

УДК 691.175:625.8

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

¹Ерофеев В.Т., ¹Смирнов И.В., ²Воронов П.В., ¹Афонин В.В., ³Каблов Е.Н.,
³Старцев О.В., ³Старцев В.О., ³Медведев И.М.

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева», Саранск, e-mail: mila55510@yandex.ru;

²ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры
и строительства», Пенза;

³ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов» ГНЦ РФ, Москва

Настоящая статья посвящена изучению влияния агрессивных сред на полимерные покрытия, наносимые на поверхность железобетонных изделий. Проведены исследования по выявлению влияния пигментов и наполнителей на стойкость образцов из эпоксидных композитов после выдерживания в условиях климатического старения. Стойкость полимерных покрытий оценивалась по изменению показателей твердости, ударной прочности и цветостойкости. Твердость на поверхности образцов определялась инструментальным индентированием. С применением современной испытательной и компьютерной техники исследована стойкость полимерных покрытий на основе эпоксидных связующих в условиях воздействия ультрафиолетового облучения, переменной влажности и солевого тумана, при экспозиции образцов на Черноморском побережье. Получены количественные зависимости стойкости эпоксидных композитов от вида отвердителя (полиэтиленполиамин и АФ-2), наполнителя (портландцемент и строительный гипс) и пигмента (желтый, оранжевый и зеленый) по показателям твердости, модуля упругости, ударной прочности и цвета. Выявлены лакокрасочные и тонкозернистые составы с улучшенными показателями твердости, ударной прочности, цветостойкости и требуемой деформативности.

Ключевые слова: полимерные композиты, ударная прочность, модуль упругости, твердость вдавливания, средняя яркость

THE STUDY OF STABILITY OF POLYMERIC COATINGS IN TERMS OF EXPOSURING CLIMATIC FACTORS OF THE BLACK SEA COAST

¹Erofeev V.T., ¹Smirnov I.V., ²Voronov P.V., ¹Afonin V.V., ³Kablov E.N.,
³Startsev O.V., ³Startsev V.O., ³Medvedev I.M.

¹National Research Mordovian State University N.P. Ogarev», Saransk, e-mail: mila55510@yandex.ru;

²Penza State University of Architecture and Construction, Penza;

³All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials GNC RF, Moscow

This article is devoted to the study of the influence of aggressive environment on polymer coating deposited on the surface of concrete products. Conducted research on the effects of pigments and fillers on the resistance of samples made of epoxy composites after aging climatic aging. The durability of the polymer coatings was assessed by changes in performance of hardness, impact strength and color stability. The hardness on the surface of the samples was determined by instrumental indentation. With the use of modern testing and computer technology are investigated stand is a bone polymer coatings based on epoxy binder in conditions of exposure to ultraviolet radiation, variable humidity and salt fog exposure of the samples on the black sea coast. The quantitative dependence of the resistance of epoxy composites on the type of hardener (polyethylene polyamine and AF-2), filler (cement and plaster) and pigment (yellow, orange and green) on the hardness, elastic modulus, impact strength and color. Revealed paint and fine-grained compositions with improved toughness, impact resistance, color stability and the desired deformability.

Keywords: polymer composites, impact strength, modulus of elasticity, hardness, average brightness

Одним из эффективных способов повышения долговечности строительных конструкций зданий и сооружений является их антикоррозионная защита с помощью полимерных покрытий, в качестве которых применяются лакокрасочные материалы (ЛКМ) на основе различных синтетических смол. Наибольшее применение в качестве вяжущих ЛКМ находят эпоксидные смолы.

Полимерные покрытия, наносимые по бетонным и металлическим поверхностям, во время эксплуатации очень часто подвергаются негативному воздействию жидких агрессивных сред, повышенных температур и других агрессивных факторов [1–9, 16, 17]. В результате воздействия агрессивных сред у полимерных покрытий, наряду с ухудшением свойств самого материала,

снижается адгезионная прочность, а также изменяются декоративные свойства. Это, с одной стороны, обуславливается частичным разрушением физических связей, вклад которых в деформационно-прочностные свойства полимеров весьма существенен, а с другой – выпотеванием и обесцвечиванием отдельных компонентов ЛКМ.

Для улучшения декоративных свойств полимерные покрытия окрашивают различными органическими и неорганическими пигментами, а для повышения их физико-механических свойств и снижения их стоимости в составы ЛКМ добавляют наполнители.

Защитные покрытия должны обладать требуемыми декоративными свойствами, которые должны сохраняться в процессе их эксплуатации. Основными видами старения покрытий вследствие ухудшения декоративных свойств являются: изменение цвета, потеря блеска, появление на поверхности пленки белесоватости.

В настоящее время физико-механические свойства и долговечность эпоксидных защитных покрытий декоративного назначения исследованы недостаточно полно. В литературе не приводятся сравнительные исследования свойств эпоксидных композитов, отверждаемых полиэтиленполиамином и аминифенольным отвердителем, окрашенных и наполненных различными пигментами и наполнителями.

Цель настоящих исследований заключалась в установлении влияния пигментов

и наполнителей на стойкость образцов из эпоксидных композитов после выдерживания в условиях климатического старения. Эта задача решалась за счет применения современной испытательной и компьютерной техники.

Стойкость полимерных покрытий оценивалась по изменению показателей твердости, ударной прочности и цветостойкости. Твердость на поверхности образцов определялась инструментальным индентированием. Данная методика разработана сотрудниками ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова [10]. При инструментальном индентировании происходит непрерывное внедрение наконечника в испытуемый образец под действием плавно возрастающей нагрузки с последующим ее снятием и регистрацией зависимости перемещения наконечника от нагрузки. Прослеживая полный цикл нагружения и снятия испытательной нагрузки, определялись значения твердости. При исследовании ударной прочности материалов использовался метод ASTM D 7136 [11]. Для нанесения удара применяли вертикальный копер фирмы Coesfeld, оснащенный полусферическим бойком массой 2,3 кг с диаметром наконечника 10 мм. Высота падения ударного бойка составляла 50 мм. Датчик скорости движения бойка был установлен на расстоянии от 3 до 6 мм над поверхностью образца. Для предотвращения повторного соприкосновения ударника с образцом копер оснащен системой антиотскока.



Рис. 1. Модельная кривая зависимости силы ударника от времени

В процессе испытаний фиксировались глубина отпечатка, размеры и площадь зоны повреждения $F_1, F_{max}, E_1, E_{max}$. Энергию удара E_p , Дж, определяли по формуле

$$E_i = C_E \cdot h, \quad (1)$$

где $C_E = 6,7$ – коэффициент нормирования энергии удара на толщину образца, Дж/мм; h – толщина образца, мм.

В момент удара регистрировалась зависимость контактной силы от времени. Пример такой зависимости приведен на рис. 1.

Из зависимости контактной силы от времени была определена величина импульса ударника J , при котором происходило разрушение образца:

$$J = F_{max} \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где F_{max} – максимальная сила, зафиксированная в процессе разрушения образца,

$$Bright = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (0,299 \cdot Red_j + 0,587 \cdot Green_j + 0,114 \cdot Blue_j), \quad (3)$$

где $Red, Green, Blue$ – составляющие кода RGB, N – число пикселей изображения.

Практически, составляющие красного, зеленого и синего берутся для каждого пикселя изображения. При этом предполагается, что геометрические размеры испытуемых образцов имеют одинаковые размеры. Нередко на практике образцы для различных испытаний вырезают из одной пластины. Поэтому возможны расхождения в геометрических, и, следовательно, размерах отсканированных изображений. В наших исследованиях была предусмотрена операция приведения размеров образцов к одному наименьшему размеру. В частности, язык программирования C# на платформе .NET позволяет это сделать без ущерба качества изображения. Возможные малые погрешности рассматриваются в специальных руководствах и здесь не рассматриваются. Во всяком случае, можно отметить, что средние значения кодов RGB имеют отличия в 10–12 знаке после десятичной точки относительно своего исходного размера. Приведение к одному размеру можно осуществлять на основе обрезки изображений. Но в таком случае возможна потеря информации о свойствах на краях образцов. Это еще один довод в пользу программного изменения размеров изображений образцов с сохранением их свойств, в частности средней яркости. Средняя яркость, рассчитанная по приведенной формуле, учитывает особенности

τ – продолжительность контакта ударника с образцом.

При исследовании цветостойкости использована цветовая модель RGB (Red – красный, Green – зеленый, Blue – синий). Данная модель имеет широкое применение как в компьютерных программных средах (например, MATLAB, Visual C#), так и в различных прикладных исследованиях [12–15], в которых использовалась средняя яркость отдельных составляющих кодов RGB, их изменение по горизонтальному и вертикальному размерам изображений исследуемых образцов.

В данной работе за оценку качества цветовой поверхности принята средняя яркость поверхности отсканированных изображений образцов. Яркость (Bright) изображения рассчитывается по следующей формуле:

световосприятия человеческого зрения – чувствительность человеческого глаза к различным частям спектра.

Составы композиций, принятые для исследований, отличались процентным содержанием в них вяжущего, отвердителей (полиэтиленполиамин и аминофенольный отвердитель), наполнителей (портландцемент и строительный гипс) и пигментов – зеленый (глауконитовый), желтый (железнокислый), оранжевый (свинцовый крон). Образцы изготавливались в виде круглой пластины, диаметром 170 мм и толщиной 10 мм. Составы образцов приведены в табл. 1.

Показатели физико-механических свойств и яркости исследуемых полимерных композитов приведены в табл. 2.

Сравнение полученных результатов показывает следующее. Существует различие показателей в зависимости от используемых компонентов – у композиций с АФ-2 выше модуль упругости и яркость, но твердость и ударная прочность выше у составов, отвержденных ПЭПА. Модуль упругости и твердость выше у состава, наполненного портландцементом, в то же время яркость и ударная прочность больше у материалов, содержащих в качестве наполнителя строительный гипс. Интересные результаты получены при исследовании физико-механических показателей пигментированных составов. Среди сравниваемых материалов более высокие показатели характерны для

составов с оранжевым пигментом, а более низкие показатели – с желтым. В то же время сравнение показателей яркости свидетельствует о более высоких их значениях для составов с желтым пигментом.

Различные добавки приводят к различной средней яркости исследуемых образцов (табл. 2). Это дает основание предположить определенную корреляционную связь как между типом добавки, такими показателями, как модуль упругости и твердость вдавливания, с одной стороны, так и определенной зависимости между ними и средней яркостью образцов.

Результаты сканирования контрольных образцов приведены на рис. 2.

Изменения средней яркости контрольных образцов показаны на рис. 3, рис. 4.

На рис. 3, рис. 4 нумерация кривых соответствует табл. 2, в которой испытуемый

образец ЭД-20 + АФ-2 кодируется как первый образец.

Образцы испытывались после выдерживания в условиях воздействия ультрафиолетового облучения, переменной влажности и солевого тумана (открытая площадка), повышенной влажности и солевого тумана (под навесом) Черноморского побережья как и в [16, 17]. После испытания образцов, выдержанных в условиях воздействия агрессивных сред получены значения коэффициентов стойкости. Показатели образцов, выдержанных в агрессивных средах, сравнивались с показателями контрольных образцов, хранившихся в помещении испытательной лаборатории. Коэффициенты стойкости образцов, рассчитанные по показателям твердости, модуля упругости, ударной прочности и яркости, приведены в табл. 3.

Таблица 1

Исследуемые составы

№ п/п	Компоненты	Содержание массовых частей в составах						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Эпоксидная смола	100	100	100	100	100	100	100
2	Полиэтиленполиамин	10	–	–	–	–	–	–
3	Аминофенольный отвердитель	–	10	10	10	10	10	10
4	Портландцемент	–	–	100	–	–	–	–
5	Строительный гипс	–	–	–	100	–	–	–
6	Зеленый пигмент (глауконитовый)	–	–	–	–	2	–	–
7	Желтый пигмент (железоокислый)	–	–	–	–	–	2	–
8	Оранжевый пигмент (свинцовый крон)	–	–	–	–	–	–	2

Таблица 2

Результаты исследований контрольных образцов

Условия выдерживания образцов	Состав	Е, МПа		Н, МПа		Максимальная контактная сила при ударе бойка, Н	Среднее значение яркости образца
		Модуль упругости	Станд. откл.	Твердость вдавливания	Станд. откл.		
Образцы, выдержанные в помещении лаборатории	ЭД-20 + ПЭПА	6,18	0,84	399	8,5	3326	67,83
	ЭД-20 + АФ-2	7,76	0,75	210,6	19,6	2688	83,68
	ЭД-20 + АФ-2 + + строительный гипс	6,72	0,86	377,6	11,6	5395	122,77
	ЭД-20 + АФ-2 + + портландцемент	10,16	0,72	462,6	3,57	3855	61,09
	ЭД-20 + АФ-2 + + зеленый пигмент	6,35	0,86	401,3	9,24	2599	61,23
	ЭД-20 + АФ-2 + + оранжевый пигмент	7,02	0,79	419,5	12,46	3695	71,04
	ЭД-20 + АФ-2 + + желтый пигмент	3,87	0,76	371,9	11,7	2920	100,47

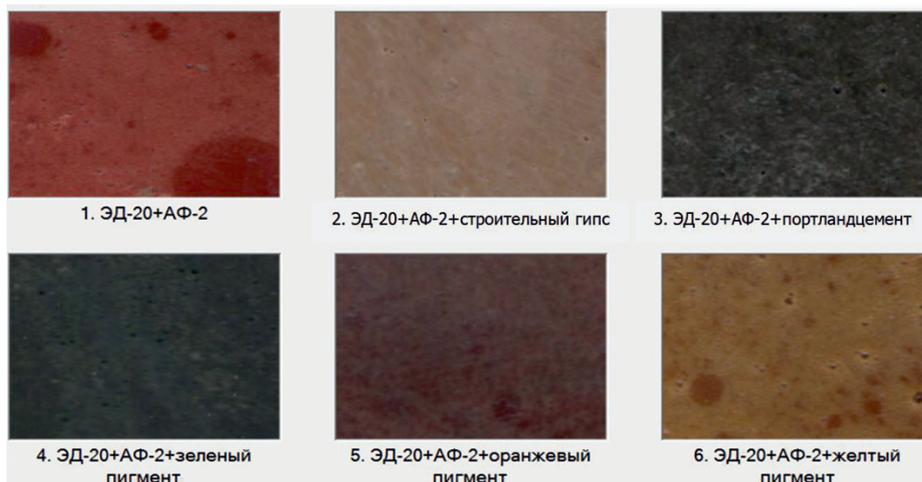


Рис. 2. Изображения поверхности контрольных образцов

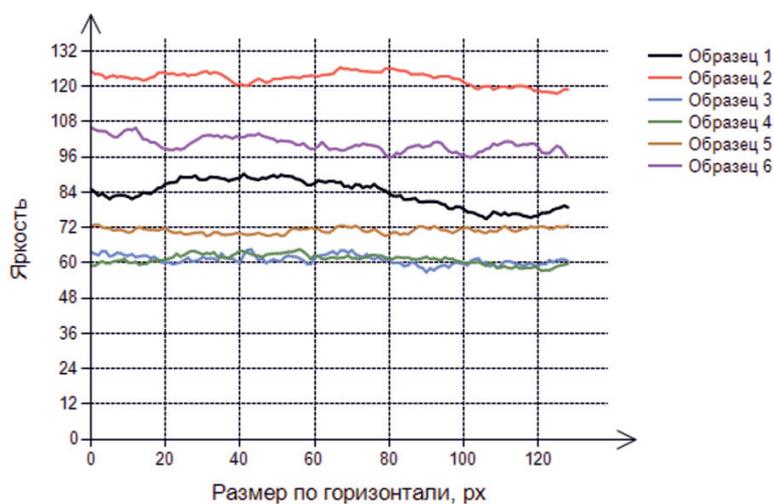


Рис. 3. Средняя яркость контрольных образцов по ширине

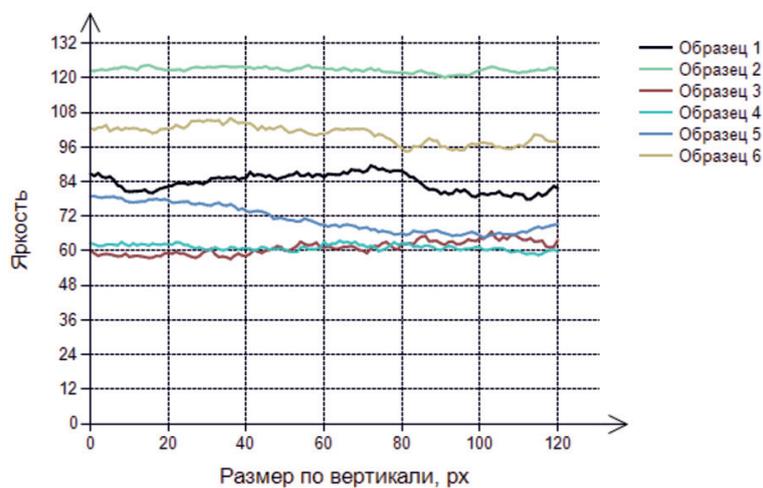


Рис. 4. Средняя яркость контрольных образцов по высоте

Таблица 3

Коэффициенты стойкости исследуемых образцов

№ п/п	Состав образца	Относительные значения к контрольным образцам							
		Показатели образцов, выдержанных на открытой площадке				Показатели образцов, выдержанных под навесом			
		Модуль упругости	Твердость вдавливания	Максимальная контактная сила	Среднее значение яркости	Модуль упругости	Твердость вдавливания	Максимальная контактная сила	Среднее значение яркости
1	ЭД-20 + ПЭПА	0,932	0,967	0,638	0,876	0,940	0,874	0,875	0,786
2	ЭД-20 + АФ-2	0,958	0,935	0,729	0,837	0,781	0,986	0,882	0,803
3	ЭД-20 + АФ-2 + строительный гипс	0,946	0,960	0,664	0,902	0,924	0,889	0,868	0,898
4	ЭД-20 + АФ-2 + порг-ландцемент	0,963	0,933	0,712	1,045	0,628	0,844	0,880	1,023
5	ЭД-20 + АФ-2 + зеленый пигмент	0,946	0,960	0,768	0,984	0,940	0,941	0,788	0,923
6	ЭД-20 + АФ-2 + оранжевый пигмент	0,978	0,954	0,769	0,915	0,700	0,823	0,809	1,042
7	ЭД-20 + АФ-2 + желтый пигмент	0,943	0,919	0,869	0,773	0,994	0,925	0,902	0,924

Из анализа результатов исследования (табл. 3) можно выделить следующие результаты. После выдерживания образцов всех рассмотренных составов, как на открытой площадке, так и под навесом происходит уменьшение показателей модуля упругости, твердости и яркости на поверхности образцов, а также ударной прочности материалов. Значения коэффициентов стойкости при этом различаются в зависимости от состава лакокрасочных материалов и условий испытания.

Так, сравнение составов, отвержденных полиэтиленполиамином и аминифенольным отвердителем, показывает, что модуль упругости образцов, выдержанных на открытой площадке с ПЭПА ниже, а под навесом, наоборот, в большей степени понизился показатель у материалов, отвержденных АФ-2. Ударная же прочность материалов понизилась в меньшей степени с АФ-2, чем ПЭПА, при обоих условиях экспозиции образцов.

Рассмотрение зависимостей изменения исследуемых показателей у составов с тремя видами пигментов показывает также различие их поведения при выдерживании в условиях климатических воздействий различного типа. При общем характере снижения модуля упругости всех составов из результатов видно, что по стойкости в условиях открытой площадки композиты в зависимости от типа пигмента по убыва-

нию располагаются в следующем порядке – оранжевый, зеленый, желтый, а в случае экспозиции образцов под навесом другое расположение – желтый, зеленый, оранжевый. Для ударной прочности получен следующий порядок расположения пигментов по влиянию на исследуемые показатели: желтый, оранжевый, зеленый при обоих условиях экспозиции образцов. Данные результаты объясняют различную стойкость декоративных составов в зависимости от природы пигмента в средах с различными комплексами воздействий.

Требуется тщательного анализа механизма поведения составов, наполненных строительным гипсом и порг-ландцементом. Из результатов исследования следует, что у составов, наполненных порг-ландцементом, падение показателя твердости является более значительным. Падение модуля упругости при выдерживании под навесом также больше у составов в случае их наполнения порг-ландцементом. Ударная прочность образцов в меньшей степени понизилась у композитов, наполненных порг-ландцементом. Изменение средней яркости у составов с порг-ландцементом изменилось в сторону увеличения под навесом и на открытой площадке, что, возможно, объясняется как выравниванием поверхности с течением времени, так и ее осветлением.



Рис. 5. Средняя яркость по ширине образца ЭД-20 + АФ-2

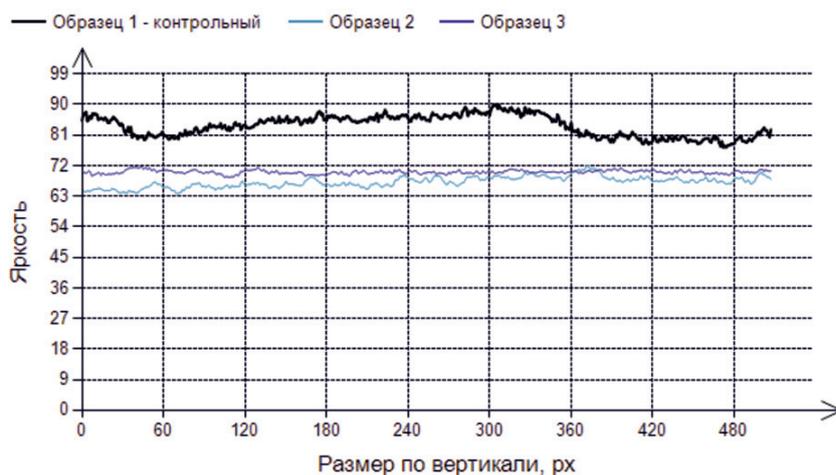


Рис. 6. Средняя яркость по высоте образца ЭД-20 + АФ-2



Рис. 7. Средняя яркость по ширине образца ЭД-20 + АФ-2 + портландцемент



Рис. 8. Средняя яркость по высоте образца ЭД-20 + АФ-2 + портландцемент

Анализ показателя средней яркости исследуемых образцов базируется на подходе, примененном в работах [12–15]. Среднее арифметическое значение яркости может изменяться как по горизонтальному размеру образцов, так и по его вертикали, что влечет за собой определенные отклонения, возможно от желаемого цвета поверхности. При этом дополнительное усреднение каждой кривой даст среднюю яркость по всем пикселям данного изображения. Некоторые примеры изменения средней яркости приведены на рис. 5–8.

На рис. 5–8 график средней яркости контрольного образца – это образец, хранившийся в исследовательской лаборатории архитектурно-строительного факультета Национального исследовательского Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарёва.

Образец 2 – отсканированный образец, выдержанный в течение 24 месяцев под навесом на Черноморском побережье. Образец 3 – отсканированный образец, выдержанный также в течение 24 месяцев на открытой площадке Черноморского побережья. Цвета кривых на диаграммах взяты условно для отличия от кривой средней яркости контрольного образца.

Разработанная программа позволяет в автоматизированном режиме получать значения средней яркости для образцов, выбираемых пользователем.

Имеются аналогичные диаграммы для всех типов образцов, приведенные в табл. 2.

Сравнительные показатели образцов из табл. 3 представлены на рис. 9–12, которые сравнивают между собой коэффициенты стойкости, модули упругости, твердости вдавливания, максимальной контактной силы, средней яркости в относительных единицах

в зависимости от номера состава образцов. Эти результаты испытаний получены для образцов, выдержанных на открытой площадке и под навесом Черноморского побережья.

Проверим предположение, что между данными в таблице относительных коэффициентов стойкости (табл. 3) существует корреляционная связь. В связи с этим рассчитаем множественные коэффициенты корреляции при линейной регрессионной зависимости между переменными – показателями образцов. Для этого сведем в табл. 4 показатели образцов, выдержанные на открытой площадке и под навесом, матрицу регрессоров, информационную матрицу и значения средней яркости, принятого в качестве функции отклика или исследуемого показателя.

В матрицу регрессоров заложены значения показателей образцов с различной рецептурой (см. табл. 3, табл. 4). Для расчета коэффициентов множественной регрессионной модели принято следующее нормальное уравнение [18]:

$$(X^T \cdot X) \cdot B = X^T \cdot Y, \quad (4)$$

где T – символ транспонирования, Y – исследуемый показатель (например, средняя яркость).

Если модель наблюдений (матрица X) полного ранга, то решение нормального уравнения можно осуществить методом Гаусса. В противном случае приходится применять псевдообращение Мура – Пенроуза [19], т.е. разрешить нормальное уравнение, умножив его на псевдообратную матрицу Мура – Пенроуза:

$$B = (X^T \cdot X)^{-} \cdot X^T \cdot Y, \quad (5)$$

где символ « \rightarrow » означает псевдообращение Мура – Пенроуза.

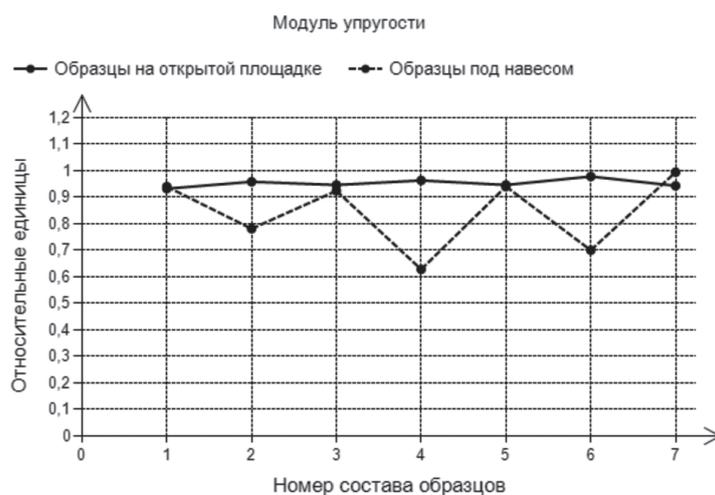


Рис. 9. Сравнение модулей упругости

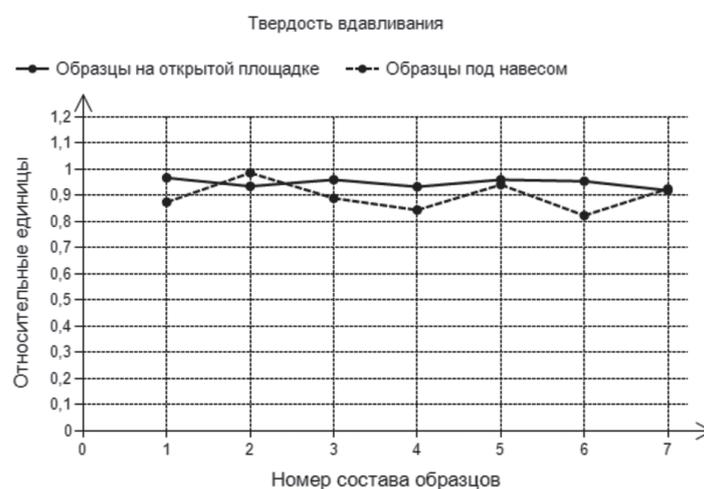


Рис. 10. Сравнение твердости вдавливания

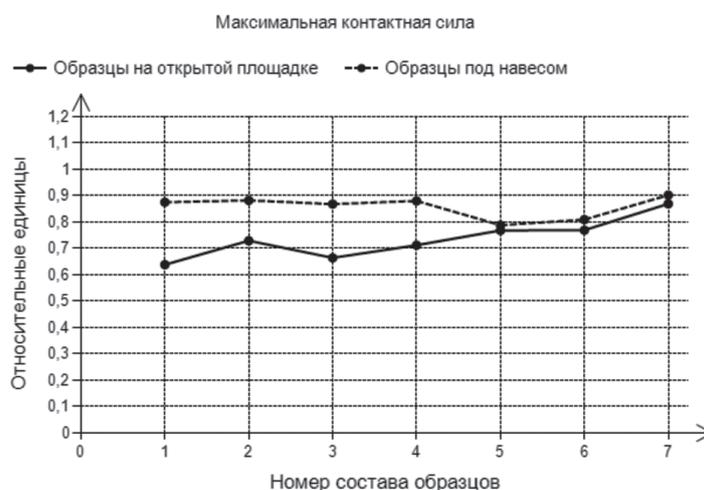


Рис. 11. Сравнение максимальной контактной силы

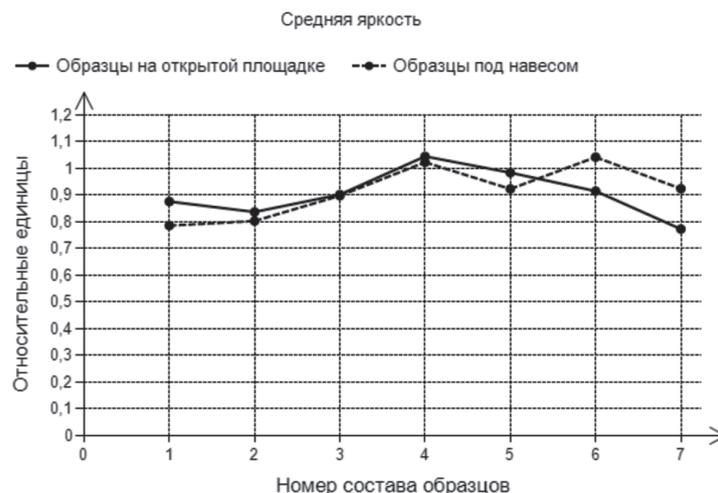


Рис. 12. Сравнение средней яркости

Таблица 4

Расчет схемы уравнения регрессии между показателями образцов

Показатели образцов, выдержанные на открытой площадке и под навесом			Значения матрицы регрессоров X	Средняя яркость, значения функции отклика, исследуемого показателя Y
Модуль упругости	Твердость вдавливания	Максимальная контактная сила		
0,9320	0,9670	0,6380	1,0000 0,9320 0,9670 0,6380	0,8760
0,9580	0,9350	0,7290	1,0000 0,9580 0,9350 0,7290	0,8370
0,9460	0,9600	0,6640	1,0000 0,9460 0,9600 0,6640	0,9020
0,9630	0,9330	0,7120	1,0000 0,9630 0,9330 0,7120	1,0450
0,9460	0,9600	0,7680	1,0000 0,9460 0,9600 0,7680	0,9840
0,9780	0,9540	0,7690	1,0000 0,9780 0,9540 0,7690	0,9150
0,9430	0,9190	0,8690	1,0000 0,9430 0,9190 0,8690	0,7730
0,9400	0,8740	0,8750	1,0000 0,9400 0,8740 0,8750	0,7860
0,7810	0,9860	0,8820	1,0000 0,7810 0,9860 0,8820	0,8030
0,9240	0,8890	0,8680	1,0000 0,9240 0,8890 0,8680	0,8980
0,6280	0,8440	0,8800	1,0000 0,6280 0,8440 0,8800	1,0230
0,9400	0,9410	0,7880	1,0000 0,9400 0,9410 0,7880	0,9230
0,7000	0,8230	0,8090	1,0000 0,7000 0,8230 0,8090	1,0420
0,9940	0,9250	0,9020	1,0000 0,9940 0,9250 0,9020	0,9240
Информационная матрица X ^T ·X				Коэффициенты уравнения регрессии
14,0000	12,5730	12,9100	11,1530	2,1926
12,5730	11,4527	11,6346	9,9745	-0,2282
12,9100	11,6346	11,9348	10,2603	-0,7523
11,1530	9,9745	10,2603	8,9831	-0,4828

Когда регрессионная модель создана, то можно вычислить аппроксимирующую кривую и рассчитать остаточную дисперсию $D_{\text{оцн}}$ относительно тех же точек, которыми определена, например, средняя яркость. Обозначим выборочную дисперсию исследуемого показателя через D . Тогда множественный коэффициент корреляции (R) можно рассчитать по следующей формуле [19]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{D_{\text{оцн}}}{D}} \quad (6)$$

Проведенные расчеты сведены в табл. 5. Как видно из приведенных расчетов, имеется достаточно высокая корреляционная связь между показателями образцов, выдержанных на открытой площадке и под навесом.

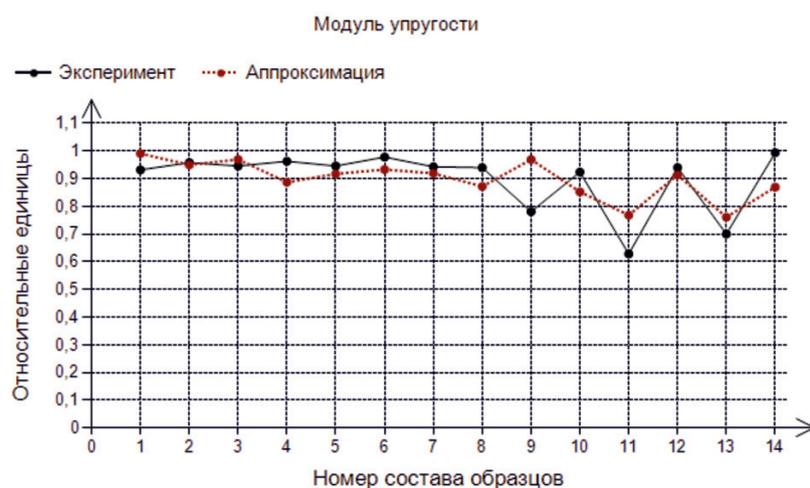


Рис. 13. Аппроксимация показателя «Модуль упругости»

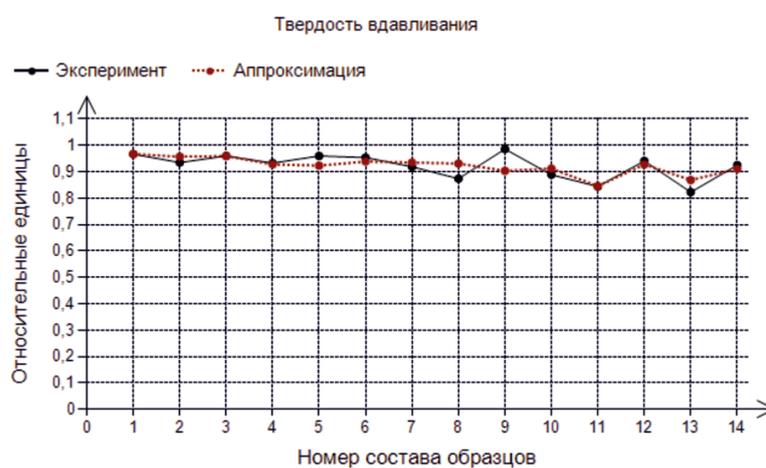


Рис. 14. Аппроксимация показателя «Твердость вдавливания»



Рис. 15. Аппроксимация показателя «Максимальная контактная сила»



Рис. 16. Аппроксимация показателя «Средняя яркость»

Таблица 5

Коэффициенты линейной регрессионной модели

№ п/п	Свойства	Значения коэффициентов регрессионной модели				Значения множественных коэффициентов корреляции
		b_0	b_1	b_2	b_3	
1	Модуль упругости	0,5255	0,9335	-0,2550	-0,3135	$K_1 = 0,7798$
2	Твердость вдавливания	1,1123	0,1470	-0,2186	-0,1627	$K_2 = 0,7176$
3	Максимальная контактная сила	2,1297	-0,1609	-0,8761	-0,4186	$K_3 = 0,7940$
4	Средняя яркость	2,1926	-0,2282	-0,7523	-0,4828	$K_4 = 0,8183$

Для наглядности приведем сравнительные диаграммы табличных данных и аппроксимирующих функций (рис. 13–16).

Приведенные диаграммы аппроксимации построены на основе рассчитанных коэффициентов уравнений регрессии. Например, аппроксимирующая кривая средней яркости (Y) будет определяться уравнением

$$\begin{aligned}
 Y &= b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 = \\
 &= 2,1926 - 0,2282 \cdot X_1 - \\
 &- 0,7523 \cdot X_2 - 0,4828 \cdot X_3, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где Y – вектор значений средней яркости, – векторы значений модуля упругости, твердости вдавливания, максимальной контактной силы, взятые из табл. 3.

Дисперсия значений исследуемого показателя (например, средней яркости) будет определять собой остаточную дисперсию, которая входит в формулу множественного коэффициента корреляции.

Проведенный анализ показывает достаточно высокую корреляционную зависи-

мость между показателями образцов, которые выдерживались на открытой площадке и под навесом Черноморского побережья. Как и предполагалось, средняя яркость более существенно зависит от показателей модуля упругости, твердости вдавливания, максимальной контактной силы.

Выводы

1. С применением современной испытательной и компьютерной техники исследована стойкость полимерных покрытий на основе эпоксидных связующих в условиях воздействия ультрафиолетового облучения, переменной влажности и солевого тумана, при экспозиции образцов на Черноморском побережье.

2. Предложен метод оценки декоративных свойств с помощью разработанной программы на языке C# в среде разработки Microsoft Visual Studio 2015. Пиксельная обработка изображений отсканированных образцов с целью получения массивов средней яркости проводилась на основе небезопасного кода (unsafe) с помощью указателей

с использованием библиотечных классов Bitmap, BitmapData, их методов и свойств.

3. Получены количественные зависимости стойкости эпоксидных композитов от вида отвердителя (полиэтиленполиамин и АФ-2), наполнителя (портландцемент и строительный гипс) и пигмента (желтый, оранжевый и зеленый) по показателям твердости, модуля упругости, ударной прочности и цвета. Выявлены лакокрасочные и тонкозернистые составы с улучшенными показателями твердости, ударной прочности, цветостойкости и требуемой деформативности.

4. Выполнен корреляционный анализ взаимосвязи относительной стойкости полученных результатов по различным видам испытаний и найдены аппроксимирующие функции. Установлена достаточно высокая корреляционная связь между показателями образцов, выдержанных в условиях ультрафиолетового облучения, переменной влажности, солевого тумана (открытая площадка морского побережья) и повышенной влажности, солевого тумана (воздушные условия «под навесом» морского побережья).

5. Эпоксидные композиты, составленные с применением вышеуказанных компонентов, обладают повышенными показателями физико-химического сопротивления и могут быть использованы в качестве защитных покрытий по строительным конструкциям, клеевых составов и в качестве связующих для полимербетонов.

Список литературы

1. Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Светлов Д.А., Казначеев С.В., Богатов А.Д., Морозов Е.А., Васильев О.Д., Макаревич Ю.М., Спиринов В.А., Пацюк Н.А. Защита зданий и сооружений от микробиологических повреждений биоцидными препаратами на основе гуанидина. – Санкт-Петербург: Изд-во «Наука», 2009. – 192 с.
2. Ерофеев В.Т., Твердохлебов Д.А. Фурфуролацетонные композиты каркасной структуры [Текст] / Д.А. Твердохлебов, К.В. Тармосин, А.Д. Богатов, В.В. Леснов, А.А. Конишин, С.В. Казначеев. – Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2008. – 220 с.
3. Богатова С.Н., Богатов А.Д., Ерофеев В.Т., Казначеев С.В., Захарова Е.А. Исследование биологической стойкости эпоксидных покрытий. Лакокрасочные материалы и их применение. – 2011. – № 3. – С. 42–45.
4. Касимкина М.М., Светлов Д.А., Казначеев С.В., Богатов А.Д., Ерофеев В.Т. Эпоксидные лакокрасочные материалы с биоцидной добавкой «Гейфлекс». Лакокрасочные материалы и их применение. – 2008. – № 1–2. – С. 77–79.
5. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов (технология, свойства, долговечность). Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева; Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – Саранск, 2009. – 273 с.
6. Ерофеев В.Т., Завалишин Е.В., Богатов А.Д., Астахов А.М., Коротяев С.А., Никитин Л.В. Силикатные и полимерсиликатные композиты каркасной структуры роликового формирования. – Москва, 2009. – 160 с.

7. Бажанова М.Е., Ерофеев В.Т., Бобрышев А.Н. Исследование стойкости полимерных и металлополимерных трубопроводных материалов в условиях воздействия почвенных микроорганизмов. Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5–2 (38). – С. 415–421.

8. Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Завалишин Е.В., Смирнова О.Н. Исследование биологической стойкости лакокрасочных покрытий на основе композиций, содержащих жидкое стекло. Лакокрасочные материалы. – С. 37–39.

9. Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Ерофеев В.Т., Морозов Е.А. Защита лакокрасочных материалов и покрытий от биоповреждений // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2003. – № 9. – С. 21.

10. Медведев И.М. Методика измерения твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании // ФГУП ЦКИ «ВИАМ» им. Г.В. Акимова. – 5 с.

11. ASTM D 7136 / D 7136M-07 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. – 4 p.

12. Ерофеев В.Т., Афонин В.В., Черушова Н.В., Зоткина М.М., Митина Е.А., Зоткин В.Б., Ерофеева И.В. Методы и алгоритмы оценки качества поверхности строительных изделий и конструкций // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4–1. – С. 33–40.

13. Ерофеев В.Т., Афонин В.В., Касимкина М.М. Влияние пластификаторов на изменение цветности ЛКМ под воздействием агрессивных сред // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2011. – № 6. – С. 38–41.

14. Черушова Н.В., Митина Е.А., Касимкина М.М., Афонин В.В., Ерофеев В.Т. Оценка изменения декоративных свойств лакокрасочных материалов под воздействием эксплуатационных факторов // Вестник Мордовского университета. – 2008. – № 4. – С. 124–127.

15. Ерофеев В.Т., Черушова Н.В., Афонин В.В., Митина Е.А. Методика оценки изменения декоративных свойств лакокрасочных материалов под действием эксплуатационных факторов // Вестник отделения строительных наук РААСН: Вып. 8. – М.: Изд-во РААСН. – 2004. – С. 180–185.

16. Ерофеев В.Т., Смирнов И.В., Меркулов Д.А., Болдина И.В., Старцев О.В., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Исследование свойств бетона железобетонных конструкций при их выдерживании в условиях морского побережья // В сборнике: Эффективные строительные конструкции: теория и практика, сборник статей XVI Международной научно-технической конференции. Под редакцией Н.Н. Ласькова. – 2016. – С. 188–194.

17. Ерофеев В.Т., Смирнов И.В., Меркулов Д.А., Болдина И.В., Старцев О.В., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Исследование поведения полимерных покрытий по железобетонным конструкциям, эксплуатируемым в климатических условиях Черноморского побережья // В сборнике: Эффективные строительные конструкции: теория и практика, сборник статей XVI Международной научно-технической конференции. Под редакцией Н.Н. Ласькова. – 2016. – С. 195–201.

18. Математическая статистика: учеб. для вузов / В.Б. Горяинов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова и др.; Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2001. – 424 с.

19. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

References

1. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Svetlov D.A., Kaznacheev S.V., Bogatov A.D., Morozov E.A., Vasilev O.D., Makarevich Ju.M., Spirin V.A., Pacyuk N.A. Zashhita zdaniy i sooruzhenij ot mikrobiologicheskikh povrezhdenij biocidnymi preparatami na osnove guanidina. Sankt-Peterburg. Izd-vo «Nauka», 2009. 192 p.

2. Erofeev V.T., Tverdohlebov D.A. Furfurolacetonovye kompozity karkasnoj struktury [Tekst] / D.A. Tverdohlebov, K.V. Tarmosin, A.D. Bogatov, V.V. Lesnov, A.A. Konjashin, S.V. Kaznacheev. Saransk: Izd-vo Mordovskogo universiteta, 2008. 220 p.
3. Bogatova S.N., Bogatov A.D., Erofeev V.T., Kaznacheev S.V., Zaharova E.A. Issledovanie bio-logicheskoj stojkosti jepoksidnyh pokrytij. Lakokrasochnye materialy i ih primenenie. 2011. no. 3. pp. 42–45.
4. Kasimkina M.M., Svetlov D.A., Kaznacheev S.V., Bogatov A.D., Erofeev V.T. Jepoksidnye la-kokrasochnye materialy s biocidnoj dobavkoj «Tefleks». Lakokrasochnye materialy i ih primenenie. 2008. no. 1–2. pp. 77–79.
5. Erofeev V.T., Bazhenov Ju.M., Kalgin Ju.I. Dorozhnye bitumomineralnye materialy na osnove modifitsirovannyh bitumov (tehnologija, svojstva, dolgovechnost). Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogareva; Voronezhskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitelnyj universitet. Saransk, 2009. 273 p.
6. Erofeev V.T., Zavalishin E.V., Bogatov A.D., Astashov A.M., Korotaev S.A., Nikitin L.V. Silikatnye i polimersilikatnye kompozity karkasnoj struktury rolkovogo formovanija. Moskva, 2009. 160 p.
7. Bazhanova M.E., Erofeev V.T., Bobryshev A.N. Issledovanie stojkosti polimernyh i metallopolimernyh truboprovodnyh materialov v uslovijah vozdejstvija pochvennyh mikroorganizmov. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. no. 5–2 (38). pp. 415–421.
8. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Zavalishin E.V., Smirnova O.N. Issledovanie biologicheskoj stojkosti lakokrasochnyh pokrytij na osnove kompozicij, soderzhashhij zhidkoe steklo. La-kokrasochnye materialy. pp. 37–39.
9. Smirnov V.F., Semicheva A.S., Erofeev V.T., Morozov E.A. Zashhita lakokrasochnyh materialov i pokrytij ot biopovrezhdenij // Lakokrasochnye materialy i ih primenenie. 2003. no. 9. pp. 21.
10. Medvedev I.M. Metodika izmerenija tverdosti i drugih harakteristik materialov pri in-strumentalnom indentirovanii // FGUPGCKI «VIAM» im. G.V. Akimova. 5 p.
11. ASTM D 7136 / D 7136M-07 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. 4 p.
12. Erofeev V.T., Afonin V.V., Cherushova N.V., Zotkina M.M., Mitina E.A., Zotkin V.B., Erofeeva I.V. Metody i algoritmy ocenki kachestva poverhnosti stroitelnyh izdelij i konstrukcij // Fundamentalnye issledovanija. 2016. no. 4–1. pp. 33–40.
13. Erofeev V.T., Afonin V.V., Kasimkina M.M. Vlijanie plastifikatorov na izmenenie cvetnosti LKM pod vozdejstviem agressivnyh sred // Lakokrasochnye materialy i ih primenenie. 2011. no. 6. pp. 38–41.
14. Cherushova N.V., Mitina E.A., Kasimkina M.M., Afonin V.V., Erofeev V.T. Ocenka izmenenija dekorativnyh svojstv lakokrasochnyh materialov pod vozdejstviem jekspluatacionnyh faktorov // Vestnik Mordovskogo universiteta. 2008. no. 4. pp. 124–127.
15. Erofeev V.T., Cherushova N.V., Afonin V.V., Mitina E.A. Metodika ocenki izmenenija deko-rativnyh svojstv lakokrasochnyh materialov pod dejstviem jekspluatacionnyh faktorov // Vestnik otdelenija stroitelnyh nauk RAASN: Vyp. 8. M.: Izd-vo RAASN. 2004. pp. 180–185.
16. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Merkulov D.A., Boldina I.V., Starcev O.V., Erasov V.S., Podzhivotov N.Ju. Issledovanie svojstv betona zhelezobetonnih konstrukcij pri ih vyderzhivanii v uslovijah morskogo poberezhja // V sbornike: Jefferktivnye stroitelnye konstrukcii: teorija i praktika, sbornik statej XVI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii. Pod redakciej N.N. Laskova. 2016. pp. 188–194.
17. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Merkulov D.A., Boldina I.V., Starcev O.V., Erasov V.S., Podzhivotov N.Ju. Issledovanie povedenija polimernyh pokrytij po zhelezobetonnym konstrukcijam, jekspluatiruemyh v klimaticheskijh uslovijah Chernomorskogo poberezhja // V sbornike: Jefferktivnye stroitelnye konstrukcii: teorija i praktika, sbornik statej XVI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii. Pod redakciej N.N. Laskova. 2016. pp. 195–201.
18. Matematicheskaja statistika: ucheb. dlja vuzov / V.B. Gorjainov, I.V. Pavlov, G.M. Cvetkova i dr.; Pod red. V.S. Zarubina, A.P. Krishhenko. M.: Izd-vo MGTU imeni N.Je. Bauman, 2001. 424 p.
19. Kobzar A.I. Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov / A.I. Kobzar. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 p.