формирования качественного архива видеозаписей.

Основная часть

Базовой задачей системы управления освещением является создание необходимого уровня освещенности согласно действующим нормам с минимальными энергетическими затратами при комфортных вариантах управления. Это достигается путем интеграции систем управления с компонентами, входящими в состав осветительных систем. Эффективность системы оценивается величиной потребления электроэнергии при нормализованных значениях освещенности в заданную временную величину. Это возможно при использовании автоматизированного управления осветительными приборами на основе информации с датчиков освещенности, датчиков движения и присутствия. Такая система функционирует на основе разработанных алгоритмов ситуационных управляющих сценариев. Они отражают поведение проживающих, учитывают временные интервалы, уровни освещения, информацию с датчиков присутствия и движения [2].

Для управления системой освещения разработаны следующие управляющие алгоритмы:

1. Отключение всех осветительных приборов (день, ночь, отсутствие жильцов).
2. Диммирование света (день, присутствие жильцов).
3. Основное освещение отключено, подсветка коридоров и лестниц находится в автоматическом режиме с активацией по датчику движения (ночной режим с присутствием жильцов).
4. Освещение отключено (ночной режим с отсутствием жильцов).
5. Режим охраны с активацией освещения по периметру жилого дома (ночной режим).

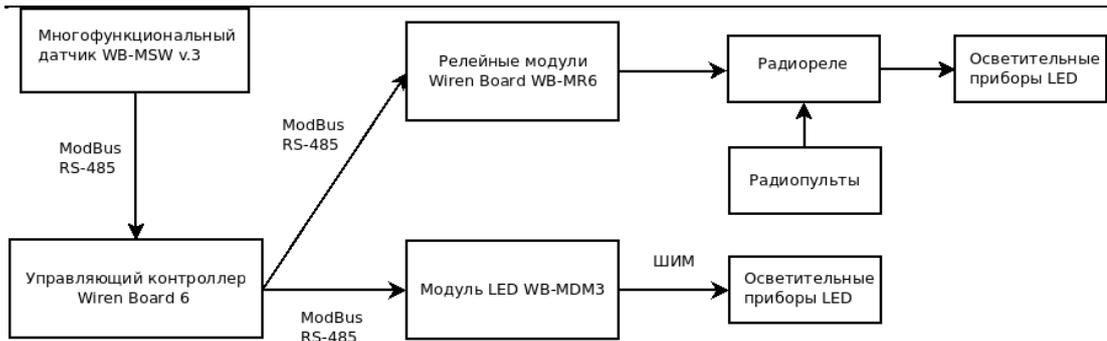
Ситуационные сценарии работы позволяют охватить все возможные варианты использования системы освещения. Каждый из них оценивает наличие проживающих, время суток, уровни внешней и внутренней освещенности, интенсивность движения по коридорам и лестницам. Устройство управления анализирует указанные параметры и производит дистанционное управление осветительными приборами. Для более точного управления сценарии могут быть оперативно изменены или подстроены пользователем системы в ходе ее эксплуатации.

Управление осветительными приборами может быть реализовано с помощью фиксированных или мобильных устройств управления (выключателей). Традиционно согласно правилам устройства электроустановок [3] их базовый монтаж производится в наиболее удобных для пользователя местах. В этом случае монтируется стационарная силовая линия управления электроэнергией для осветительных приборов. Недостаток данного способа заключается в сложности переноса управляющего прибора в другое место.

Мобильный вариант размещения подразумевает использование сенсорных выключателей с применением радиоканала для силового управления осветительными приборами. Управляющие устройства (выключатели) представляют собой радиопульт, работающий на радиочастотах 433 МГц, 898 МГц, 2,4 ГГц и использующий различные протоколы взаимодействия с удаленными радиореле, установленными в осветительных приборах или электро-распределительных щитах, например системы DeLUMO [4]. Это позволяет оперативно изменять местонахождение точек управления и интегрировать систему освещения в общую информационную систему управления «умных дом». Наличие удаленных радиореле позволяет организовывать интеграцию с контроллерами системы управления, которые ответственны за систему освещения. Систему освещения на радиовыключателях удобно монтировать централизованно, размещая реле управления рядом с контроллерами управляющей системы. В качестве контроллеров используют различные программируемые контроллеры с поддержкой силового управления осветительными приборами.

Автоматический режим работы системы освещения предусматривает обработку информации с датчиков присутствия и движения, например настенного комбинированного датчика RS-485 (протокол Modbus RTU WB-MSW v.3). В автоматизированной системе «умный дом» датчик может обеспечивать измерение концентрации CO₂, температуры и влажности, шума, концентрации летучих органических веществ, а также функционировать как датчик движения. Данные датчики устанавливаются в рабочих, жилых или проходных помещениях, где необходимо формировать зоны освещенности. Общее количество датчиков и места их расположения выбираются исходя из физических характеристик датчиков движения. Основным критерием является обеспечение гарантированного распознавания движения или присутствия людей в контролируемой зоне.

Обработку информации с датчиков, установленных в жилом доме, обеспечивает система управления. В нее входит блок микрокомпьютера и управляющие контроллеры, к которым подключаются датчики и силовые электрические компоненты, необходимые для управления осветительными устройствами. На рисунке показана структурная схема системы управления освещением.



Структурная схема системы управления освещением

В качестве системной платформы используется оборудование отечественного производителя Wiren Board [5]. В неё входят: контроллер Wiren Board 6, который является универсальным для реализации проектов по автоматизации и функционирует на основе открытого программного обеспечения на базе операционной системы Linux, релейные модули WB-MR6 с большими пусковыми токами для управления освещением, коммутирования различной силовой нагрузки. Информационный обмен между контроллерами происходит по открытому коммуникационному протоколу Modbus через последовательные линии связи RS-485.

Управление освещением происходит через силовые электрические шины и ШИМ-контроллеры при использовании светодиодных источников освещения. При применении диммирующих модулей WB-MDM3 доступны функции изменения уровня освещенности в жилых помещениях путем изменения яркости осветительных приборов [5].

Для расширения возможностей управления освещением в жилом доме имеется возможность интегрирования системной платформы в состав информационной системы «умный дом», например HomeAssistant, MojoDomo. В этом случае становятся доступными системы управляемых сценариев, удаленное управление системами посредством телекоммуникационной сети Интернет через мобильные приложения. Такое программное обеспечение позволяет осуществлять управление системой освещения, визуализировать уровни освещения, управлять сценариями освещения, проводить анализ уровней освещенности и наличия движения как внутри жилого помещения, так и по его периметру. Это дает возможность интегрировать осветительные приборы в охранную систему.

Преимуществом такого способа управления системой освещения является возможность гибкой настройки осветительных приборов, создания системы сценариев управления, интеграции с программными приложениями для создания системы «умный дом» для организации взаимодействия с другими функциональными компонентами, входящими в информационную систему управления инженерными системами.

Выводы:

1. Разработана структурная организация системы управления световыми приборами жилого дома с автоматизированным управлением.
2. Определены необходимое осветительное оборудование, системная платформа, управляющие контроллеры.
3. Сформулирован принцип управления освещением на основе анализа датчиков освещения и движения, а также ситуационных правил.
4. Показана возможность использования контроллеров Wiren Board для реализации автоматизированной системы управления световыми приборами жилого дома.

Список литературы

1. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*. – URL: <http://sniprf.ru/sp52-13330-2016> (дата обращения: 10.02.20).

2. Гололобов, В.Н. Умный дом своими руками / В.Н. Гололобов. – М.: НТ-Пресс, 2007. – 416 с.
3. Правила устройства электроустановок СО 153-34.20.120—2003. – URL: <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/5TC.html> (дата обращения: 10.02.20).
4. Шишов, О.В. Специализированные интерфейсы в системах «умного дома» / О.В. Шишов, М.А. Бобров // Огарёв-online. – 2014. – Вып. 3. – URL: <http://journal.mrsu.ru/> (дата обращения: 10.02.20)
5. Умный свет в WirenBoard. Варианты реализаций. – URL: <https://sprut.ai/client/article/1708> (дата обращения: 20.09.19).

Referances

1. SanPin 52.13330.2016. Natural and artificial lighting. Updated edition of SNiP 23-05-95 *. – URL: <http://sniprf.ru/sp52-13330-2016> (accessed date: 02/10/20).
2. Gololobov, V.N. Do it yourself smart home / V.N. Gololobov. – М.: NT-Press, 2007. – 416 p.
3. Rules for the installation of electrical installations CO 153-34.20.120-2003. – URL: <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/5TC.html> (accessed date: 02/10/20).
4. Shishov, O.V. Specialized interfaces in smart home systems / O.V. Shishov, M.A. Bobrov // Ogarev-online. – 2014. – Iss. 3. – URL: <http://journal.mrsu.ru/> (accessed date: 02/10/20)
5. Smart light in WirenBoard. Implementation options. – URL: <https://sprut.ai/client/article/1708> (accessed date: 09/20/19).

УДК 536.24.021:532.582.2

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

Королева Тамара Ивановна,
кандидат экономических наук,
профессор кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция»

E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Мельников Илья Евгеньевич,

студент

E-mail: farvater335@gmail.com

Ивашенко Никита Юрьевич,

аспирант

E-mail: dnib@mail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Koroleva Tamara Ivanovna,

Candidate of Economic Sciences,
Professor of the department «Heat, gas supply
and ventilation»

E-mail: korolevatamara@gmail.ru

Melnikov Ilya Evgenievich,

Student

E-mail: farvater335@gmail.com

Ivaschenko Nikita Yuryevich,

Postgraduate student

E-mail: dnib@mail.com

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Т.И. Королева, И.Е. Мельников, Н.Ю. Ивашенко

Приведенные в нормативной литературе значения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки являются усредненными, так как теплопередача излучением и конвекцией напрямую зависит от температур противоположных стенок воздушной прослойки. Дана оценка эффективности значения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки в неоднородной ограждающей конструкции стены облегченной кирпичной кладки при расчете температурного поля.

Ключевые слова: стена облегченной кирпичной кладки, сопротивление теплопередаче, теплоизоляционный слой, воздушная прослойка, неоднородная ограждающая конструкция, расчет температурных полей

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF RESISTANCE OF HEAT TRANSFER OF AN AIR LAYER FOR A INHOMOGENEOUS PROTECTION STRUCTURE

T.I. Koroleva, I.E. Melnikov, N.Y. Ivaschenko

The values of heat transfer resistance of the air gap given in normative literature are averaged, since heat transfer by radiation and convection directly depends on the temperatures of opposite walls of the air gap. Evaluation of the effectiveness of the heat transfer resistance of the air gap in the heterogeneous structure of lightweight brick wall at calculating temperature field is given.

Keywords: lightweight brick wall, heat transfer resistance, heat-insulating layer, air gap, heterogeneous enclosing structure, calculation of temperature fields

Ограждающие конструкции нередко имеют воздушные прослойки, необходимые по технологическим причинам, или как дополнительный теплоизолирующий слой. В отличие от твердых или сыпучих материалов, в воздушных прослойках теплопередача осуществляется не только теплопроводностью, но также излучением и конвекцией.

В действующем СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» указаны приведенные значения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки. Однако данные

величины являются усредненными, так как теплопередача излучением и конвекцией напрямую зависит от температур противоположных стенок воздушной прослойки.

Ниже приведен расчет температурного поля неоднородной ограждающей конструкции с уточнением сопротивления теплопередаче воздушной прослойки и проведена оценка эффективности данного уточнения.

Была выбрана стена облегченной кирпичной кладки «тип А» (СНиП II-22-81 «Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций») как наиболее яркий и простой пример неоднородной ограждающей конструкции.

Кирпичная кладка выполняется из обыкновенного глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе, в качестве минеральной засыпки принят щебень из вспученного перлита. Характеристики материалов соответствуют СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и СТО 00044807-001-2006 «Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий».

Параметры наружного воздуха приняты по СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» для города Пензы (условия эксплуатации – А; $t_{\text{ХП}}^{0,92} = -27^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{\text{н}} = 83\%$).

Параметры внутреннего воздуха принимаем равными: $t_{\text{в}} = 18^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{\text{в}} = 60\%$.

Общий вид конструкции стены приведен на рис. 1.

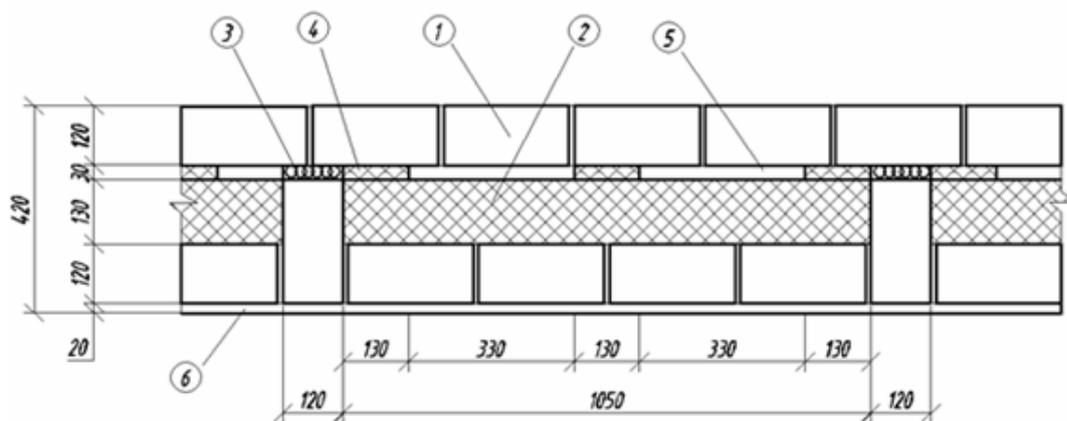


Рис. 1. Поперечное сечение конструкции стены облегченной кирпичной кладки:

- 1 – кирпич; 2 – плитный утеплитель; 3 – монтажная пена; 4 – полосы из плитного утеплителя; 5 – воздушная прослойка; 6 – внутренняя штукатурка

Для уменьшения влияния «мостиков холода» в перемычках имеются воздушные прослойки, расположенные в шахматном порядке. Для увеличения теплотехнических качеств конструкции данные полости заделаны монтажной пеной.

Состав ограждающей конструкции:

1. Кирпичная кладка из сплошного обыкновенного глиняного кирпича; $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\mu = 0,11 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

2. Базальтовая вата «ТехноНИКОЛЬ» Техновент Н ПРОФ; $\rho = 45 (\pm 5) \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\mu = 0,3 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

3. Монтажная пена PENOSIL GoldGun 65; $\rho = 20\text{-}25 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,034 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\mu = 0,05 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

4. Известково-песчаный раствор; $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\mu = 0,12 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

5. Воздушная прослойка; $\delta = 0,03 \text{ м}$; $R_{\text{вп}} = 0,16 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C/Вт}$; $\mu = 0,135 \text{ г/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{мм.рт.ст.)} = 1,01 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

Сопротивление теплопередаче воздушной прослойки, $\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C/Вт}$, определяем как:

$$R_{\text{вп}} = \frac{\delta_{\text{вп}}}{\lambda_{\text{экв}}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{вп}}$ – толщина воздушной прослойки, м; $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопередачи, $\text{Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$,

$$\lambda_{\text{эКВ}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_{\text{л}} \delta_{\text{ВП}}; \quad (2)$$

здесь λ_1 – коэффициент теплопроводности неподвижного воздуха, Вт/(м·°С); λ_2 – условный коэффициент, называемый коэффициентом передачи тепла конвекцией, Вт/(м·°С); $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·°С).

Значения величины $\lambda_1 + \lambda_2$ найдены по таблице зависимости от толщины воздушной прослойки и разницы температур на ее поверхностях. Вначале необходимо определить средние температуры поверхностей воздушной прослойки.

По таблице [1] находим значение $\lambda_1 + \lambda_2$ в зависимости от толщины воздушной прослойки и средних значений температур ее поверхностей.

Коэффициент теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_0}} \cdot \frac{\left(\frac{\tau_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{\tau_2 + 273}{100}\right)^4}{\tau_1 - \tau_2}, \quad (3)$$

где τ_1 и τ_2 – температуры поверхностей, °С; C_1 и C_2 – коэффициенты излучения поверхностей, Вт/(м²·К⁴); C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 4,96 Вт/(м²·К⁴).

Теплоотдача излучением происходит в данном случае между поверхностями базальтовой ваты и кирпичной кладки. Кирпичная кладка имеет степень черноты $\varepsilon_2 = 0.93$. Степень черноты базальтовой ваты принимаем равной $\varepsilon_1 = 0.825$ по рекомендации из [1].

Находим коэффициенты излучения поверхностей:

$$C_1 = \varepsilon_1 \cdot C_0 = 4,092 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4) \text{ и } C_2 = \varepsilon_2 \cdot C_0 = 4,61 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4).$$

Расчет воздушной прослойки выполняем методом последовательного приближения. Для первого приближения определим значения температур в толще конструкции методом температурных полей. Расчет плоского температурного поля производим по методике проф. К.Ф. Фокина.

Для расчета выбираем участок стены от перемычки до перемычки, выделяем в нем зону между двумя поперечными осями симметрии и разбиваем ее сеткой координат на узлы. Далее определяем температуру каждого узла в зависимости от 4 смежных с ним.

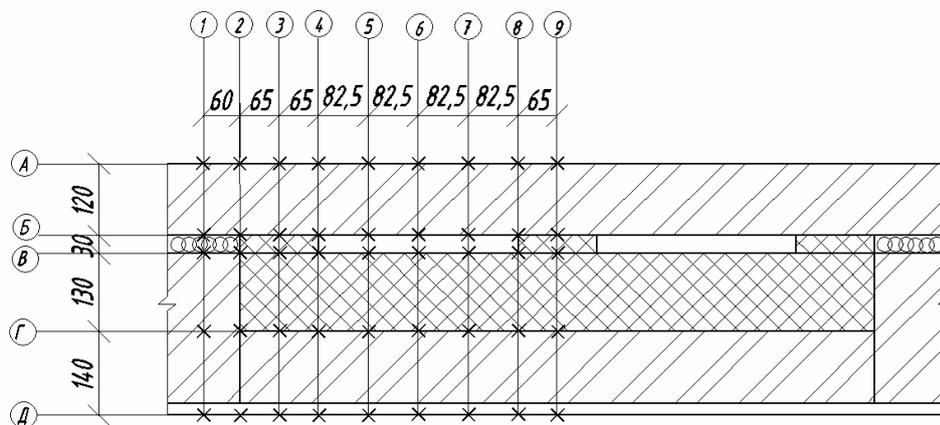


Рис. 2. Схема разбивки на узлы

Допущения при расчете:

- Так как коэффициенты теплопроводности кирпичной кладки и известково-песчаного раствора равны, при расчете для удобства считаем их как один материал.

• Для первого приближения находим эквивалентный коэффициент теплопередачи воздушной прослойки и в расчетах используем его:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\delta_{\text{вп}}}{R_{\text{вп}}} = \frac{0,03}{0,16} = 0,1875 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{С}). \quad (4)$$

• Теплопередачей в воздушной прослойке по направлению продольной оси стены пренебрегаем ввиду ее малого влияния на процесс теплопередачи в ограждающей конструкции в целом.

Результат расчета приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Итоговые значения температур в узлах (1-е приближение), °С

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	-25,98	-26,02	-26,09	-26,23	-26,32	-26,38	-26,40	-26,43	-26,49
Б	-21,88	-22,03	-22,89	-23,26	-23,90	-24,17	-24,20	-24,09	-24,32
В	2,95	1,95	-12,34	-18,97	-21,87	-22,26	-22,18	-20,21	-18,39
Г	12,31	12,89	14,36	15,18	15,63	15,92	16,06	16,20	16,24
Д	17,43	17,53	17,88	18,14	18,37	18,48	18,55	18,58	18,59

Как видно из табл. 1, после первого приближения имеются следующие температуры на поверхности воздушной прослойки.

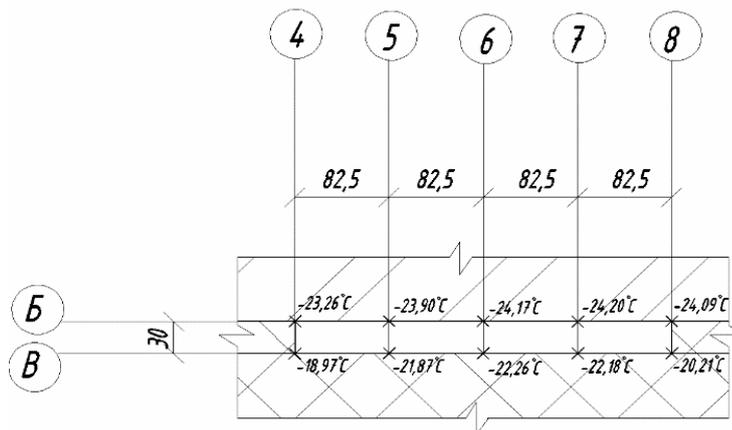


Рис. 3. Распределение температур на поверхностях воздушной прослойки (1-е приближение)

Определим сопротивление воздушной прослойки при данных условиях по вышеизложенной методике:

$$\tau_1 = -21,47^{\circ}\text{С};$$

$$\tau_2 = -23,99^{\circ}\text{С};$$

$$\tau_1 - \tau_2 = 2,52^{\circ}\text{С} \approx 2,5^{\circ}\text{С};$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 0,036 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{С});$$

$$\alpha_{\text{д}} = 0,946 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{С});$$

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,064 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{С});$$

$$R_{\text{вп}} = 0,469 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{С}/\text{Вт}.$$

Для второго приближения принимаем эквивалентный коэффициент теплопередачи воздушной прослойки из расчета воздушной прослойки:

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,064 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{С}).$$

Повторяем расчет температурного поля. Итоги второго приближения в табл. 2.

Итоговые значения температур в узлах (2-е приближение), °С

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	-26,00	-26,02	-26,13	-26,30	-26,39	-26,44	-26,47	-26,51	-26,57
Б	-21,89	-22,13	-23,03	-23,72	-24,19	-24,44	-24,52	-24,59	-24,63
В	2,89	2,07	-11,93	-16,76	-18,94	-19,33	-19,31	-18,38	-17,69
Г	12,39	12,84	14,44	15,21	15,76	16,01	16,18	16,25	16,31
Д	17,41	17,56	17,87	18,17	18,38	18,51	18,57	18,60	18,59

В связи с тем что температуры на поверхности воздушной прослойки изменились, для уточнения значения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки необходимо повторить расчет $\lambda_{\text{эКВ}}$, Вт/(м·°С):

$$\tau_1 = -18,79^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = -24,33^\circ\text{C};$$

$$\tau_1 - \tau_2 = 5,54^\circ\text{C} \approx 5^\circ\text{C};$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 0,043 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)};$$

$$\alpha_{\text{д}} = 0,962 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)};$$

$$\lambda_{\text{эКВ}} = 0,072 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)};$$

$$R_{\text{ВП}} = 0,417 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}.$$

Определим невязку относительно предыдущего значения $\lambda_{\text{эКВ}}$, Вт/(м·°С):

$$\frac{0,469 - 0,417}{0,469} \cdot 100 \% = 11,1 \%$$

В связи с большой невязкой (11,1 % > 5 %) продолжаем расчет до получения приемлемой невязки.

Т а б л и ц а 3

Итоговые значения температур в узлах (3-е приближение), °С

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	-26,00	-26,03	-26,13	-26,29	-26,38	-26,42	-26,46	-26,51	-26,57
Б	-21,92	-22,14	-23,04	-23,67	-24,13	-24,37	-24,46	-24,55	-24,63
В	2,91	2,07	-12,00	-17,14	-19,37	-19,76	-19,75	-18,75	-17,84
Г	12,40	12,87	14,46	15,24	15,79	16,05	16,21	16,29	16,34
Д	17,42	17,57	17,88	18,18	18,40	18,53	18,59	18,62	18,61

Произведем расчет воздушной прослойки повторно с изменившимися температурами:

$$\tau_1 = -19,21^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = -24,27^\circ\text{C};$$

$$\tau_1 - \tau_2 = 5,06^\circ\text{C} \approx 5^\circ\text{C};$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 0,043 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)};$$

$$\alpha_{\text{д}} = 0,959 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)};$$

$$\lambda_{\text{эКВ}} = 0,072 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)};$$

$$R_{\text{ВП}} = 0,417 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}.$$

Определим невязку относительно предыдущего значения:

$$\frac{0,417 - 0,417}{0,417} \cdot 100 \% = 0 \%$$

Невязка крайне незначительна, поэтому расчет окончен.

За истинное сопротивление теплопередаче принимаем значение $R_{\text{ВП}} = 0,417 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$.

За истинные значения температур принимаем значения из табл. 3.

Определение эффективности расчета произведем двумя способами: по температурам в узлах и по разнице сопротивлений теплопередаче конструкций. Сравнить будем 2 варианта: расчет с уточнением сопротивления теплопередаче воздушной прослойки (см. табл. 3) и расчет температурного поля без уточнения сопротивления теплопередаче воздушной прослойки (см. табл. 1).

Для оценки эффективности расчета путем сравнения температур определим абсолютную и относительную невязку двух вариантов.

Т а б л и ц а 4

Абсолютные невязки температур в узлах, °С

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	0,02	0,01	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,08	0,08
Б	0,04	0,11	0,15	0,41	0,23	0,2	0,26	0,46	0,31
В	0,04	0,12	0,34	1,83	2,5	2,5	2,43	1,46	0,55
Г	0,09	0,02	0,1	0,06	0,16	0,13	0,15	0,09	0,1
Д	0,01	0,04	0	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,02

Т а б л и ц а 5

Относительные невязки температур в узлах, °С

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	0,08	0,04	0,15	0,23	0,23	0,15	0,23	0,30	0,30
Б	0,18	0,50	0,65	1,75	0,96	0,82	1,07	1,89	1,27
В	1,37	5,98	2,79	10,16	12,17	11,94	11,63	7,51	3,04
Г	0,73	0,16	0,69	0,39	1,02	0,81	0,93	0,55	0,61
Д	0,06	0,23	0,00	0,22	0,16	0,27	0,22	0,22	0,11

Как видно из табл. 4 и 5, температуры на поверхностях ограждающей конструкции практически не меняются. Наибольшая невязка температур наблюдается на поверхностях воздушной прослойки.

Для определения сопротивления теплопередаче воспользуемся следующим алгоритмом:

1. Находим величину среднего теплового потока, проходящего через конструкцию ограждения, Вт/м²:

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{в}} + q_{\text{н}}}{2}, \quad (5)$$

где $q_{\text{в}}$ – тепловой поток, проходящий через внутреннюю поверхность ограждения, Вт/м²; $q_{\text{н}}$ – тепловой поток, проходящий через внешнюю поверхность ограждения, Вт/м²;

$$q_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} (t_{\text{в}} - \tau_{\text{в ср}}); \quad (6)$$

здесь $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); $t_{\text{в}}$ – температура внутреннего воздуха, °С; $\tau_{\text{в ср}}$ – средняя температура внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С;

$$q_{\text{н}} = \alpha_{\text{н}} (t_{\text{н}} - \tau_{\text{н ср}}), \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С); $t_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, °С; $\tau_{\text{н ср}}$ – средняя температура наружной поверхности ограждающей конструкции, °С.

2. Находим сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С):

$$R_{\text{о}}^{\text{нр}} = \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{q_{\text{ср}}}. \quad (8)$$

Определяем сопротивление теплопередаче по значениям из табл. 1:

$$\tau_{н\text{ ср}} = -26,14 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\tau_{в\text{ ср}} = 17,70 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q_{в} = 8,7 (20 - 17,70) = 20,01 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{н} = 23 (-26,14 - (-27)) = 19,78 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{ср}} = \frac{20,01 + 19,78}{2} = 19,895 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_o^{\text{пр}} = \frac{(20 - (-27))}{19,895} = 2,36 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C/Вт}.$$

Определяем сопротивление теплопередаче по значениям из табл. 3:

$$\tau_{н\text{ ср}} = -26,19 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\tau_{в\text{ ср}} = 17,67 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$q_{в} = 8,7 (20 - 17,67) = 20,27 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{н} = 23 (-26,19 - (-27)) = 18,63 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{\text{ср}} = \frac{20,27 + 18,63}{2} = 19,45 \text{ Вт/м}^2;$$

$$R_o^{\text{пр}} = \frac{(20 - (-27))}{19,45} = 2,42 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C/Вт}.$$

Сравниваем полученные значения ($q_{\text{ср}}$, Вт/м²):

$$H_R = \frac{19,895 - 19,45}{19,895} \cdot 100 = 2,3 \text{ } \%$$

Как видим, невязка значений сопротивлений теплопередаче незначительна, поэтому можно отметить, что с целью уточнения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции нерационально производить расчет воздушной прослойки, однако, если требуется с высокой точностью определить температуры на поверхности воздушной прослойки в составе ограждающей конструкции, данный расчет может обеспечить существенное увеличение точности.

Список литературы

1. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
2. Королева, Т.И. Исследование влажностного состояния неоднородных конструкций наружных ограждений / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева, И.Е. Мельников // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (35). – С. 159–166.
3. Королева, Т.И. Исследование возможности конденсации водяного пара в толще многослойной конструкции наружного ограждения / Т.И. Королева, Н.В. Аржаева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 2 (35). – С. 152–158.
4. Королева, Т.И. Исследование условий возникновения конденсата в толще ограждений и его влияние на внутренний микроклимат помещений / Т.И. Королева, Г.И. Грейсук, Н.В. Аржаева, Е.Г. Ежов // Internation Jorurnal of Applied Engineering Reseach (IAER), Paper Code 49434, Delhi, INDIA. – 2016. – Vol. 11, № 21. – P 10402–10407.
5. Гагарин, В.Г. Теплозащита наружных стен здания с облицовкой из кирпичной кладки / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, С.И. Крышов, О.И. Пономарев // АВОК. – 2009. – №9.
6. 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.

1. Fokin, K.F. Construction heat engineering of enclosing parts of buildings / K.F. Fokin. – 4th ed., rew. and add. – M.: Stroiizdat, 1973. – 287 p.
2. Koroleva, T.I. Investigation of the moisture state of heterogeneous structures of external fences / T.I. Koroleva, N.V. Arzhayeva, I.E. Melnikov // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 4 (35). – P. 159–166.
3. Koroleva, T.I. Study of the possibility of condensation of water vapor in the thickness of the multi-layered structure of the outer fence / T.I. Koroleva, N.V. Arzhayeva // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 2 (35). – P. 152–158.
4. Koroleva, T.I. Investigation of conditions for the occurrence of condensate in the thickness of fences and its impact on the indoor indoor climate / T.I. Koroleva, G.I. Gray-sukh, N.V. Arzhayeva, E.G. Yezhov // Internation Jorunal of Applied Engineering Reseach (IJAER), Paper Code 49434, Delhi, INDIA. – 2016. – Vol. 11, № 21. – P 10402–10407.
5. Gagarin, V.G. Thermal protection of the exterior walls of the building with brickwork cladding / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov, S.I. Kryshov, O.I. Ponomarev // AVOK. – 2009. – №9.
6. Kornienko, S.V. Evaluation of the moisture regime of a multi-layer wall structure in the annual cycle / S.V. Kornienko, N.I. Vatin, M.R. Petrichenko, A.S. Gorshkov // Construction of unique buildings and structures. – 2015. – №6.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 72:692:796

*Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет*
Россия, 603950, г. Н. Новгород,
ул. Ильинская, д. 65,
тел.: (831) 430-17-83

Гельфонд Анна Лазаревна,
чл.-кор. РААСН, доктор архитектуры,
профессор, зав. кафедрой «Архитектурное
проектирование» E-mail: gelfond@bk.ru

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет*
Россия, 430000, г. Саранск,
ул. Советская, д. 24,
тел.: (8342) 47-71-56

Моисеенко Владимир Алексеевич,
кандидат географических наук, доцент,
инж. кафедры «Строительные материалы
и технологии»
E-mail: vlalmo@mail.ru

*Научно-исследовательский институт
строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук*
Россия, 127238, Москва,
Локомотивный проезд, 21,
тел. 8 (8332) 742-565

Ерофеева Ирина Владимировна,
младший научный сотрудник
E-mail: yurkinuv@gmail.com

*Nizhny Novgorod State University of
Architecture and Civil Engineering*
Russia, 603950, Nizhny Novgorod, 65,
Il'inskaya St.,
tel.: (831) 430-17-83

Gelfond Anna Lazarevna,
Corresponding member of RAACS,
Doctor of architecture, Professor, Head of the
department «Architectural Design»
E-mail: gelfond@bk.ru

National Research Mordovia State University
Russia, 430000, Saransk, 24, Sovetskaya St.,
tel.: (8342) 47-71-56

Moiseenko Vladimir Alexeevich,
Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor, Engineer of the
department «Building Materials and
Technologies»
E-mail: vlalmo@mail.ru

*Research Institute of Building Physics of the
Russian Academy of Architecture and
Building Sciences*
Russia 127238, Moscow, 21,
Locomotivny passage,
tel.: 8 (8332) 742-565

Erofeeva Irina Vladimirovna,
Junior researcher
E-mail: yurkinuv@gmail.com

ОЛИМПИЙСКИЙ КОМПЛЕКС МЮНХЕНА КАК ПРЕДВЕСТНИК ДЕКОНСТРУКТИВИЗМА

А.Л. Гельфонд, В.А. Моисеенко, И.В. Ерофеева

Анализируется архитектура Олимпийского комплекса Мюнхена – одного из самых выдающихся сооружений, созданных на основе тентовых конструкций в 1972 г. по проекту Фрая Отто и Гюнтера Бениша. При этом особый акцент делается на выявлении в данном объекте стилистических особенностей деконструктивизма, сформировавшегося в статусе одного из направлений постмодернистской архитектуры значительно позднее.

Ключевые слова: Олимпийский комплекс Мюнхена, тентовые конструкции, Фрай Отто, Гюнтер Бениш, постмодернистская архитектура

THE OLYMPIC COMPLEX OF MUNICH AS THE FORERUNNER OF DECONSTRUCTIVISM

A.L. Gelfond, V.A. Moiseenko, I.V. Yerofeeva

The architecture of the Munich Olympic complex – one of the most outstanding constructions created by means of the awning designs in 1972 under the project of Frei Otto and Günther Benisch is analyzed. Specially the stylistic features of deconstructivism (generated in the status of one of the directions of postmodernist architecture considerably later) in this object are revealed.

Keywords: the Munich Olympic complex, awning designs, Frei Otto, Günther Benisch, postmodernist architecture

Одна из характерных черт деконструктивизма как архитектурного направления – его пародийное противостояние конструктивизму с присущим последнему культом строительной рациональности. Но за более чем три десятилетия своего существования (со второй половины 1980-х гг.) острота восприятия деконструктивистских объектов заметно притупилась. И жители больших городов уже без прежнего ажиотажа взирают на расплывшиеся по всему миру «танцующие дома», здания, напоминающие многократно увеличенную в размерах смятую жестяную канистру, дорогостоящую имитацию элементов руин, обгорелых стен, выбитых стекол, вырванных оконных рам и иных катастрофических повреждений.

И, наоборот, со все большей симпатией, сдобренной ностальгическими переживаниями, мы разглядываем те до-постмодернистские архитектурные объекты, в которых просматриваются черты господствующих ныне стилей. При этом, если предоставить различным функциональным типам зданий и сооружений, разбитым на пары (подобно, скажем, теннисистам, играющим в парном разряде), участвовать – с учетом всего того, что было возведено за время существования человеческой цивилизации, – в соревновании на количество и качество «пророческих» архитектурных и конструктивных решений, то победу практически наверняка одержал бы тандем, составленный из выставочных и спортивных объектов. И, разумеется, в качестве своеобразной визитной карточки эта пара могла бы предъявить множество уникальных архитектурных шедевров, созданных специально для проведения Всемирных выставок и Олимпийских игр.

Здесь и Хрустальный дворец Джозефа Пэкстона в Лондоне, и Эйфелева башня в Париже, и брюссельский Атомиум на ЭКСПО-58, и Олимпийский спортивный комплекс Кендзо Танге в Токио для игр 1964 года, и геодезическая сфера Бакминстера Фуллера на ЭКСПО-67 в Монреале. При этом отнюдь не являются редкостью зодчие, проектировавшие как для одной из этих двух «номинаций», так и для другой. Одним из наиболее показательных примеров может служить упомянутый выше Кендзо Танге. Буквально через несколько лет после своего «олимпийского» триумфа он выступил в роли архитектурного режиссера ЭКСПО-70 в Осаке. Однако созданная под его руководством Зона Символов если и не стала явным творческим фиаско, то в любом случае не произвела архитектурной сенсации, хотя бы отдаленно сопоставимой с той, что выпала на долю Олимпийского комплекса в Токио.

Куда более ровными в этом отношении представляются художественные достоинства двух уникальных объектов, возведенных по проектам немецкого архитектора Отто Фрая (1925–2015; далее мы будем использовать именно этот вариант его имени, в противоположность явно менее благозвучному с точки зрения русского языка варианту «Фрай Отто») – павильона ФРГ на ЭКСПО-67 (соавтор Рольф Гутборг) и спортивного комплекса в Мюнхене для Олимпийских игр 1972 года (соавтор Гюнтер Бениш). Собственно, символом концептуальной цельности творчества Отто Фрая может служить уже сама его установка на выявление эстетического потенциала в первую очередь тентовых конструкций.

Точно так же, как в историко-культурологической памяти человечества имя Ньютона неразрывно связано с упавшим на него в Вулсторпе яблоком, Архимеда – с ванной, ставшей местом формулировки знаменитого физического закона, Менделеева – с папиросной коробкой, на поверхности которой он якобы набросал свой первый

вариант периодической системы химических элементов, в жизни Отто Фрая тоже имеется подобного рода артефакт или, точнее, целая их серия. Это – полуполюгендарные палатки для укрытий, которые он согласно практически единогласным свидетельствам его биографов [1–5] проектировал, находясь во французском лагере для военнопленных близ Шартра. (Кстати, у французов были вполне весомые основания для заключения будущего знаменитого архитектора под стражу. Ведь, несмотря на свой всего лишь двадцатилетний – на тот момент – возраст, он уже успел повоевать в рядах люфтваффе как летчик-истребитель.)

Но сопричастность Отто Фрая к сонму великих исторических фигур прошлого вовсе не ограничивается набором перечисленных выше артефактов. С тем же Исааком Ньютоном, например, его объединяет еще одно любопытное биографическое совпадение. Оба в юном возрасте вынуждены были прервать свое обучение: Ньютон, тогдашний студент Кембриджского Тринити-колледжа, – из-за эпидемии чумы, поразившей Англию в 1665 г., Отто Фрай же, студент архитектурного факультета Высшей технической школы Берлина, – из-за «коричневой чумы», как принято именовать фашистский режим. И именно эти обстоятельства привели обоих в те места, где на них снизошло творческое озарение, определившее всю их последующую жизнь: первого – в родовое поместье Вулсторп, второго – в лагерь для военнопленных.

После столь бурного дебюта дальнейший *curriculum vitae* Отто Фрая впечатляет своей солидностью и неуклонным движением вверх по профессиональной лестнице. В 1950 г., в возрасте двадцати пяти лет, он заканчивает с дипломом архитектора Берлинский технический университет. Затем полгода стажировается в США, где общается с Эрихом Мендельсоном, Людвигом Мис ван дер Роэ, Рихардом Нейтра, Ээро Саариненом и «самим» Фрэнком Ллойдом Райтом. В 1952 г. (то есть в 27 лет) создает собственное архитектурное бюро в Целендорфе. В 1954 г. получает докторскую степень за сооружения из подвесных конструкций. В 1964 г. возглавляет в статусе профессора основанный им же самим Институт легких конструкций Штутгартского университета. А затем оглушительный успех – победа в конкурсе (где выступающим в качестве соавторов Отто Фраю и Рольфу Гутборгу противостояли 116 других работ [6, с. 142]) на проект павильона ФРГ для ЭКСПО-67 в Монреале.

В определенном смысле это сооружение и созданный в последующем Олимпийский комплекс в Мюнхене можно рассматривать в совокупности как своеобразный архитектурный диптих (см. в связи с этим предложения по введению в научный оборот понятия «градостроительного мега-ансамбля», который в современной информационной среде способен формироваться из объектов, отстоящих друг от друга на сотни и тысячи километров [7, с. 5–6]). Будто сублимируя свои юношеские впечатления о лагере военнопленных, Отто Фрай организует над павильоном перекрытие в виде маскировочной сетки площадью 8 тыс. м², якобы впопыхах наброшенной на косо расставленные колья-опоры высотой от 14 до 36 м (рис. 1). А воспоминаниям о службе в люфтваффе могут в таком случае соответствовать предназначенные для доступа дневного свет большие овальные иллюминаторы, затянутые прозрачной пленкой.

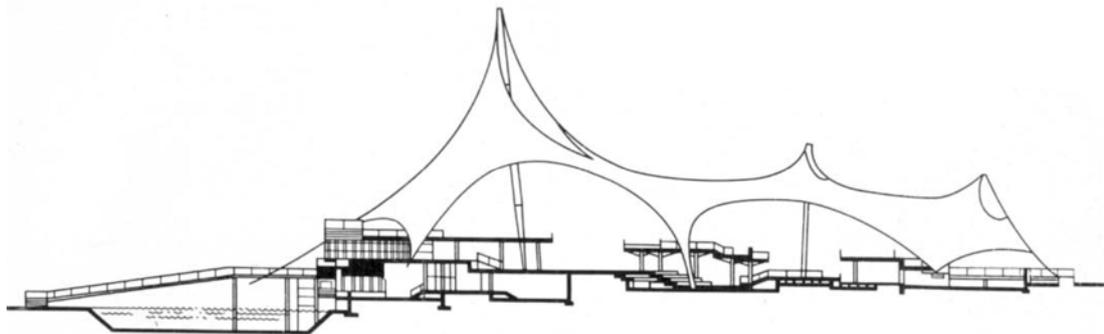


Рис. 1. Разрез павильона ФРГ на ЭКСПО-67 в Монреале [6, с. 143]

Если данные предположения касательно трактовки образной символики павильона еще могут дискутироваться, то непреложным фактом остается тот грандиозный скандал в средствах массовой информации, который вызвали очертания плана тентового покрытия. Оказалось, что они едва ли не в точности совпадают с очертаниями границ Германской империи до 1918 года (рис. 2). Сам Отто Фрай объяснил это случайным совпадением. Однако не исключено, что для привлечения дополнительного внимания публики к своему детищу он не только тщательно готовил эту эпатажную акцию (разумеется, предварительно проконсультировавшись со своим адвокатом относительно возможных правовых последствий), но и первый же «ненавязчиво» обратил на нее внимание представителей СМИ, которые – в силу соответствующего уровня интеллекта и эрудиции – могли бы иначе вообще ничего не заметить.

Кажется, что этого единственного по-настоящему громкого скандала в своей творческой карьере Отто Фрайю оказалось достаточно на всю последующую жизнь. Впрочем, что касается Мюнхенской олимпиады 1972 года, для которой он в соавторстве с Гюнтером Бенишем спроектировал спортивный комплекс, там всевозможного рода и масштаба накладок и потрясений оказалось более чем достаточно и без него, – начиная от оставшегося практически незамеченным соотношения $36 \cdot 2 = 72$ (имеются в виду последние две цифры в годах проведения Олимпиад в фашистском Берлине и в Мюнхене соответственно) и вплоть до захвата в заложники и последующего убийства израильских спортсменов.

Однако прежде чем начать детальное рассмотрение Олимпийского комплекса, нелишне дать краткую характеристику того урбанистического (а также связанного с ним культурологического) контекста, в котором он возник и ныне существует. Как известно, Мюнхен получил статус хозяина XX летних Олимпийских игр за шесть лет до их проведения, в 1966 г. Главным вопросом сразу же стал поиск в густонаселенном городе тех нескольких сотен гектаров земли, которые необходимо было отвести как под сам комплекс, так и под окружающую его инфраструктуру.

После рассмотрения всевозможных вариантов выбор пал на расположенный относительно недалеко от центра Мюнхена (около полутора часов ходьбы неспешным шагом в северо-западном направлении) заброшенный пустырь Обервизенфельд (Oberwiesenfeld). До 1930-х гг. там располагался аэродром, а в дальнейшем – огромная свалка, на которую свозились бытовые отходы со всего Мюнхена. В результате за несколько лет бывшая свалка превратилась в одну из самых популярных и посещаемых достопримечательностей Мюнхена – Олимпийский парк (Olympiapark; рис. 3, 4).

При его создании ландшафтный архитектор Гюнтер Гржимек руководствовался слоганом, ставшим затем официальным лозунгом всего спортивного мероприятия, – «Olympische Spiele im Grünen» (Олимпийские игры на природе). Огромные кучи мусора были засыпаны землей, покрытой, в свою очередь, травяным газоном. Уже в 1968 г. над парком поднялась почти трехсотметровая телебашня (Olympiaturm) с двумя смотровыми площадками (на высоте 178 и 189 м соответственно). Кроме того, на высоте 181 м был открыт ресторан, совершающий, наподобие нашего останкинского, полный оборот вокруг своей оси за 50 мин.

Сам Олимпийский комплекс был торжественно открыт 26 мая 1972 г. В нем выделяются следующие структурные элементы: собственно спортивные сооружения и непосредственно связанная с ними инфраструктура; Олимпийская деревня; Олимпийский пресс-центр; Олимпийский парк с Олимпийской горой (Olympiaberg) и Олимпийским озером (Olympiasee) площадью 8 га. Последнее стало, по сути, не только геометрическим, но и композиционным центром всего парка (несмотря на то, что самая большая глубина в нем – всего 1,4 м; рис. 3–5).

Основными спортивными сооружениями Олимпийского парка, в свою очередь, являются:

- Олимпийский легкоатлетический стадион (Olympiastadion) на 69 тыс. мест (с возможностью нарастить это число до 80 тыс.; рис. 6);
- Многоцелевой спортивный дворец (Olympiahalle) на 6–12 тыс. мест (в зависимости от вида мероприятия; рис. 7);

- Дворец водных видов спорта (Olympia-Schwimmhalle), способный вместить до 5 тыс. зрителей (рис. 8);
- велотрек (Olympia-Radstadion) и теннисные корты, связанные с перечисленными выше объектами исключительно территориально, но отнюдь не композиционно, а потому в дальнейшем не упоминаемые (рис. 9).

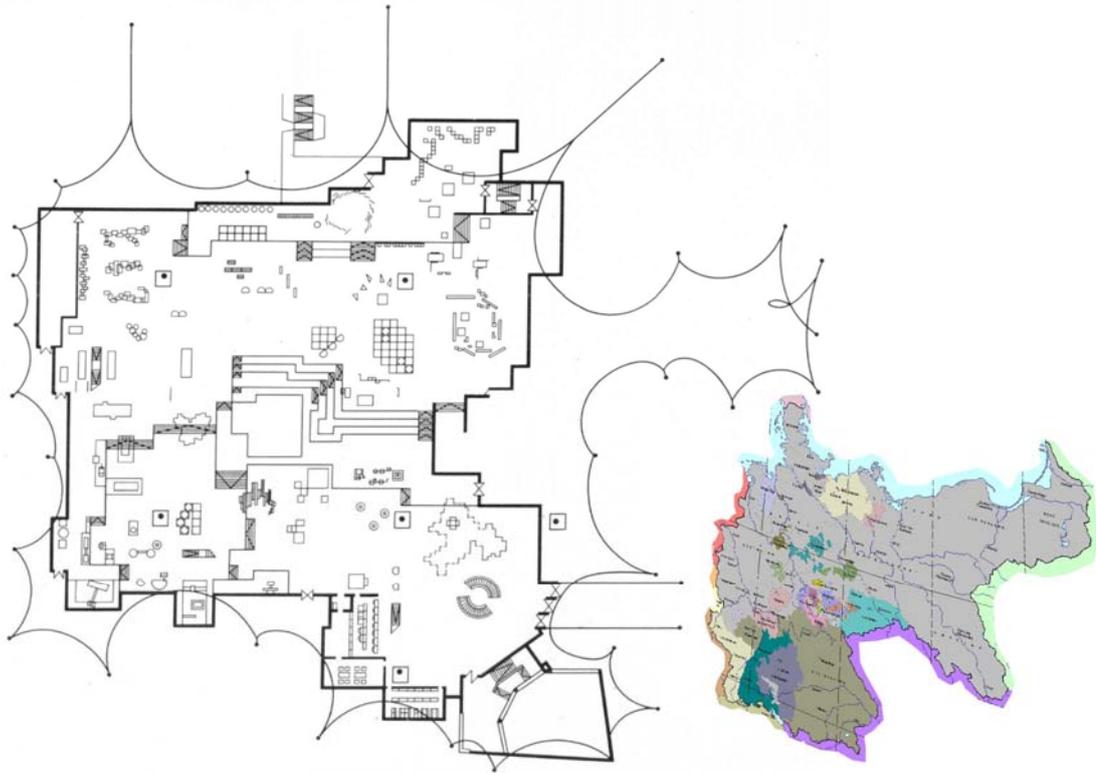


Рис. 2. План павильона ФРГ на ЭКСПО-67 в Монреале (слева) и карта Германской империи в границах до 1918 г. (справа). Коллаж авторов



Рис. 3. Стенд с планом Олимпийского парка в Мюнхене. Фото авторов, март 2018 г.



Рис. 4. План Олимпийского парка в Мюнхене. Фото авторов, сентябрь 2016 г.

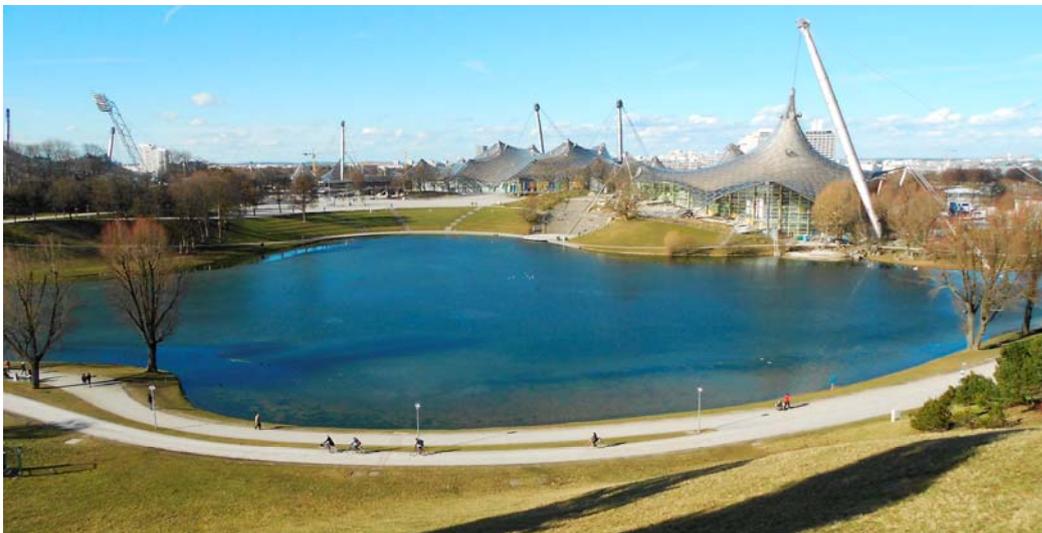


Рис. 5. Олимпийское озеро. Фото авторов, март 2018 г.



Рис. 6. Олимпийский стадион (Olympiastadion).
Фото авторов, март 2018 г.



Рис. 7. Фрагмент многоцелевого спортивного дворца (Olympiahalle).
Фото авторов, март 2018 г.



Рис. 8. Дворец водных видов спорта (Olympia-Schwimmhalle).
Фото авторов, март 2018 г.

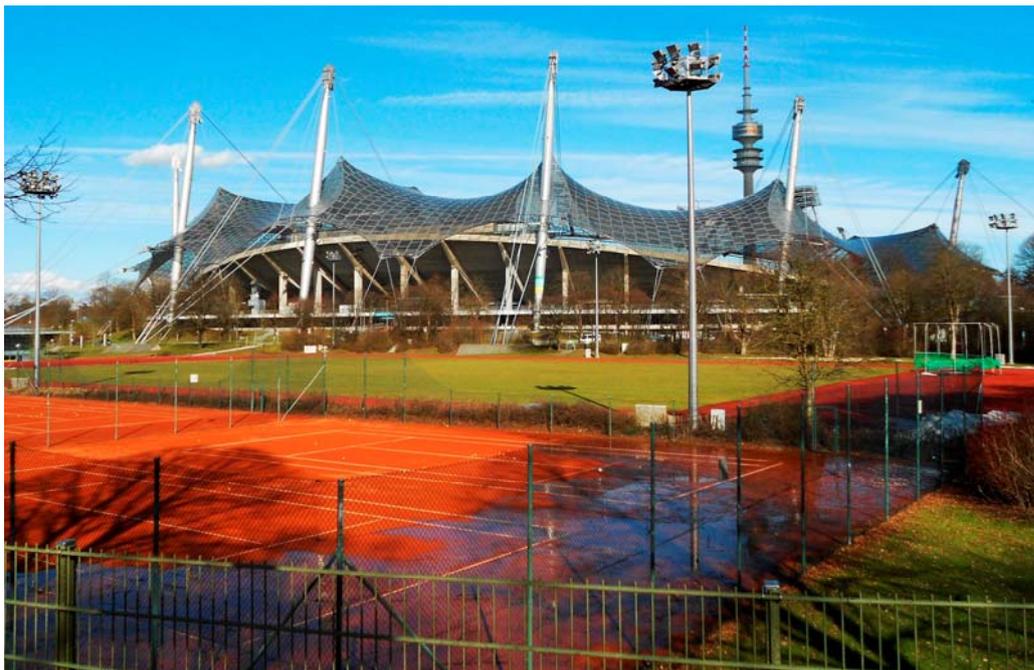


Рис. 9. Несколько теннисных кортов поблизости от Олимпийского стадиона.
Фото авторов, март 2018 г.

Идея исполнить крышу комплекса из прозрачного материала была продиктована необходимостью создать под сводами спортивных сооружений такой уровень освещенности, который обеспечивал бы как можно более высокое качество цветного изображения для телевидения. В итоге выбор пал на огнестойкий матированный «плексиглас-215», отличающийся долговечностью, прочностью и большой ударной вязкостью. Из данного материала было изготовлено 8500 листов толщиной 7 мм и размером 3 на 3 м. Каждый такой лист, весящий 42,5 кг, вставлялся в алюминиевую рамку и крепился на вантовой сетке в 9 точках-импостах. Смежные листы соединялись между собой жесткими водонепроницаемыми прокладками из неопрена [8, с. 16] (рис. 10).



Рис. 10. Фрагмент прозрачного перекрытия.
Фото авторов, март 2018 г.

В совокупности указанные выше 8500 модулей сформировали своеобразную гибкую мембрану, поддерживаемую в воздухе натяжением вантовой сетки из стальных тросов. Последние, в свою очередь, передают нагрузку на металлические мачты с поперечным сечением до 3,5 м, максимальной высотой 58 м и углом наклона от $65,5^\circ$ до $87,3^\circ$ [9, с. 77] (рис. 11). При этом угол наклона каждой мачты способен существенно варьироваться в соответствии с изменениями внешней нагрузки. Данную возможность обеспечивает особая конструкция шарниров и анкерных якорей-фундаментов (рис. 12, 13).



Рис. 11. Металлические мачты. Фото авторов, март 2018 г.



Рис. 12. Анкерный фундамент металлической мачты. Фото авторов, март 2018 г.



Рис. 13. Анкерный якорь-фундамент металлического троса. Фото авторов, март 2018 г.

Мы полностью солидарны с авторами, отмечающими революционность рассматриваемого здесь проекта, в том, что касается использования для возведения спортивных объектов огромных навесов из акрилового стекла и стальных тросов [10–14]. Однако, на наш взгляд, в исторической перспективе куда более важным оказывается совсем иное. По сути, создавая свой мюнхенский шедевр, Фрай и Бениш выступили в роли провозвестников уже упоминавшегося в начале статьи деконструктивизма. Причем в нашем случае этот «потенциальный» деконструктивизм ничуть не похож на многие нынешние вымученные и стремящиеся к дешевой скандальной славе архитектурные решения.

Здесь «завалившиеся» набок огромные стальные мачты – ни в коей степени не дорогостоящий и обременительный (для заказчика) художественный каприз, но прямое следствие изящного и экономичного инженерного решения, продиктованного всей логикой тентовой конструкции (рис. 14). И не следует полагать, что функции архитекторов свелись единственно к заурядному декорированию последней. Нет никаких сомнений, что лишь благодаря именно Отту Фрау как опытному и авторитетному специалисту, уже неоднократно с успехом использовавшему ранее тентовые конструкции, они легли в основу нового проекта.

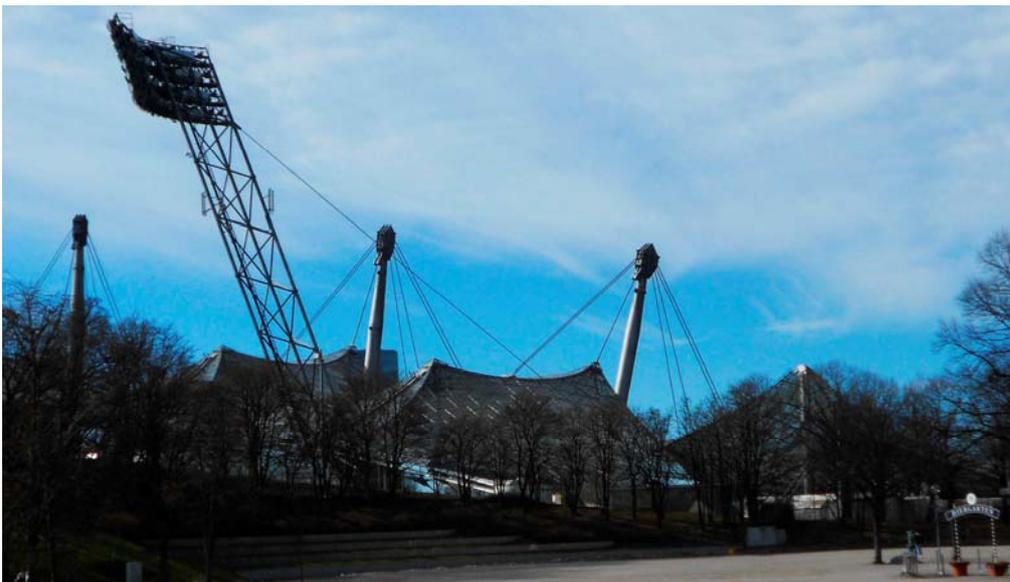


Рис. 14. Наклонные стальные мачты (включая осветительную) над Олимпийским стадионом. Фото авторов, март 2018 г.

Но, разумеется, и без должного художественного осмысления ни одна гениальная строительная конструкция не может стать полноценным архитектурным произведением. И в этом смысле авторы, вне всяких сомнений, оказались на высоте. Асимметричное в своей основе объемно-планировочное решение позволило им создать множество эффектных пространственных мини-композиций, которые на своем профессиональном жаргоне наши отечественные зодчие привыкли именовать «вкусными кускам» (рис. 15, 16).



Рис. 15. Крытый переход между Олимпийским стадионом и Многоцелевым спортивным дворцом. Фото авторов, март 2018 г.



Рис. 16. Прозрачный навес перед Многоцелевым спортивным дворцом. Фото авторов, март 2018 г.

При этом авторы не чурались эффектных визуальных «фокусов» – едва ли не в стиле оптических иллюзий знаменитого голландца Маурица Эшера (Эшером мы бы его называли, если бы он был немцем; по той же причине мы не называем Босха Бошем). Так, например, фрагмент, который только что выглядел безусловно асимметричным, вдруг в несколько ином ракурсе приобретает идеальную симметрию и начинает напоминать распластавшую по земле крылья огромную бабочку (ср. рис. 15 и 17).



Рис. 17. Фрагмент крытого перехода между Олимпийским стадионом и Многоцелевым спортивным дворцом. Фото авторов, март 2018 г.

При оценке художественных достоинств Олимпийского комплекса Мюнхена на память невольно приходит еще одно славное имя – Карла Росси. Как известно, этот гениальный зодчий одинаково виртуозно владел всем диапазоном архитектурных средств – начиная от ансамблевого проектирования и заканчивая дизайном дверных ручек и росписью декоративных ваз. В нашем случае архитекторы также проявили замечательное мастерство в артистической подаче отдельных конструктивных элементов, выглядящих зачастую как неординарные произведения современной абстрактной скульптуры (рис. 18–20).

Мы далеки от стремления к безоговорочно восторженной оценке всего того, что создано Фраем и Бенишем в Олимпийском парке Мюнхена. Так, справедливости ради можно заметить, что примененные ими прозрачные перекрытия в яркие солнечные дни практически не дают тени (рис. 21), а болельщики, взявшие билеты на северную трибуну Олимпийского стадиона, остаются на время матча без крыши над головой и вынуждены раскрывать в ненастную погоду зонтики.



Рис. 18. Конструктивные элементы углового конца прозрачного перекрытия.
Фото авторов, март 2018 г.



Рис. 19. Конструктивные элементы анкерного сцепления с фундаментом угловых концов прозрачного перекрытия. Фото авторов, март 2018 г.

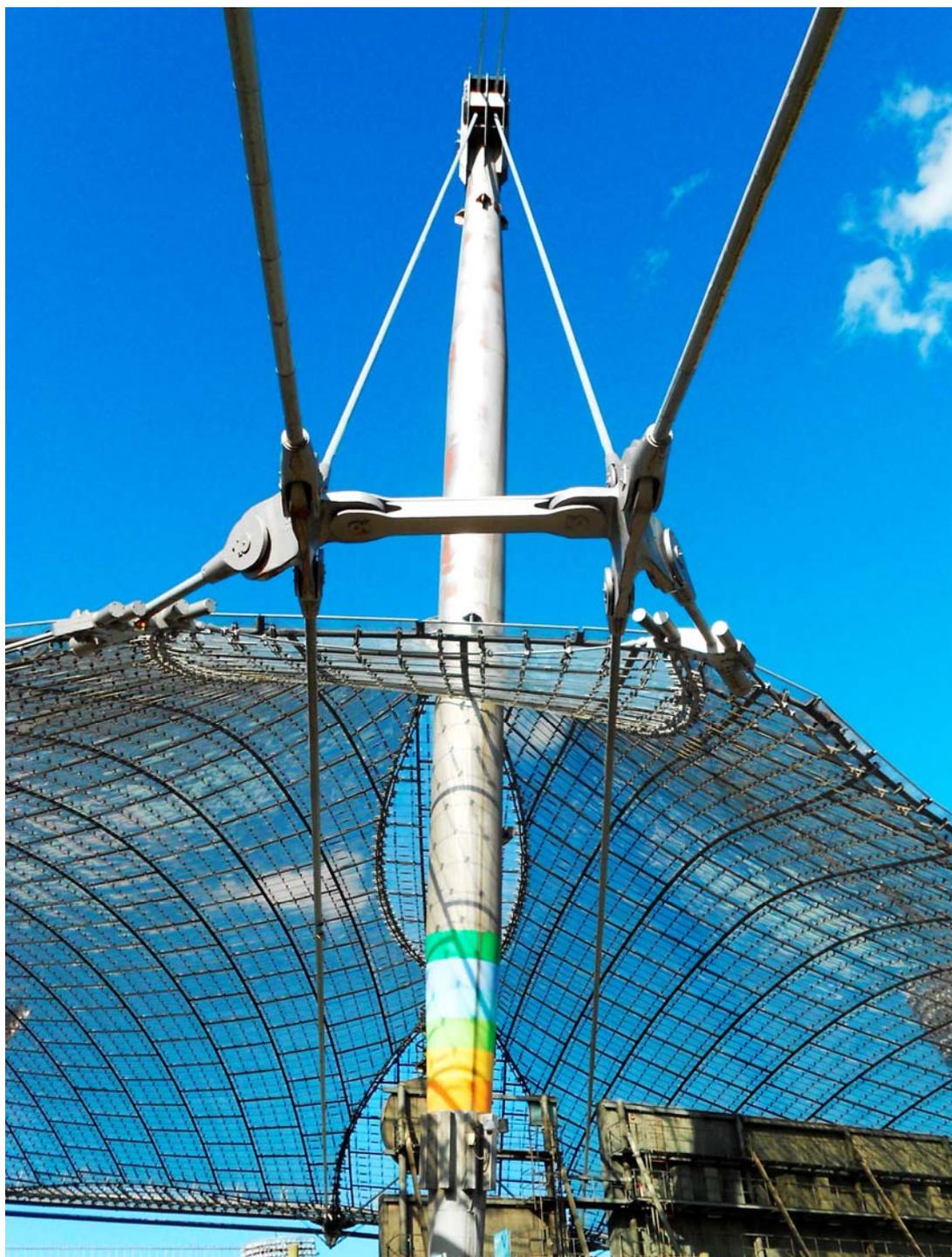


Рис. 20. Конструктивные элементы прозрачного перекрытия над Олимпийским стадионом. Фото авторов, март 2018 г.

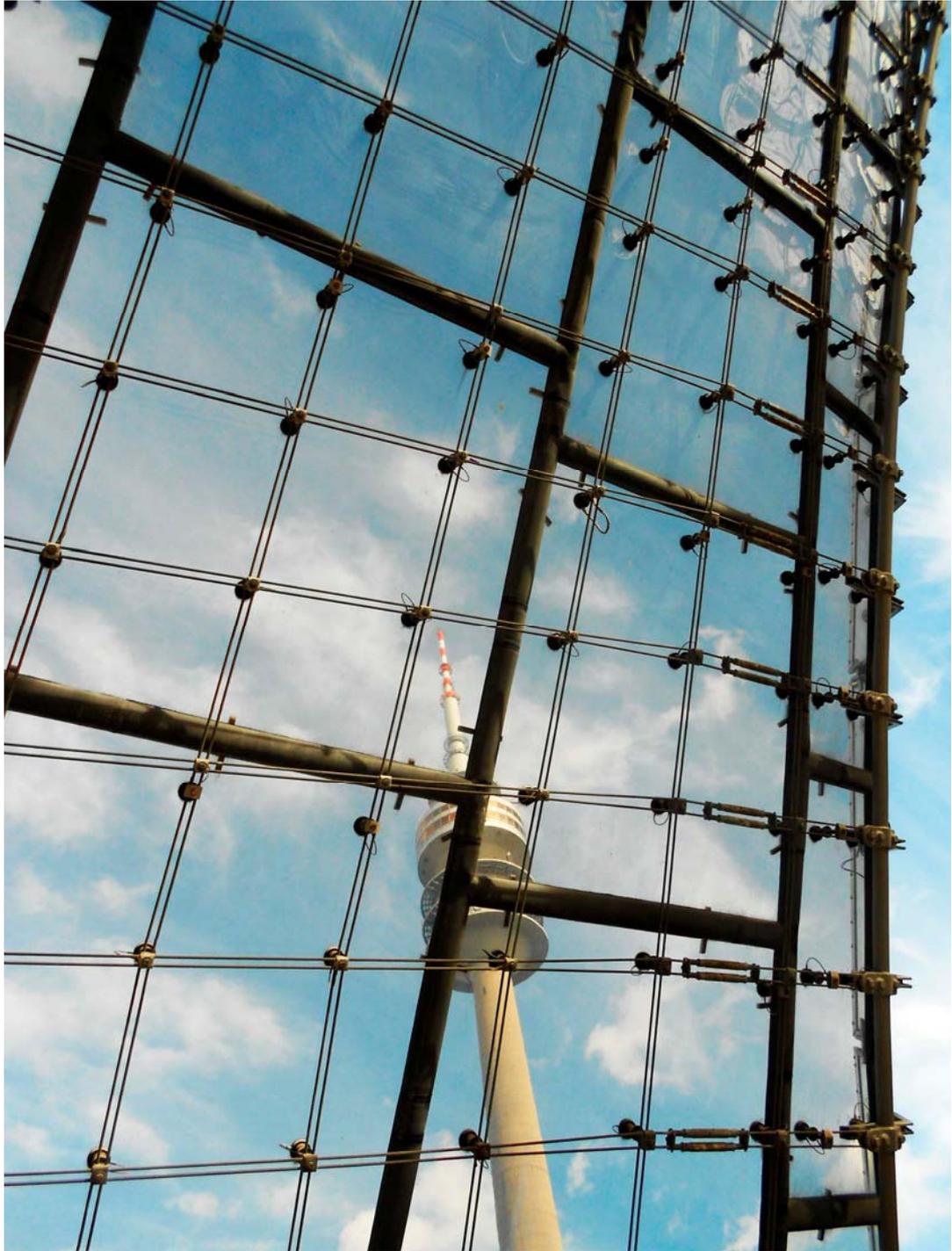


Рис. 21. Мюнхенская телебашня, отчетливо видная через прозрачное покрытие.
Фото авторов, март 2018 г.

Однако указанные недочеты – при всей их существенности – вовсе не отнимают у Олимпийского комплекса Мюнхена права именоваться архитектурным шедевром. Ведь в ином случае нам пришлось бы лишиться подобного статуса немало других творений знаменитых зодчих. Например, портика Воспитательного дома во Флоренции, созданного зачинателем ренессансной архитектуры Филиппо Брунеллески. Достаточно вспомнить, как ополчились флорентийцы на Франческо делла Луна, посмеявшегося «испортить» этот шедевр надстройкой над ним второго этажа [15, с. 270]. (Хотя только лишь после этого здание смогло использоваться по своему прямому

назначению, ибо появились обращенные во внутренний двор лоджии, специально предназначенные для сушки младенческих пеленок.)

Хочется надеяться, что аналогичные «усовершенствования» и «модернизации» не разрушат художественной целостности Олимпийского комплекса. Такие надежды тем более обоснованы, что еще в самом начале нашего столетия в рамках подготовки к Чемпионату мира 2006 года в Мюнхене был построен новый стадион – «Альянц Арена». И с 2005 г. прославленный футбольный клуб «Бавария», равно как и менее известный «Мюнхен 1860» проводят свои домашние игры исключительно на этом новом стадионе.

Список литературы

1. Roland, C. *Frei Otto – Spannweiten. Ideen und Versuche zum Leichtbau* / C. Roland. – Berlin, Ullstein, 1965. – 342 с.
2. Wilhelm, K. *Porträt Frei Otto* / K. Wilhelm. – Berlin: Quadriga, 1985. – 276 с.
3. Hezel, D. *Architekten – Frei Otto* / D. Hezel, C. Roland. – Stuttgart: IRB Verlag, 1988. – 312 с.
4. Ossowski, C. *Geplante Poesie. Ausgewählte Arbeiten von Frei Otto und seinen Teams 1955–2000* / C. Ossowski, K. Wilhelm. – Leonberg, 2001. – 288 с.
5. Nerdinger Winfried. *Leicht bauen, natürlich gestalten* / Nerdinger Winfried. *Frei Otto. Das Gesamtwerk.* – München: Architekturmuseum der Technischen Universität, 2005. – 254 с.
6. Кликс, Р.Р. *Художественное проектирование экспозиций* / Р.Р. Кликс. – М.: Высш. школа, 1978. – 368 с.
7. Вавилин, В.Ф. *Градостроительные ориентиры российских столиц: Саранск* / В.Ф. Вавилин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 604 с.
8. Петрова, М.И. *Спортивно-зрелищные сооружения больших пролетов с тентовыми покрытиями* / М.И. Петрова. – М.: ЦКТИ, 1973. – 184 с.
9. Ярмоленко, А.Д. *Архитектура висячих покрытий Фрая Отто* / А.Д. Ярмоленко // *Terra humana.* – 2007. – № 6. – С. 34–37.
10. Мыскина, О.В. *Архитектура тентовых сооружений: проблемы формообразования: дис.... канд. архитектуры* / О.В. Мыскина. – М., 2003. – 216 с.
11. Шлейер, К. *Тентовые и вантовые строительные конструкции: пер. с нем.* / К. Шлейер. – М.: Стройиздат, 1970. – 256 с.
12. Штолько, В.Г. *Архитектура зданий с висячими покрытиями (теоретические и прикладные аспекты): дис. д-ра архит. в форме научн. доклада* / В.Г. Штолько. – М.: ЦНИИЭП жилища, 1986. – 312 с.
13. Scheffele, W. *Das leichte Haus: Utopie und Realität der Membranarchitektur* / W. Scheffele. – Leipzig: Edition Bauhaus, Spector Books, 2016. – 324 с.
14. Schulte, K. *Fliegende Bauten* / K. Schulte. – Ludwigsburg, 2000. – 298 с.
15. Вазари, Д. *Жизнеописания наиболее знаменитых живописцев, ваятелей и зодчих* / Д. Вазари. – М.: АЛЬФА-КНИГА, 2008. – 1278 с.

References

1. Roland, C. *Frei Otto – Spannweiten. Ideen und Versuche zum Leichtbau* / C. Roland. – Berlin, Ullstein, 1965. – 342 p.
2. Wilhelm, K. *Porträt Frei Otto* / K. Wilhelm. – Berlin: Quadriga, 1985. – 276 с.
3. Hezel, D. *Architekten – Frei Otto* / D. Hezel, C. Roland. – Stuttgart: IRB Verlag, 1988. – 312 с.
4. Ossowski, C. *Geplante Poesie. Ausgewählte Arbeiten von Frei Otto und seinen Teams 1955–2000* / C. Ossowski, K. Wilhelm. – Leonberg, 2001. – 288 с.
5. Nerdinger Winfried. *Leicht bauen, natürlich gestalten* / Nerdinger Winfried. *Frei Otto. Das Gesamtwerk.* – München: Architekturmuseum der Technischen Universität, 2005. – 254 с.

6. Kliks, R.R. The art designing of expositions / R.R. Kliks. – M.: High School, 1978. – 368 p.
7. Vavilin, V.F. Town-planning reference points of the Russian capitals: Saransk / V.F. Vavilin. – Saransk: Publishing house Mordov. Univ., 2009. – 604 p.
8. Petrov, M.I. Sports-entertainment constructions of the big flights with awning coverings / M.I. Petrov. – M.: CKTI, 1973. – 184 p.
9. Yarmolenko, A.D. The architecture of the trailing coverings of Fr Otto / A.D. Yarmolenko // Terra humana. – 2007. – № 6. – P. 34–37.
10. Myskina, O.V. The architecture of awning constructions: The problems of the image forming: Dis.... cand. of architecture / O.V. Myskina. – M., 2003. – 216 p.
11. Shleyer, K. The awning and shrouds building designs / K. Shleyer. – M: Stroyizdat, 1970. – 256 p.
12. Shtolko, V.G. The architecture of the buildings with trailing coverings (theoretical and applied aspects): Dis. Dr. arch. / V.G. Shtolko. – M.: CNIIEP of the dwellings, 1986. – 312 p.
13. Scheiffele, W. Das leichte Haus: Utopie und Realität der Membranarchitektur / W. Scheiffele. – Leipzig: Edition Bauhaus, Spector Books, 2016. – 324 c.
14. Schulte, K. Fliegende Bauten / K. Schulte. – Ludwigsburg, 2000. – 298 c.
15. Vasari, G. The lives of the most excellent Italian painters, sculptors, and architects / G. Vasari. – M.: Alpha-Book, 2008. – 1278 p.

УДК 711.4 – 168 – 047.43

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

Петрянина Любовь Николаевна,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Дерина Мария Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Сергунина Юлия Сергеевна,
студентка
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

Petryanina Lyubov Nikolaevna,
Associate Professor of the department «Urban
construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Derina Maria Alecsandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Urban construction and
Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Sergunina Yulia Sergeevna,
Student
E-mail: gsia@pguas.ru;

КОНЦЕПЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕКОНСТРУКЦИИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, Ю.С. Сергунина

Приведены результаты анализа методов технико-экономической оценки реконструкции городской застройки с целью определения её эффективности. Представлена процедура оценки реконструкции с использованием общих и частных технико-экономических показателей. Дано сравнение капитальных затрат при реконструкции и освоении новых территорий. Предложена концепция определения технико-экономической эффективности реконструкции для оценки проектных решений по целесообразности освоения свободных территорий; продолжительности реконструкции с использованием временного показателя затрат на этапах для наиболее точного выбора варианта реконструкции; эффективности сноса зданий старой застройки по капитальным затратам.

Ключевые слова: городская застройка, реконструкция, технико-экономическая оценка, проектные решения, капитальные затраты, эффективность

A CONCEPT OF TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF URBAN DEVELOPMENT RECONSTRUCTION

L.N. Petryanina, M.A. Derina, Yu.S. Sergunina

Methods of technical and economic evaluation of urban development reconstruction were studied in order to determine its effectiveness. The procedure for evaluating the reconstruction using general and private technical and economic indicators was carried out. A comparison of capital expenditures for reconstruction and development of new territories is given. The concept of determining technical and economic efficiency of reconstruction for evaluating design decisions on the feasibility of developing free territories; the duration of reconstruction using a time indicator of costs at stages for the most accurate choice of the reconstruction option; evaluating the capital costs effectiveness of demolition old buildings.

Keywords: urban development, reconstruction, technical and economic assessment, design solutions, capital costs, efficiency

Реконструкция городской застройки всегда связана с её оценкой – определением эффективности. Для этого используют данные, которые, как показал выполненный анализ, в силу своей разрозненности дают приближенный, а иногда и ошибочный

результат. Следствие такой оценки – некорректные проектные решения, снижающие эффективность реконструкции или показывающие её нецелесообразность. Такая ситуация негативно сказывается на развитии застройки современного города.

Поэтому после изучения материалов и результатов проектов, исходных данных для проектирования реконструкции отдельных территорий городской застройки была принята система оценки предполагаемой реконструкции с использованием единичных и общих технико-экономических показателей.

В группе частных показателей были выделены ценовые и условно-натуральные. К условно-натуральным показателям были отнесены:

- размеры участков под сложившейся городской застройкой;
- размеры городских территорий, свободных от застройки;
- плотность, этажность существующего жилого фонда;
- капитальность существующих жилых и общественных зданий;
- плотность, этажность проектируемой застройки;
- физический и моральный износ существующей застройки, процент её восстановительной стоимости, остаточный срок службы;
- обеспеченность населения жильём и обслуживающими учреждениями;
- степень городского благоустройства.

В ценовые показатели были включены:

- восстановительная стоимость жилых, обслуживающих зданий и благоустройства;
- стоимость остаточной жилой площади;
- стоимость ремонта, модернизации, благоустройства существующей жилой застройки;
- стоимость переноса нежилых построек за пределы проектируемого участка;
- эксплуатационные жилищно-коммунальные расходы;
- стоимость модернизации и капремонта жилых и нежилых зданий;
- стоимость новостроек [1].

Для более полной оценки проектных решений был выполнен подсчет общего технико-экономического показателя эффективности реконструкции по формуле

$$\mathcal{E} = A + K \cdot B, \quad (1)$$

где \mathcal{E} – приведённые затраты; A – эксплуатационные расходы; B – капитальные вложения на реконструкцию или застройку свободных участков; K – коэффициент эффективности, принимаемый по кварталам года или в целом за год.

Общий технико-экономический показатель эффективности реконструкции существующего фонда позволяет определить затраты и целесообразность предполагаемой реконструкции в сравнении с освоением свободных территорий.

Важным показателем при планируемой реконструкции является определение её продолжительности. При существующей системе наиболее точно определяются сроки только нового строительства, снос или реконструкция при этом отодвигаются на последний этап. В результате затраты на проведение реконструкции увеличиваются. В предлагаемом методе одновременно учитываются капзатраты на реконструкцию городских территорий и новое строительство. При этом одновременно могут увеличиваться сроки и нового строительства, и реконструкции, если это не снижает эффективность предполагаемого к внедрению проекта [2].

Суммируя капитальные затраты для разных этапов реконструкции, их экономически сравнивали для приведения планировочных вариантов к одному временному периоду – началу реконструкции. Расчет затрат для этапов выполнялся с использованием показателя Π , рассчитываемого по формуле

$$\Pi = 1/1 + n \cdot f, \quad (2)$$

где f – срок, за который капзатраты приводились к временному периоду; n – коэффициент, учитывающий временные факторы, $n = 0,08$.

Значения показателя Π на разных этапах приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Этапы реконструкции	1	2	3	4	5	6
Показатель расчета затрат на этапах	0,8	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3

Таким образом, для сопоставления капзатрат на разных этапах реконструкции следует использовать показатель расчёта П.

Так, на первом этапе $P_1 = 22\ 000$ руб./м² общей площади, а на четвертом этапе произошло увеличение до $P_4 = 32\ 000$ руб./м². Проведение прямого сопоставления капзатрат дает неверное представление об эффективности реконструкции первого этапа. С учетом показателя расчета затрат на этапах эффективность реконструкции четвертого этапа очевидна: $P_1 = 22\ 000 \cdot 0,8 = 17\ 600$ руб./м²; $P_4 = 32\ 000 \cdot 0,4 = 12\ 800$ руб./м².

Метод приведения капзатрат на разных этапах реконструкции целесообразно применять при сравнении вариантов объёмно-планировочных решений, т.к. распределение капитальных затрат на практике происходит на этапах по-разному. Например, при освоении территорий под новое жилищное строительство уже на первом этапе необходимы значительные вложения в освоение площадки: инженерная подготовка, транспорт, благоустройство, хотя затраты на жильё в это время невелики. При реконструкции застройки затраты на подготовку территории на начальном этапе значительно ниже.

Сравнение капитальных затрат при реконструкции и освоении новых территорий приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Капитальные затраты	Реконструкция городской застройки, тыс. руб.	Новое строительство на свободных участках, тыс. руб.
1. Снос существующих зданий	39 540	-
2. Инженерная подготовка	7 140	27 000
3. Инженерные коммуникации:		
– электроснабжение	7 200	7 920
– водопровод	5 520	7 080
– водоотведение	4 800	7 620
– теплоснабжение	26 160	29 400
4. Транспорт	14 700	20 820
Всего	105 060	99 840

Данные в табл. 2 приведены без учета показателя затрат на разных этапах строительства П, поэтому следует выбрать вариант нового строительства на свободных участках.

Капитальные затраты с учетом показателя П приведены в табл. 3. Продолжительность каждого этапа условно принята 2–3 года.

Т а б л и ц а 3

Осваиваемая городская территория	Капитальные затраты на освоение территории с применением показателя П, тыс. руб.			
	этапы			
	1	2	3	всего
1. Новое строительство на свободных участках:				
– без учета временного показателя затрат П	45 000	33 000	21 840	99 840
– с использованием временного показателя П	34 620	20 160	11 100	65 880
2. Реконструкция городской застройки:				
– без учета временного показателя затрат П	21 000	36 000	48 060	105 060
– с использованием временного показателя П	15 960	21 960	24 600	62 520

По данным табл. 3 можно сделать вывод, что вариант реконструкции более эффективен [3].

При оценке объёмов и эффективности реконструкции учитывалась обоснованность сноса существующей застройки с использованием следующих данных:

- жилой фонд, непригодный для проживания;
- показатель повышения обеспечения населения жильём;
- реконструкция существующих и пробивка новых транспортных магистралей на основе сведений о росте автомобилизации;
- завершение строительства крупных жилых районов с учетом существующих коммуникаций;
- использование территорий под расширение и строительство промпредприятий.

На основе этих данных было проведено технико-экономическое обоснование (ТЭО) сносимых и сохраняемых при реконструкции городских объектов, принимая во внимание то, что сохраняемая застройка потребует только эксплуатационных затрат, а новостройки – затрат на строительство и эксплуатацию. Аналитические исследования показали, что снос отдельных жилых зданий нецелесообразен, т.к. стоимость ремонта 1 м² общей площади жилого здания ниже стоимости 1 м² новостройки. Поэтому задача сноса или реконструкции отдельных зданий должна решаться комплексно в процессе реконструкции городских территорий в целом, создавая комфортную среду.

В настоящее время для оценки предполагаемой под снос застройки используется сравнение её стоимости со стоимостью нового строительства или просто её стоимость с учётом износа и восстановления. Недостаток подобных методов в том, что они не учитывают средовую или историческую ценность зданий, природную или городскую ценность участков [4, 5].

В выполненных исследованиях оценка эффективности сноса или сохранения зданий с процентом физического износа до 50 выполнялась комплексно на основе расчетов капзатрат и экономии. При этом в предлагаемой методике были установлены этапы сноса существующих зданий.

Оценка эффективности сноса зданий старой застройки выполнялась на основе показателей капзатрат:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{Z}_1 + (1 - T) \mathcal{Z}_2 - 0,5 (\mathcal{Z}_3 + \mathcal{Z}_4 + \mathcal{Z}_5) - (B - c/c)(\mathcal{Z}_6 - \mathcal{Z}_3), \quad (3)$$

где \mathcal{Z}_1 – стоимость существующего фонда без амортизации; T – коэффициент приведения, увеличивающий капзатраты на новое строительство; \mathcal{Z}_2 – капзатраты на 1 м² общей площади в новых жилых зданиях на реконструируемых участках; \mathcal{Z}_3 – капзатраты на капитальный ремонт существующих зданий; \mathcal{Z}_4 – капзатраты на модернизацию существующей застройки; \mathcal{Z}_5 – капзатраты на благоустройство существующих территорий; \mathcal{Z}_6 – капзатраты на 1 м² общей площади в новых жилых зданиях на свободных участках; 0,5 – коэффициент (получен в ходе исследований), учитывающий вероятность несвоевременности капзатрат на ремонтные работы, благоустройство и модернизацию; B – общий объём новостроек, предполагаемый к размещению в условиях сложившейся застройки; c – общий объём оцениваемой застройки, подлежащей сносу.

Капитальные затраты на снос существующих зданий включают стоимость существующего фонда без амортизации и капзатраты на новое строительство, рассчитанные как $\mathcal{Z}_2 (1 - T)$. Поэтому затраты при сносе существующих зданий будут содержать не всю стоимость новостроек взамен сносимых, а только капзатраты на преждевременное строительство. При этом затраты на сносимую застройку будут тем больше, чем больше класс её капитальности, т.к. T (коэффициент, который увеличивает капзатраты на новое строительство) уменьшается.

Экономия капитальных затрат при строительстве в условиях сложившейся застройки может быть получена при включении в их стоимость стоимости ремонта и модернизации сохраняемых существующих зданий, а также величины $B - c/c (\mathcal{Z}_6 - \mathcal{Z}_2)$, которая показывает увеличение стоимости при освоении новых участков [6].

Снос существующих зданий будет целесообразным, если Δ_1 имеет нулевое или отрицательное значение, если Δ_1 положителен, следует определять величину, показывающую увеличение стоимости, связанное со сносом. В этом случае такую величину следует сравнивать с эффективностью архитектурно-планировочных решений в увязке с социальными вопросами при реконструкции, и только потом принимать окончательное решение о сносе или сохранении существующей застройки. При этом комплексная реконструкция городских территорий будет эффективной в случае сноса старых зданий, если удорожание будет незначительным.

По (3) для оценки эффективности сноса старой застройки необходимо классифицировать существующие здания, т.к. показатели будут однотипны, а оценка более объективной.

Оценку эффективности сноса старой застройки следует выполнять:

- для города в целом;
- для центральной части города;
- для городских районов с ценной культурно-исторической застройкой;
- для городских районов, предполагаемых к застройке в первую очередь;
- при разработке проектов планировки территории (ППТ) и проектов детальной планировки (ПДП) [7].

Выводы

1. В целях уточнения методики проектных решений по преобразованию городской застройки необходимо выполнять расчет общего технико-экономического показателя эффективности реконструкции.

2. При планируемой реконструкции расчет её продолжительности необходимо выполнять, используя временной показатель затрат на этапах, что даст возможность целесообразного выбора варианта реконструкции.

3. Показана целесообразность сноса зданий старой застройки на основе расчета показателей капитальных затрат, что позволит объективно оценить стоимость сноса для разных по размеру городских территорий.

Список литературы

1. Петрянина, Л.Н. К вопросу о комплексном градостроительном проектировании / Л.Н. Петрянина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. Шухова. – 2018. – №7. – С.57–64.
2. Дерина, М.А. Способы повышения энергоэффективности жилых зданий в процессе реконструкции / М.А. Дерина // News of Science and Education. – 2018. – Vol. 3, №5. – С.064–067.
3. Петрянина, Л.Н. Методика повышения эффективности использования городских территорий при реконструкции жилых районов / Л.Н. Петрянина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №2(35). – С.191–195.
4. Дерина, М.А. К вопросу о целесообразности и экономической обоснованности реконструкции жилых зданий старой застройки / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2017. – №5(12). – С.179–184.
5. Петрянина, Л.Н. Реконструкция жилых зданий опорного городского фонда как направление современного городского строительства / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3(32). – С.172–176.
6. Петрянина, Л.Н. Реконструкция городской среды: новая и сложившаяся застройка / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, П.В. Монастырёв // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №4(29). – С.83–86.

References

1. Petryanina, L.N. On the issue of integrated urban planning / L.N. Petryanina // Bulletin of Belgorod state technological University. Shukhov. – 2018. – No. 7. – P. 57–64.

2. Derina, M.A. Ways to improve energy efficiency of residential buildings in the process of reconstruction / M.A. Derina // News of Science and Education. – 2018. – Vol. 3, No. 5. – P. 064–067.

3. Petryanina, L.N. Methods of increasing the efficiency of urban areas in the reconstruction of residential areas / L.N. Petryanina, A.V. Grechishkin // Regional architecture and engineering. – 2018. – №2(35). – P. 191–195.

4. Derina, M.A. On the feasibility and economic feasibility of reconstruction of residential buildings of old buildings / M.A. Derina, L.N. Petryanina // Education and science in the modern world Innovation. – 2017. – №5(12). – P. 179–184.

5. Petryanina, L.N. Reconstruction of residential buildings of the basic urban Fund as a direction of modern urban construction / L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2017. – №3(32). – P. 172–176.

6. Petryanina, L.N. Reconstruction of the urban environment: new and existing buildings / L.N. Petryanina, M.A. Derina, P.V. Monastirev // Regional architecture and engineering. – 2016. – No. 4 (29). – P. 83–86.