

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ПРОИЗВОДСТВО СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

УДК 691.342

В. Т. ЕРОФЕЕВ¹, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительного материаловедения, академик РААСН; **Н. В. ЧЕРУШОВА¹**, канд. техн. наук, доц. кафедры «Основы архитектуры и художественных коммуникаций»; **Салман Давуд Салман АЛЬ ДУЛАЙМИ²**, д-р техн. наук, директор инженерного отдела Дирекции строительства и проектов; **Д. А. СВЕТЛОВ³**, канд. техн. наук, ген. директор; **Е. А. МИТИНА⁴**, канд. техн. наук, доц. кафедры зданий, сооружений и автомобильных дорог; **И. В. СЕРГЕЕВА¹**, канд. техн. наук, доц. кафедры «Основы архитектуры и художественных коммуникаций»; **А. Г. СОКОЛОВА¹**, канд. техн. наук, доц. кафедры строительного материаловедения; **К. А. ЧЕРУШОВ⁵**, инженер; **Н. А. ПОЛЕЖАЕВ⁴**, аспирант кафедры строительных материалов и технологий; **А. А. МАРТЫНОВ⁴**, аспирант кафедры строительных материалов и технологий

БИОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

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

Тел.: (927) 276-04-76; эл. почта: erofeevvt@bk.ru

²Министерство высшего образования и научных исследований Республики Ирак.

Республика Ирак, г. Багдад, ул. Русафа, д. 52.

Тел.: (964) 841-49-61; эл. почта: salmoon-1985@mai.ru

³ООО «СОФТ ПРОТЕКТОР».

Россия, 195030, г. Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28, литер Ц, помещ. ц1591.

Тел.: (981) 811-11-07; эл. почта: teflex@list.ru

⁴ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва».

Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Тел.: (8342) 24-37-32; эл. почта: mrsu@mrsu.ru

⁵ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук».

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21.

Ключевые слова: защитные покрытия, эпоксидные смолы, декоративные материалы, прочность, жесткость, биостойкость, фунгицидные добавки, пигменты, оптимизация, полный факторный эксперимент.



В статье разработаны и получены рациональные составы эпоксидных защитно-декоративных покрытий с повышенной биостойкостью и улучшенными эстетическими характеристиками, обеспечивающие повышение долговечности строительных конструкций и оздоровление экологической среды помещений. Применены методы математического планирования эксперимента (полный факторный эксперимент). Биостойкость оценивали по классическому методу 3 (обрастание микроорганизмами). Варьировали содержание эпоксидного связующего, отвердителя, растворителя, пластификатора, тонкодисперсных наполнителей, ахроматических и хроматических пигментов, а также фунгицидных добавок. Определены оптимальные соотношения компонентов, обеспечивающие требуемый уровень биостойкости и декоративных свойств. Установлено, что составы без биоцидов в условиях испытаний подвержены обрастанию микроскопическими грибами, что приводит к потере прочности и изменению упруго-пластических характеристик. Подобраны эффективные фунгицидные добавки, подавляющие рост микроорганизмов; найдены рациональные дозировки отвердителя, растворителя, пластификатора, пигментов и наполнителя в композициях. Получены биостойкие эпоксидные покрытия декоративного назначения, способные предотвращать развитие техногенных микозов, микотоксикозов и микроаллергозов, что улучшает экологическую безопасность зданий и сооружений и увеличивает срок службы конструкций.

Введение

Многие строительные конструкции на основе железобетона, металла, древесины и полимерных материалов в процессе эксплуатации подвергаются агрессивному воздействию биологически активных сред [1–7]. Биологическая коррозия становится одним из определяющих факторов надежности и безопасности зданий и сооружений. В настоящее время более 50 % общего объема регистрируемых в мире повреждений строительных и промышленных материалов обусловлено разрушением биологическими средами, что объясняется внедрением в производство широкого спектра биотехнологических процессов и расширением видового состава микроорганизмов, поражающих вновь создаваемые материалы [8–10]. Биозаражение конструкций ведет к ухудшению экологической ситуации: многие микроскопические грибы являются условно-патогенными, и рост их биомассы в помещениях вызывает развитие техногенных микозов, микотоксикозов и микроаллергозов, что представляет серьезную угрозу здоровью людей [10–12].

Для повышения долговечности строительных конструкций и улучшения экологической обстановки в зданиях и сооружениях необходимо применение мер, снижающих или исключающих биологическое воздействие [10, 13, 14]. Одним из эффективных методов защиты от биокоррозии является нанесение антикоррозионных лакокрасочных покрытий (ЛКП), способных образовывать на поверхности декоративную пленку с заданными физико-механическими и физико-химическими свойствами [15–23]. Биостойкие покрытия, нанесенные на поверхность конструкций, препятствуют заселению и размножению микроорганизмов. Однако при длительной эксплуатации они сами подвергаются биодеструкции: покрываются пятнами, выпучиваются, отслаиваются и теряют эксплуатационные свойства [24–31].

Основными агентами микробиологических повреждений защитных покрытий являются плесневые грибы, среди которых преобладают представители



родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Cephalosporium* и *Alternaria*. Видовой состав грибов специфичен для различных почвенно-климатических зон [32–36]. Развитие грибов на поверхности материалов происходит за счет использования в качестве питательной среды либо компонентов покрытия, либо загрязняющих поверхность веществ. Разрушение покрытий является результатом механического воздействия мицелия и влияния продуктов метаболизма (органических и минеральных кислот, ферментов, аминокислот и т. п.) [1, 3, 28, 32, 33, 35].

Биостойкость защитных покрытий в значительной степени зависит от состава, химической природы пленкообразующего, пластификаторов, стабилизаторов, отвердителей, растворителей, пигментов, а также от природы подложки [37–44]. Долговечность наполненных полимерных композитов определяется уровнем межфазного взаимодействия эпоксидного вяжущего с дисперсными наполнителями, в том числе наноразмерного уровня [45–49]. Настоящая работа посвящена изучению процессов биокоррозии и повышению биологического сопротивления полимерных композитов на основе эпоксидных связующих, что при их применении способствует улучшению экологической обстановки в зданиях и сооружениях.

Цели и задачи исследований

Цель работы – разработка биостойких материалов на эпоксидном связующем для защитных покрытий с улучшенными физико-механическими показателями и установление зависимости биостойкости от количественного содержания компонентов.

Задачи:

- 1) исследовать физико-механические свойства и долговечность материалов с различными компонентами;
- 2) разработать рецептуры составов с применением методов математического планирования эксперимента;
- 3) оптимизировать составы лакокрасочных материалов на основе эпоксидных смол различной цветовой гаммы по показателям физико-механических свойств;
- 4) провести испытания эпоксидных композитов на грибостойкость и фунгицидность;
- 5) выявить биостойкие составы полимерных композитов.

Материалы и методы

В экспериментах в качестве связующего использовали эпоксидную смолу марки ЭД-16, отвердитель – полиэтиленполиамин, растворитель – ацетон, пластификатор – дибутилфталат. Для окрашивания применяли мало дефицитные ахроматические и хроматические пигменты, широко используемые при получении лакокрасочных материалов. Из ахроматических пигментов взяты цинковые белила, алюминиевая пудра, технический углерод (белая и черная сажа), обеспечивающие соответственно белый, серебристо-серый и черный цвета. Хроматические пигменты относились к двум группам: «теплые» (желтые, оранжевые, красные) и «холодные» (зеленые, синие, фиолетовые). Использованы следующие пигменты: сурик железный (красный); кобальт фиолетовый темный; охра светлая (желтый); лазурь железная (темно-синий); железистоокисный желтый; глауконитовый зеленый; свинцовый крон (желтый).

Испытания на грибостойкость и фунгицидность проводили по ГОСТ 9.049–91 на образцах-призмах размером 1×1×3 см. В качестве тест-организмов использовали следующие виды микромицетов: *Aspergillus oryzae* Cohn, *Aspergillus niger* van Tieghem, *Aspergillus terreus* Thom, *Chaetomium globosum* Kunze, *Paecilomyces variotii* Bainier, *Penicillium funiculosum* Thom, *Penicillium chrysogenum* Thom, *Penicillium cyclopium* Westling, *Trichoderma viride* Pers. ex Fr. Сущность испытаний заключалась в выдерживании зараженных спорами образцов в оптимальных для развития грибов условиях с последующей оценкой грибостойкости и фунгицидности. В качестве характеристик микробиологической стойкости рассматривали обрастаемость грибами, а также относительное изменение прочности и жесткости. Обрастаемость определяли с использованием питательной среды Чапека – Докса (метод 3) и без дополнительных источников углеродного и минерального питания (метод 1).

Для разработки рецептур с пигментами использовали математические методы планирования эксперимента. Матрицей планирования служил латинский куб второго порядка, представляющий собой полный факторный эксперимент 3³, разбитый на девять блоков по три опыта [50–52]. Варьируемыми факторами выступали содержание отвердителя, растворителя, пластификатора и тип пигмента. Содержание компонентов варьировали на уровнях –1, 0 и +1. В натуральных величинах количество каждого компонента на указанных уровнях (мас. ч. на 100 мас. ч. смолы) составило: полиэтиленполиамин – 8, 10 и 12; ацетона – 0, 5 и 10; дибутилфталата – 0, 5 и 10. Тип пигмента в каждом опыте принимали согласно матрице планирования, где они обозначены символами: *A* – сурик железный; *B* – кобальт фиолетовый темный; *C* – охра светлая; *D* – лазурь железная; *E* – железистоокисный желтый; *F* – глауконитовый зеленый; *G* – алюминиевая пудра; *H* – цинковые белила; *I* – свинцовый крон.

В качестве наполнителей применяли высокодисперсные порошки силикатов, наиболее употребительные в лакокрасочной промышленности: тальк, каолин, а также технический углерод.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Лакокрасочные материалы в процессе эксплуатации испытывают механические воздействия, связанные с внешними нагрузками, усадочными и температурными деформациями, а также физико- и химико-биологическими процессами. Поэтому наряду с исследованием обрастаемости определяли изменения прочности и модуля упругости композитов после воздействия биологических сред. Физико-механическим испытаниям подвергали образцы, выдержанные в биологической среде по методу 3. Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Результаты показывают, что содержание отвердителя, растворителя, пластификатора и вид пигмента оказывают значительное влияние на биостойкость материалов. Обрастаемость при испытании по методу 1 изменяется в пределах от 2 до 4 баллов. Статистическая обработка результатов позволила выделить грибостойкие составы как с различной вязкостью, так и с высоким содержанием сухого остатка (табл. 2).



Таблица 1

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Матрица планирования				Степень роста грибов, балл		Характеристика грибостойкости по ГОСТ 9.049-91	Относительное изменение показателей после испытания по методу 3	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄					
					Метод 1	Метод 3		прочности	жесткости
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	−1	−1	−1	A	3	4	негрибостоек	0,913	0,736
2	−1	0	−1	E	3	5	негрибостоек	0,857	0,860
3	−1	+1	−1	I	3	4	негрибостоек	0,796	1,043
4	0	−1	−1	B	3	4	негрибостоек	0,891	1,024
5	0	0	−1	F	4	4	негрибостоек	0,885	0,931
6	0	+1	−1	G	3	4	негрибостоек	0,884	0,899
7	+1	−1	−1	C	3	5	негрибостоек	0,925	1,288
8	+1	0	−1	D	3	5	негрибостоек	0,835	0,627
9	+1	+1	−1	H	2	5	грибостоек	0,877	1,054
10	−1	−1	0	D	3	5	негрибостоек	0,922	0,810
11	−1	0	0	H	3	5	негрибостоек	0,974	0,993
12	−1	+1	0	C	3	5	негрибостоек	0,876	0,809
13	0	−1	0	E	2	4	грибостоек	0,930	1,236
14	0	0	0	I	3	5	негрибостоек	0,855	0,921
15	0	+1	0	A	3	5	негрибостоек	0,882	0,870
16	+1	−1	0	F	3	4	негрибостоек	0,883	0,866
17	+1	0	0	G	4	5	негрибостоек	0,903	0,766
18	+1	+1	0	B	3	5	негрибостоек	0,878	1,007
19	−1	−1	+1	G	2	5	грибостоек	0,855	1,112
20	−1	0	+1	B	2	4	грибостоек	0,939	0,880
21	−1	+1	+1	F	2	3	грибостоек	0,927	0,792
22	0	−1	+1	H	2	4	грибостоек	0,852	0,585
23	0	0	+1	C	3	5	негрибостоек	0,876	0,618
24	0	+1	+1	D	2	4	грибостоек	0,861	1,155
25	+1	−1	+1	I	2	5	грибостоек	0,827	1,108
26	+1	0	+1	A	3	5	негрибостоек	0,880	1,009
27	+1	+1	+1	E	3	5	негрибостоек	0,928	1,240

Проведенные исследования также показали, что все испытанные составы не обладают фунгицидными свойствами (обрастаемость 4–5 баллов при испытании по методу 3). После выдерживания образцов в присутствии дополнительных источников углеродного и минерального питания прочность и модуль упругости ЛКМ изменяются. Все рассмотренные составы показали снижение прочности; в зависимости от содержания отвердителя, растворителя, пластификатора и вида пигмента деформативность материала либо увеличивается, либо уменьшается.



Таблица 2

Грибостойкие лакокрасочные материалы

Тип пигмента	Содержание составляющих на 100 мас. ч. вяжущего			
	ПЭПА	Ацетон	Дибутилфталат	Пигмент
Цинковые белила	12	10	–	2,5
	10	–	10	2,5
Железоокисный желтый	10	–	5	1,8
Алюминиевая пудра	8	–	10	2,0
Кобальт фиолетовый	8	5	10	2,0
Глауконитовый зеленый	8	10	10	2,3
Лазурь железная	10	10	10	1,2
Свинцовый крон	12	–	12	2,0

При защите строительных конструкций, подвергающихся интенсивному воздействию жидких агрессивных сред или опасности ударных и абразивных нагрузок, применяют толстослойные покрытия на основе мало- и высоконаполненных составов. Ключевым компонентом таких составов, наряду со связующим, является наполнитель. В настоящей работе в качестве наполнителей использованы высокодисперсные порошки силикатов: тальк, каолин, а также технический углерод. Тальк придает структурную вязкость краскам, повышает атмосферостойкость и устойчивость к истиранию; отличительная особенность каолина – хорошая смачивающая способность. Технический углерод, обладая высокой химической стойкостью, свето- и термостойкостью, поглощает свет в видимой, ИК- и УФ-областях, способен структурироваться в цепные комплексы и обеспечивает хорошие электрические свойства, что делает его пригодным для атмосферостойких и антистатических покрытий.

Содержание наполнителей для мало- и высоконаполненных композиций составляло соответственно (мас. ч. на 100 мас. ч. смолы): 0,8 и 25 (белая сажа); 5 и 92 (черная сажа); 30 и 80 (тальк); 15 и 95 (каолин). Результаты испытаний на грибостойкость приведены в табл. 3.

Анализ результатов показывает, что композиции, наполненные сажами, каолином и тальком, не обладают грибостойкими свойствами, т. е. могут использоваться плесневыми грибами в качестве источника питания. Следовательно, введение данных наполнителей в грибостойкие составы ЛКМ приведет к снижению их биологического сопротивления.

Одним из наиболее эффективных и длительно действующих методов повышения биологической стойкости материалов является введение биоцидных добавок – фунгицидов [10, 15, 20]. Предложен широкий спектр добавок, защищающих композиционные материалы от обрастания, с разной интенсивностью подавляющих рост микроорганизмов. Для защиты ЛКМ применяют вещества, относящиеся к неорганическим, металлоорганическим и органическим соединениям [50–52].

В данной работе в качестве фунгицидных добавок исследованы тиомочевина и сульфат меди, вводимые в количестве 2,5; 5 и 10 мас. ч. на 100 мас. ч. эпоксидной смолы. Пигментами служили сурик железный, охра и черная сажа; наполнителями – каолин, тальк, белая сажа. Результаты испытаний лакокрасочных и наполненных композиций представлены в табл. 4.



Таблица 3

Результаты испытаний

Тип композиций	Вид наполнителя	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Грибостойкость, балл
Малонаполненные	Без наполнителя	35,0	88,0	3
	Белая сажа	34,4	43,4	5
	Черная сажа	32,0	80,2	4
	Каолин	32,2	86,8	4
	Тальк	35,4	72,3	4
Высоконаполненные	Без наполнителя	35,0	88,0	3
	Белая сажа	27,3	66,0	4
	Черная сажа	37,6	87,1	4
	Каолин	34,8	70,9	4
	Тальк	37,4	50,0	4

Таблица 4

Грибостойкость и фунгицидные свойства ЛКМ с фунгицидными добавками

Вид пигмента или наполнителя	Тип добавки	Кол-во добавки, мас. ч.	Степень обрастания, балл		Характеристика грибостойкости по ГОСТ 9.049-91
			Метод 1	Метод 3	
1	2	3	4	5	6
Сурик железный	тиомочевина	-	3	5	Негрибостоек
		2,5	1	4	Грибостоек
		5,0	1	4	Грибостоек
		10,0	1	4	Грибостоек
Сурик железный	сульфат меди	-	3	5	Негрибостоек
		2,5	2	4	Грибостоек
		5,0	2	ф.з. – 30 мм	Фунгициден
		10,0	0	ф.з. – 30 мм	Фунгициден
Охра	тиомочевина	-	3	5	Негрибостоек
		2,5	2	4	Грибостоек
		5,0	2	4	Грибостоек
		10,0	1	4	Грибостоек
	сульфат меди	-	3	5	Негрибостоек
		2,5	0	ф.з. – 8 мм	Фунгициден
		5,0	0	ф.з. – 10 мм	Фунгициден
		10,0	0	ф.з. – 10 мм	Фунгициден
Каолин	тиомочевина	-	4	5	Негрибостоек
		2,5	1	4	Грибостоек
		5,0	1	3	Грибостоек
		10,0	0	3	Грибостоек
	сульфат меди	-	4	5	Негрибостоек
		2,5	1	4	Грибостоек
		5,0	1	3	Грибостоек
		10,0	0	0	Фунгициден



Окончание таблицы

Тальк	тиомочевина	-	4	5	Негрибостоек
		2,5	1	4	Грибостоек
		5,0	1	4	Грибостоек
		10,0	0	4	Грибостоек
	сульфат меди	-	4	5	Негрибостоек
		2,5	0	4	Грибостоек
		5,0	0	4	Грибостоек
		10,0	0	4	Грибостоек
Сажа черная	тиомочевина	-	4	5	Негрибостоек
		2,5	0	4	Грибостоек
		5,0	0	4	Грибостоек
		10,0	0	4	Грибостоек
	сульфат меди	-	4	5	Негрибостоек
		2,5	2	4	Грибостоек
		5,0	2	4	Грибостоек
		10,0	0	ф.з.* – 15 мм	Фунгициден
Сажа белая	тиомочевина	-	4	5	Негрибостоек
		2,5	2	4	Грибостоек
		5,0	2	4	Грибостоек
		10,0	0	3	Грибостоек
	сульфат меди	-	4	5	Негрибостоек
		2,5	1	4	Грибостоек
		5,0	1	4	Грибостоек
		10,0	0	3	Грибостоек

Примечание. ф.з. – фунгицидная зона.

Результаты показывают, что из рассмотренных добавок наибольшая эффективность достигается при введении сульфата меди: он придает материалам с суриком железным, охрой, каолином и черной сажей фунгицидные свойства, а составам с тальком и белой сажей – грибостойкость. Введение тиомочевины способствует повышению грибостойкости ЛКП, но не обеспечивает фунгицидного эффекта.

Таким образом, лакокрасочные материалы без специальной защиты подвержены биологическим разрушениям. Показано, что повышение биостойкости ЛКМ достигается введением фунгицидных добавок, причем предпочтение следует отдавать сульфату меди. Разработанные составы могут быть рекомендованы для защиты строительных конструкций в условиях воздействия биологических сред, что способствует повышению долговечности зданий и сооружений и улучшению в них экологической обстановки.

Выводы

1. Проведены исследования физико-механических свойств и биостойкости мало- и высоконаполненных полимерных материалов на основе эпоксидного связующего с применением ахроматических и хроматических пигментов.

2. Исследования мало наполненных составов выполнены методами математического планирования эксперимента с использованием латинского куба второго порядка; варьируемыми факторами служили содержание отвердителя, растворителя, пластификатора и тип пигмента.



3. Установлено, что содержание отвердителя, растворителя, пластификатора и вид пигмента оказывают значительное влияние на грибостойкость. Все испытанные составы без биоцидных добавок не обладают фунгицидностью (обрастаемость 4–5 баллов по методу 3), обрастаемость по методу 1 изменяется от 2 до 4 баллов. После экспозиции в биологической среде все составы показали снижение прочности; деформативность материала в зависимости от состава либо возрастает, либо уменьшается.

4. При защите конструкций, подвергающихся интенсивному воздействию жидких агрессивных сред или ударно-абразивным нагрузкам, целесообразно применять толстослойные покрытия на основе мало- и высоконаполненных композиций.

5. Используемые в качестве наполнителей тальк, каолин и технический углерод сами по себе не придают композициям грибостойкости и могут служить питательным субстратом для плесневых грибов.

6. Наиболее эффективным и длительно действующим методом повышения биостойкости является введение биоцидных добавок – фунгицидов. В работе опробованы тиомочевина и сульфат меди в количествах 2,5–10 мас. ч. на 100 мас. ч. смолы.

7. Сульфат меди придает композициям с суриком железным, охрой, каолином и черной сажей фунгицидные свойства, а с тальком и белой сажей – грибостойкость. Тиомочевина повышает грибостойкость, но не обеспечивает фунгицидности.

8. Применение разработанных ЛКП с улучшенной биостойкостью, наносимых на строительные конструкции, способствует повышению долговечности зданий и сооружений и улучшению экологической ситуации в них.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке по теме «Технология получения бетонов нового поколения с улучшенными прочностными и упругопластическими свойствами и повышенной долговечности путем активации жидкой фазы и применения пластифицирующих, биоцидных, реологически активных и реакционно-активных модифицирующих добавок».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерофеев, В. Т. Каркасные композитные материалы для зданий и сооружений в агрессивных средах / В. Т. Ерофеев // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 165. – P. 1444–1447.

2. От традиционных бетонов к бетонам нового поколения / В. Т. Ерофеев, С. В. Самченко, О. В. Тараканов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2025. – Т. 68, № 12. – С. 83–95.

3. Микробиологически индуцированное разрушение бетона — обзор / С. Вэй, З. Цзян, Х. Лю [и др.] // Brazilian Journal of Microbiology. – 2013. – Vol. 44, № 4. – P. 1001–1007. – DOI 10.1590/S1517-83822014005000006.

4. Исследование изменения прочностных и деформационных свойств древесины под действием активной кислотной среды / С. Гомон, П. Гомон, С. Гомон [и др.] // Procedia Structural Integrity. – 2023. – Vol. 48. – P. 201–206.

5. Соломатов, В. И. Биологическое сопротивление материалов / В. И. Соломатов, В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов [и др.]. – Саранск : Издательство Мордовского университета, 2001. – 196 с.



6. Определение термостойкости полимерных строительных материалов динамическим механическим методом / В. О. Старцев, М. В. Молоков, А. Н. Блазнов [и др.] // *Polymer Science – Series D.* – 2017. – Vol. 10, № 4. – P. 313–317.
7. Ерофеев, В. Исследование шумопоглощающих и вибропоглощающих полимерных композитов, используемых в строительстве / В. Ерофеев, Л. Шафигуллин, А. Бобришев // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2018. – Vol. 463. – Art. 042034.
8. Рамсден, К. Цемент и бетон: экологическое воздействие / К. Рамсден. – 2020. – URL: <https://psci.princeton.edu/tips/2020/11/3/cement-and-concrete-the-environmental-impact> (дата обращения: 20.07.2026).
9. Микробиологическое разрушение материалов : учебное пособие / В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов, Е. А. Морозов [и др.]. – Москва : [б. и.], 2008. – 128 с.
10. За пределами времени: улучшение коррозионной стойкости геополимерного бетона и стержней из базальтового фиброволокна в морской воде / З. Чен, Дж. Ю, Й. Нонг [и др.] // *Composite Structures.* – 2023. – Vol. 322. – Art. 117439.
11. Хаджагхамеар, М. Высокое содержание шлака и полипропиленовых волокон в проектируемых цементных композитах: микроструктура и механические свойства / М. Хаджагхамеар, М. Мостофинеджад, Ч. Бахмани // *Magazine of Concrete Research.* – 2022. – Vol. 75, № 12. – P. 607–624.
12. Прочностные свойства химически модифицированных твёрдых древесин / П. Ясный, С. Гомон, В. Ясный [и др.] // *Procedia Structural Integrity.* – 2022. – Vol. 36. – P. 211–216.
13. Ерофеев, В. Ползучесть и релаксация полиэфиракрилатных композитов / В. Ерофеев, Н. Фомин, В. Ивлёв [и др.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – Vol. 896. – Art. 012111.
14. Модификация оксидных покрытий, синтезированных на сплаве циркония методом плазменного электролитического окисления / Н. Имбирович, И. Боярская, О. Повстаной [и др.] // *AIP Conference Proceedings.* – 2023. – Vol. 2949, № 1. – Art. 020011.
15. Нодехи М. Эпоксидные, полиэфирные и виниловые полимербетоны: обзор / М. Нодехи // *Innovative Infrastructure Solutions.* – 2021. – Vol. 7. – P. 1–24. – DOI 10.1007/s41062-021-00661-3.
16. Улучшение долговременной стойкости бетона к хлоридам с полимерными покрытиями на основе нано-TiO₂ / Г. Ли, Х. Цуй, Дж. Чжоу, У. Ху // *Coatings.* – 2019. – Vol. 9, № 5. – Art. 323. – DOI 10.3390/coatings9050323.
17. Эпоксидные лакокрасочные материалы с биоцидной добавкой «Тефлекс» / М. М. Касимкина, Д. А. Светлов, С. В. Казначеев [и др.] // *Лакокрасочные материалы и их применение.* – 2008. – № 1-2. – С. 77–79.
18. Берндт, М. Л. Оценка покрытий, растворов и состава смесей для защиты бетона от сероокисляющих бактерий / М. Л. Берндт // *Construction and Building Materials.* – 2011. – Vol. 32. – P. 3893–3902.
19. Циклическая прочность полиэфиракрилатных композитов / В. Ерофеев, Н. Фомин, В. Ивлёв [и др.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – Vol. 896. – Art. 012110.
20. Оценка бактерицидных свойств наночастиц оксида меди или функционализированного цеолитового покрытия для контроля биокоррозии в бетонных канализационных трубах / Т. Хайле, Г. Нахла, Э. Аллуш [и др.] // *Corrosion Science.* – 2010. – Vol. 52. – P. 45–53. – DOI 10.1016/j.corsci.2009.08.018.
21. Микробиологически индуцированная коррозия бетона и защитных покрытий в самотечных канализационных трубах / М. Валикс, Д. Замри, Х. Минейяма [и др.] // *Chinese Journal of Chemical Engineering.* – 2012. – Vol. 20, № 1. – P. 86–93.



22. Биостойкие строительные композиты на основе стеклянных отходов / В. Т. Ерофеев, А. Д. Богатов, В. Ф. Смирнов [и др.] // Биотехнология и экология больших городов. – 2011. – С. 21–28.
23. Изучение влияния редиспергируемых латексных порошков на кинетику затвердевания цементно-песчаных композитов / А. А. Бобришев, Л. Н. Шафигуллин, В. Т. Ерофеев [и др.] // Научный журнал фармацевтических, биологических и химических наук. – 2016. – Vol. 7, № 4. – Р. 795–802.
24. Випуланандан, Ч. Полимерные покрытия для бетонных поверхностей: испытания и моделирование / Ч. Випуланандан, Дж. Лю // Справочник по экологической деградации материалов. – 2-е изд. – 2012. – Р. 489–511.
25. Биологическая стойкость цементных композитов, наполненных доломитовыми порошками / В. Ерофеев, В. Калашников, Д. Емельянов [и др.] // Solid State Phenomena. – 2016. – Vol. 871. – Р. 33–39.
26. Випуланандан, К. Испытание и моделирование композитных покрытий с силинами для защиты железобетона в солёной среде / К. Випуланандан, А. Парихар, М. Исак // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2011. – Vol. 8, № 8. – Р. 1193–1202.
27. Стойкость полимерных композитов на основе полиэфиракрилатной смолы в условиях влажного морского климата / В. Т. Ерофеев, А. В. Мышкин, Е. Н. Каблов [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 5–12.
28. Мышкин А. В. Оптимизация составов полиэфиракрилатных композитов / А. В. Мышкин, В. Т. Ерофеев // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 56–61.
29. Прогнозирование регионов биоповреждений строительных материалов / Е. Н. Каблов, В. Т. Ерофеев, А. А. Ямашкин [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2019. – № 4 (52). – С. 158–166.
30. Msekh, M. A. Predicting fracture properties of clay/epoxy nanocomposites with interphase zones using a phase field model / M. A. Msekh, N. H. Cuong, G. Zi [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – Vol. 201. – Р. 212–226. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2018.08.029.
31. Повышение биокоррозионной стойкости эпоксидного покрытия путём добавления цеолита, замещённого Ag/Zn / А. М. Перейра, М. Р. Гонсалес, Т. А. Родригес [и др.] // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 270. – Р. 106–116.
32. Климатические испытания строительных материалов : монография / О. А. Аммосова, Ф. И. Бабенко, А. Н. Блазнов [и др.] ; под общ. ред. О. В. Старцева, В. Т. Ерофеева, В. П. Селяева. – Москва : АСВ, 2017. – 558 с. – ISBN 978-5-4323-0240-3.
33. Сравнительная оценка полиуретана и поливинилхлорида при облицовке бетонных канализационных труб для предотвращения биологической коррозии / М. Пазоки, М. А. Абдоли, Р. Гасемзаде [и др.] // International Journal of Environmental Research. – 2016. – Vol. 10, № 2. – Р. 305–312.
34. Противодействие биоповреждениям на этапах строительства, эксплуатации и ремонта в жилых и производственных помещениях : учебное пособие / В. Т. Ерофеев, Д. А. Светлов, С. В. Казначеев [и др.] ; под общ. ред. В. Т. Ерофеева. – Саранск : Издательство Мордовского университета, 2017. – 172 с. – ISBN 978-5-7103-3504-8.
35. Бажанова, М. Е. Исследование стойкости полимерных и металлополимерных трубопроводных материалов в условиях воздействия почвенных микроорганизмов / М. Е. Бажанова, В. Т. Ерофеев, А. Н. Бобрышев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5-2 (38). – С. 415–421.
36. Ерофеев, В. Т. Изучение видового состава микофлоры, отобранных образцов поверхности композитов для полярной полимеризации во влажном морском климате / В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов, А. В. Мышкин // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698. – Р. 1–6.



37. Ерофеев, В. Т. Моделирование биологической деградации / В. Т. Ерофеев, Е. А. Морозов // Биотехнология и экология больших городов. – 2011. – С. 29–36.
38. Амири, Х. Электрофоретическое осаждение наноциркониевого покрытия на магниевом сплаве AZ91D для целей биокоррозионного контроля / Х. Амири, И. Мохаммади, А. Афшар // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 311. – P. 182–190.
39. Разработка и исследование методов повышения биосовместимости строительных материалов / В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов, А. В. Дергунова [и др.] // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 974. – P. 305–311.
40. Тиягараджан, К. Интеллектуальный мониторинг температуры поверхности и содержания влаги с использованием мультисенсорного слияния данных / К. Тиягараджан, С. Кодарода // *Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, CIS 2015 and Robotics, Automation and Mechatronics, RAM 2015*. – 2015. – Vol. 311. – P. 182–190.
41. Ерофеев, В. Т. Эпоксидный композит с углеродными структурами в аддитивной технологии производства изделий для текстильной промышленности / В. Т. Ерофеев, Т. Ф. Ельчищева, М. В. Макаручук // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2022. – № 2 (398). – С. 346–354.
42. Эпоксидные композиты, модифицированные каменноугольной смолой / В. Т. Ерофеев, А. Д. Богатов, И. Е. Кондакова [и др.] // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2024. – № 16 (6). – С. 533–548.
43. Влияние влажности на адгезионные свойства эпоксидной смолы к бетону / Р. С. Аччиге, Д. Витанаре, Х. Бустаманте [и др.] // *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS 2013*. – P. 1–6.
44. Бобрышев, А. Н. Полимерные композиционные материалы : учебное пособие / А. Н. Бобрышев, В. Т. Ерофеев, В. Н. Козомазов. – Москва : АСВ, 2013. – 480 с. – ISBN 978-5-93093-980-4.
45. Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites / P.-C. Ma, S.-Y. Mo, B.-Z. Tang, J.-K. Kim // *Carbon*. – 2010. – Vol. 48, № 6. – P. 1824–1834.
46. Qiao, R. Simulation of interphase percolation and gradients in polymer nanocomposites / R. Qiao, L. C. Brinson // *Composites Science and Technology*. – 2009. – Vol. 69, № 3-4. – P. 491–499. – DOI 10.1016/j.compscitech.2008.11.021.
47. Awasthi, A. P. Modeling of mechanical behavior of graphene/polymer interface using molecular dynamics / A. P. Awasthi, D. C. Lagoudas, D. C. Hammerand // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2009. – Vol. 17, № 1. – Art. 015002. – DOI 10.1088/0965-0393/17/1/015002.
48. Effects of dispersion and interfacial modification on the macroscale properties of TiO₂ polymer–matrix nanocomposites / L. M. Hamming, R. Qiao, P. B. Messersmith, L. C. Brinson // *Composites Science and Technology*. – 2009. – Vol. 69, № 11-12. – P. 1880–1886. – DOI 10.1016/j.compscitech.2009.04.007.
49. Multiscale modeling of size-dependent elastic properties of carbon nanotube/polymer nanocomposites with interfacial imperfections / S. Yang, S. Yu, W. Keng [et al.] // *Polymer*. – 2012. – Vol. 53, № 2. – P. 416–425.
50. Разработка фотореактивной акрилово-алкидной композиции с биоцидной добавкой для защитного покрытия древесины / В. Ильина, В. Строкова, В. Ерофеев, И. Степина // *Architecture and Engineering*. – 2024. – Vol. 9, № 3. – P. 53–62.
51. Loos, M. Carbon nanotube reinforced composites: CNT polymer science and technology / M. Loos. – Elsevier, 2014. – 304 p.
52. Балатханова, Е. Регрессионная оценка модели на основе матрицы экспериментального планирования в задачах анализа композитных материалов / Е. Балатханова, И. Ерофеева, В. Афонин // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 281. – Art. 03015.



EROFEEV Vladimir Trofimovich¹, doctor of technical sciences, professor, professor of the chair of building materials science, academician of RAACS; **CHERUSHOVA Natalia Vladimirovna¹**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of fundamentals of architecture and artistic communications; **AL-DULAIMI Salman Dawood Salman²**, doctor of technical sciences, head of the engineering department of construction and projects directorate; **SVETLOV Dmitry Anatolievich³**, candidate of technical sciences, general director; **MITINA Elena Aleksandrovna⁴**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of buildings, structures and highways; **SERGEeva Irina Vladimirovna¹**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of fundamentals of architecture and artistic communications; **SOKOLOVA Alla Germanovna¹**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of building materials science; **CHERUSHOV Kirill Andreevich⁵**, engineer; **POLEZHAEV Nikolay Anatolievich⁴**, postgraduate student of the chair of building materials and technologies; **MARTYNOV Andrey Aleksandrovich⁴**, postgraduate student of the chair of building materials and technologies

BIORESISTANT COATINGS TO IMPROVE THE ECOLOGICAL SITUATION IN BUILDINGS AND STRUCTURES

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Tel.: (927) 276-04-76; e-mail: erofeevvt@bk.ru

²Ministry of Higher Education and Scientific Research, Baghdad, Iraq.

52, Rusafa St., Baghdad, Iraq.

Tel.: (964) 841-49-61; e-mail: salmoon-1985@mai.ru

³SOFT PROTECTOR, LLC.

28, Khimikov St., liter Ts, room ts1591, Saint Petersburg, 195030, Russia.

Tel.: (981) 811-11-07; e-mail: teflex@list.ru

⁴National Research Ogarev Mordovia State University.

68, Bolshevistskaya St., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia.

Tel.: (8342) 24-37-32; e-mail: mrsu@mrsu.ru

⁵Scientific Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Constructions Sciences (RAACS).

21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia.

Key words: protective coatings, epoxy resins, decorative materials, strength, stiffness, biostability, fungicidal additives, pigments, optimization, full factorial experiment.

The article presents the development and preparation of rational formulations of epoxy protective-decorative coatings with enhanced biostability and improved aesthetic characteristics, which increase the durability of building structures and improve the indoor ecological environment. Methods of mathematical experimental design (full factorial experiment) were applied. Biostability was assessed by the standard method 3 (microbial overgrowth). The contents of epoxy binder, hardener, solvent, plasticizer, finely dispersed fillers, achromatic and chromatic pigments, and fungicidal additives were varied. Optimal component ratios providing the required level of biostability and decorative properties were determined. It was established that compositions without biocides are subject to overgrowth by microscopic fungi under test conditions, leading to strength loss and changes in elastic-plastic characteristics. Efficient fungicidal additives that suppress microbial growth were selected; rational dosages of hardener, solvent, plasticizer, pigments and filler in the compositions were found. Biostable epoxy decorative coatings capable of preventing the development of technogenic mycoses, mycotoxicoses and microallergoses were obtained, which improves the environmental safety of buildings and structures and extends the service life of constructions.

REFERENCES

1. Erofeev V. T. Karkasnye kompozitnye materialy dlya zdaniy i sooruzheniy v agressivnykh sredakh [Framework composite materials for buildings and structures in aggressive environments]. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 165, P. 1444–1447.
2. Erofeev V. T., Samchenko S. V., Tarakanov O. V., Maksimova I. N., Stenechkina K. S., Erofeeva I. V. Ot traditsionnykh betonov k betonam novogo pokoleniya [From traditional concretes to new-generation concretes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Chemistry and Chemical Technology], 2025, Vol. 68, № 12, P. 83–95.
3. Wei S., Jiang Z., Liu H., et al. Microbiologically induced deterioration of concrete – a review. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2013, Vol. 44, No. 4, P. 1001–1007. DOI: 10.1590/S1517-83822014005000006.
4. Gomon S., Gomon P., Gomon S., Vereshko O., Boyarskaya I., Uzhegova O. Issledovanie izmeneniya prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv drevesiny pod deystviem aktivnoy kislотноy sredy [Study of changes in strength and deformation properties of wood under the action of an active acid medium]. *Procedia Structural Integrity*, 2023, Vol. 48, P. 201–206.
5. Solomatov V. I., Erofeev V. T., Smirnov V. F., Semicheva A. S., Morozov E. A. Biologicheskoe soprotivlenie materialov [Biological resistance of materials]. Saransk, Izdatelstvo Mordovskogo universiteta, 2001, 196 p.
6. Startsev V. O., Molokov M. V., Blaznov A. N., [et al.] Opredelenie termostoykosti polimernykh stroitelnykh materialov dinamicheskim mekhanicheskim metodom [Determination of thermal stability of polymer building materials by the dynamic mechanical method]. *Polymer Science – Series D*, 2017, Vol. 10, № 4, P. 313–317.
7. Erofeev V., Shafigullin L., Bobrishev A. Issledovanie shumopogloshchayushchikh i vibropogloshchayushchikh polimernykh kompozitov, ispolzuemykh v stroitelstve [Study of noise-absorbing and vibration-absorbing polymer composites used in construction]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 463, Art. 042034.
8. Ramsden K. Cement and concrete: the environmental impact. 2020. URL: <https://psci.princeton.edu/tips/2020/11/3/cement-and-concrete-the-environmental-impact>.
9. Erofeev V. T., Smirnov V. F., Morozov E. A., Atykhan N. A., Smirnova O. N., Gubanov D. A., Bogatov A. D., Dergunova A. V. Mikrobiologicheskoe razrushenie materialov: uchebnoe posobie [Microbiological destruction of materials: a textbook]. Moscow, 2008, 128 p.
10. Chen Z., Yu J., Nong Y., Yang Y., Zhang H., Tang Y. Beyond time: improving corrosion resistance of geopolymer concrete and basalt fibre-reinforced polymer bars in seawater. *Composite Structures*, 2023, Vol. 322, Art. 117439.
11. Hadjiaghamehr M., Mostofinejad M., Bahmani Ch. High slag and polypropylene fiber content in engineered cementitious composites: microstructure and mechanical properties. *Magazine of Concrete Research*, 2022, Vol. 75, № 12, P. 607–624.
12. Yasniy P., Gomon S., Yasniy V., Gomon S. S., Gomon P., Savitskiy V. Prochnostnye svoystva khimicheski modifitsirovannykh tverdykh drevesin [Strength properties of chemically modified solid wood]. *Procedia Structural Integrity*, 2022, Vol. 36, P. 211–216.
13. Erofeev V., Fomin N., Ivlev V., Yudin V., Myshkin A. Polzuchest i relaksatsiya poliefirakrilatnykh kompozitov [Creep and relaxation of polyester acrylate composites]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 896, Art. 012111.
14. Imbirovich N., Boyarskaya I., Povstanyoy O., Kurdzidlovskiy K., Khomon S., Kulakovskiy L. Modifikatsiya oksidnykh pokrytiy, sintezirovannykh na splave tsirkoniya metodom plazmennogo elektroliticheskogo oksidovaniya [Modification of oxide coatings synthesized on zirconium alloy by plasma electrolytic oxidation]. *AIP Conference Proceedings*, 2023, Vol. 2949, № 1, Art. 020011.



15. Nodehi M. Epoxy, polyester and vinyl polymer concretes: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, Vol. 7, P. 1–24. DOI: 10.1007/s41062-021-00661-3. [In English].
16. Li G., Cui H., Zhou J., Hu W. Improving long-term chloride resistance of concrete with nano-TiO₂ polymer coatings. *Coatings*, 2019, Vol. 9, № 5, Art. 323. DOI: 10.3390/coatings9050323.
17. Kasimkina M. M., Svetlov D. A., Kaznacheev S. V., Bogatov A. D., Erofeev V. T. Epoksidnye lakokrasochnye materialy s biotsidnoy dobavkoy «Tefleks» [Epoxy paint coatings with the biocidal additive “Tefleks”]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye* [Paint and Coatings and Their Application], 2008, № 1-2, P. 77–79.
18. Berndt M. L. Evaluation of coatings, mortars and mix design for protecting concrete from sulphur-oxidising bacteria. *Construction and Building Materials*, 2011, Vol. 32, P. 3893–3902.
19. Erofeev V., Fomin N., Ivlev V., Yudin V., Myshkin A. Tsiklicheskaya prochnost poliefirakrilatnykh kompozitov [Cyclic strength of polyester acrylate composites]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 896, Art. 012110.
20. Haile T., Nakhla G., Allouche E., et al. Evaluation of bactericidal properties of copper oxide nanoparticles or functionalized zeolite coating for controlling biogenic corrosion in concrete sewer pipes. *Corrosion Science*, 2010, Vol. 52, P. 45–53.
21. Valix M., Zamri D., Mineyama H., et al. Microbiologically induced corrosion of concrete and protective coatings in gravity sewer pipes. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, Vol. 20, No. 1, P. 86–93.
22. Erofeev V. T., Bogatov A. D., Smirnov V. F., Bogatova S. N., Kaznaveev S. V. Biostoykie stroitelnye kompozity na osnove steklyannykh otkhodov [Biostable building composites based on glass waste]. *Biotehnologiya i ekologiya bolshikh gorodov* [Biotechnology and Ecology of Big Cities], 2011, P. 21–28.
23. Bobrishev A. A., Shafigullin L. N., Erofeev V. T., [et al.] Izuchenie vliyaniya redispersiruemykh lateksnykh poroshkov na kinetiku zatverdevaniya tsementno-peschanykh kompozitov [Study of the influence of redispersible latex powders on the hardening kinetics of cement-sand composites]. *Nauchny zhurnal farmatsevticheskikh, biologicheskikh i khimicheskikh nauk* [Scientific Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences], 2016, Vol. 7, № 4, P. 795–802.
24. Vipulanandan C., Liu J. Polymer coatings for concrete surfaces: testing and modeling. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 2nd ed., 2012, P. 489–511.
25. Erofeev V., Kalashnikov V., Emelyanov D., [et al.] Biologicheskaya stoykost tsementnykh kompozitov, napolnennykh dolomitovymi poroshkami [Biological resistance of cement composites filled with dolomite powders]. *Solid State Phenomena*, 2016, Vol. 871, P. 33–39.
26. Vipulanandan K., Parihar A., Issak M. Testing and modeling of composite coatings with silanes for protection of reinforced concrete in salt environment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, Vol. 8, No. 8., P. 1193–1202.
27. Erofeev V. T., Myshkin A. V., Kablov E. N., Startsev O. V., Smirnov V. F., Smirnova O. N. Stoykost polimernykh kompozitov na osnove poliefirakrilatnoy smoly v usloviyakh vlazhnogo morskogo klimata [Resistance of polymer composites based on polyester acrylate resin in humid marine climate]. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo* [Regional Architecture and Construction], 2014, № 3, P. 5–12.
28. Myshkin A. V., Erofeev V. T. Optimizatsiya sostavov poliefirakrilatnykh kompozitov [Optimization of compositions of polyester acrylate composites]. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo* [Regional Architecture and Construction], 2013, № 3, P. 56–61.
29. Kablov E. N., Erofeev V. T., Yamashkin A. A., Smirnov V. F., Yamashkin S. A. Prognozirovanie regionov biopovrezhdeniy stroitelnykh materialov [Forecasting regions of



biodeterioration of building materials]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], 2019, № 4 (52), P. 158–166.

30. Msekh M. A., Cuong N. H., Zi G., [et al.] Predicting fracture properties of clay/epoxy nanocomposites with interphase zones using a phase field model. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, Vol. 201, P. 212–226. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.08.029.

31. Pereira A. M., Gonzales M. R., Rodriguez T. A., et al. Improving the biocorrosion resistance of epoxy coating by adding Ag/Zn-substituted zeolite. *Surface and Coatings Technology*, 2015, Vol. 270, P. 106–116.

32. Ammosova O. A., Babenko F. I., Blaznov A. N., [et al.] *Klimaticheskie ispytaniya stroitelnykh materialov: monografiya* [Climatic testing of building materials: monograph]. pod obshch. red. O. V. Startseva, V. T. Erofeeva, V. P. Selyaeva. Moscow, ASV, 2017, 558 p.

33. Pazoki M., Abdoli M. A., Gasemzade R., et al. Sravnitel'naya otsenka poliuretana i polivinilkhlorida pri oblitsovke betonnykh kanalizatsionnykh trub dlya predotvrashcheniya biologicheskoy korrozii [Comparative evaluation of polyurethane and polyvinyl chloride in lining concrete sewer pipes to prevent biological corrosion]. *International Journal of Environmental Research*, 2016, Vol. 10, № 2, P. 305–312.

34. Erofeev V. T., Svetlov D. A., Kaznacheev S. V., [et al.] *Protivodeystvie biopovrezhdeniyam na etapakh stroitelstva, ekspluatatsii i remonta v zhilykh i proizvodstvennykh pomeshcheniyakh* [Counteracting biodeterioration during construction, operation and repair in residential and industrial premises]: uchebnoe posobie. pod obshch. red. V. T. Erofeeva. Saransk, Izdatelstvo Mordovskogo universiteta, 2017, 172 p.

35. Bazhanova M. E., Erofeev V. T., Bobryshev A. N. Issledovanie stoykosti polimernykh i metallopolimernykh truboprovodnykh materialov v usloviyakh vozdeystviya pochvennykh mikroorganizmov [Study of resistance of polymer and metal-polymer pipeline materials under the influence of soil microorganisms]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [News of South-West State University], 2011, № 5-2 (38), P. 415–421.

36. Erofeev V. T., Smirnov V. F., Myshkin A. V. Izuchenie vidovogo sostava mikoflory, otobrannykh obraztsov poverkhnosti kompozitov dlya polyarnoy polimerizatsii vo vlazhnom morskoy klimate [Study of the species composition of mycobiota isolated from the surface of composites for polar polymerization in a humid marine climate]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698, P. 1–6.

37. Erofeev V. T., Morozov E. A. Modelirovanie biologicheskoy degradatsii [Modeling of biological degradation]. *Biotehnologiya i ekologiya bolshikh gorodov* [Biotechnology and Ecology of Big Cities], 2011, P. 29–36.

38. Amiri H., Mohammadi I., Afshar A. Electrophoretic deposition of nano-zirconia coating on AZ91D magnesium alloy for biocorrosion control. *Surface and Coatings Technology*, 2017, Vol. 16, Vol. 311, P. 182–190.

39. Erofeev V. T., Smirnov V. F., Dergunova A. V., Bogatov A. D., Letkina N. V. Razrabotka i issledovanie metodov povysheniya biosovmestimosti stroitelnykh materialov [Development and research of methods for improving the biocompatibility of building materials]. *Materials Science Forum*, 2020, Vol. 974, P. 305–311.

40. Thiagarajan K., Kodagoda S. Intelligent monitoring of surface temperature and moisture content using multi-sensor data fusion. *Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, CIS 2015 and Robotics, Automation and Mechatronics, RAM 2015*, 2015, P. 207–212.

41. Erofeev V. T., Yelchishcheva T. F., Makarchuk M. V. Epoksidny kompozit s uglerodnymi strukturami v additivnoy tekhnologii proizvodstva izdeliy dlya tekstilnoy promyshlennosti [Epoxy composite with carbon structures in additive manufacturing of products for the textile industry]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti* [News of Higher Educational Institutions. Technology of Textile Industry], 2022, № 2 (398), P. 346–354.



42. Erofeev V. T., Bogatov A. D., Kondakova I. E., Ivlev V. I., Yudin V. A., Afonin V. V. Epoksidnye kompozity, modifitsirovannyye kamennougolnoy smoloy [Epoxy composites modified with coal tar]. *Nanotekhnologii v stroitelstve* [Nanotechnologies in Construction], 2024, № 16 (6), P. 533–548.
43. Accige R. S., Vitanage D., Bustamante H., [et al.] Effect of moisture on the adhesion properties of epoxy resin to concrete. *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Fiber-Reinforced Polymer in Structures, APFIS 2013*, P. 1–6.
44. Bobryshev A. N., Erofeev V. T., Kozomazov V. N. Polimernye kompozitsionnye materialy [Polymer composite materials]: uchebnoe posobie. Moscow, ASV, 2013, 480 p.
45. Ma P.-C., Mo S.-Y., Tang B.-Z., Kim J.-K. Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites. *Carbon*, 2010, Vol. 48, No. 6, P. 1824–1834.
46. Qiao R., Brinson L. C. Simulation of interphase percolation and gradients in polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2009, Vol. 69, No. 3-4, P. 491–499. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.11.021.
47. Awasthi A. P., Lagoudas D. C., Hammerand D. C. Modeling of mechanical behavior of graphene/polymer interface using molecular dynamics. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2009, Vol. 17, No. 1, Art. 015002. DOI: 10.1088/0965-0393/17/1/015002.
48. Hamming L. M., Qiao R., Messersmith P. B., Brinson L. C. Effects of dispersion and interfacial modification on the macroscale properties of TiO₂ polymer–matrix nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2009, Vol. 69, No. 11-12, P. 1880–1886. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.04.007.
49. Yang S., Yu S., Keng W., [et al.] Multiscale modeling of size-dependent elastic properties of carbon nanotube/polymer nanocomposites with interfacial imperfections. *Polymer*, 2012, Vol. 53, No. 2, P. 416–425.
50. Ilyina V., Strokova V., Erofeev V., Stepina I. Razrabotka fotoreaktivnoy akrilovo-alkidnoy kompozitsii s biotsidnoy dobavkoy dlya zashchitnogo pokrytiya drevesiny [Development of a photoreactive acrylic-alkyd composition with a biocidal additive for protective coating of wood]. *Architecture and Engineering*, 2024, Vol. 9, № 3, P. 53–62.
51. Loos M. *Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology*. Elsevier, 2014, 304 p.
52. Balatkhanova E., Erofeeva I., Afonin V. Regressionnaya otsenka modeli na osnove matritsy eksperimentalnogo planirovaniya v zadachakh analiza kompozitnykh materialov [Regression estimation of a model based on an experimental design matrix in problems of composite material analysis]. *E3S Web of Conferences*, 2021, Vol. 281, Art. 03015.

© В. Т. Ерофеев, Н. В. Черушова, Салман Давуд Салман Аль Дулайми, Д. А. Светлов, Е. А. Митина, И. В. Сергеева, А. Г. Соколова, К. А. Черушов, Н. А. Полежаев, А. А. Мартынов, 2026

Получено: 29.07.2026 г.