



eISSN 2311-2468
Том 6, № 9. 2018
Vol. 6, no. 9. 2018

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



КУПРИЯШКИНА Л. И., СЕЛЯЕВ В. П.,

ДОЛГОВ И. П., КИСЕЛЕВ Н. Н., НУРЛЫБАЕВ Р. Е.

**РАЗРАБОТКА ВАКУУМНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА
ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОРОШКА ЧАСТИЦ ДИАТОМИТА**

Аннотация. Проведен сравнительный анализ технических характеристик VIP-панелей. Рассмотрены вакуумные панели с различными видами наполнителей. Показаны возможности использования полученных панелей в качестве теплоизоляционного материала в ограждающих конструкциях жилых зданий.

Ключевые слова: вакуумная панель, наполнитель, теплопередача, долговечность, климатические испытания, теплопроводность, микрокремнезем, теплоизоляционный материал.

KUPRYASHKINA L. I., SELYAEV V. P.,

DOLGOV I. P., KISELEV N. N., NURLIBAEV R. E.

**DEVELOPMENT OF VACUUM PANELS BASED ON MICROSILICA
FROM NANOSTRUCTURED POWDER PARTICLES OF DIATOMITE**

Abstract. A comparative analysis of technical characteristics of VIP panels is carried out. Vacuum panels with different types of fillers are studied. The possibilities of using the panels as heat insulation material in residential building envelopes are shown.

Keywords: vacuum panel, filler, heat transfer, durability, climate testing, thermal conductivity, microsilica, heat insulation material.

В соответствии с Федеральным законом «Об энергосбережении» от 03.04.1996 г. № 28-ФЗ в современной строительной индустрии к качеству теплоизоляционных материалов предъявляются более жесткие требования. Одно из перспективных направлений – это разработка теплоизоляционных материалов нового поколения, к которым относятся вакуумные теплоизоляционные панели (VIP-панели). Использование их в качестве теплоизоляционного материала в ограждающих конструкциях жилых зданий представляется более эффективным решением, чем использование традиционного утеплителя [1–4].

Применение пенопластов и легких волокнистых материалов не позволяет снизить теплопередачу без соответствующего увеличения толщины теплоизоляции. В связи с этим в 1987 г. Ахвердовым В. М. была предложена теплоизоляция с применением вакуума. Высокий вакуум создавался между двойных жестких стенок панели, изготовленных преимущественно из металла.

Данная теплоизоляционная панель была усовершенствована: наружный слой выполнен из декоративного стекла, а внутренний – из латонита, теплоизоляционный слой – из теплоизоляционной плиты, выполненной из вакуумированного наноструктурированного порошка частиц диатомита крупностью до 0,1 мк и пористостью 95%, при этом все слои соединены полиуретановым клеем по всем поверхностям (RU 98021, МПК У 04С 2/02, опубл. 27.09.2010). Однако при транспортировке теплоизоляционной панели часто повреждается стекло, что, в свою очередь, приводит к нарушению целостности вакуумной упаковки. Кроме того, предлагаемая панель имеет большой вес.

Для устранения этих недостатков была предложена гибкая оболочка, внутри которой размещен наполнитель, выполненный из многослойного теплоизоляционного материала, включающего алюминиевую фольгу, пластик и бумагу, нарезанную на кусочки размером не более 10 мм, а сама панель изготовлена посредством горячего прессования под давлением непосредственно в гибкой оболочке (патент РФ № 106715, МПК F16L 59/00, опубл. 20.07.2011). Наполнитель содержит связующую добавку из полиэтилена, гибкая оболочка выполнена из химически стойкого пластика.

Недостатком панели является технологическая трудность создания регулярного открытого порового пространства теплоизоляционного материала, необходимого для вакуумирования, путем механического измельчения. Кроме того, используемые для изготовления наполнителя материалы (фольга, пластик, бумага) являются плотными и обладают достаточно высокой теплопроводностью. Связующая добавка из полиэтилена также способствует снижению теплопроводности наполнителя.

На кафедре строительных конструкций НИ МГУ им. Н. П. Огарёва была предложена вакуумная теплоизоляционная панель, состоящая из вакуумированного наноструктурированного порошка частиц диатомита, упакованного в термостойкую полимерную пленку, которая заключена в жесткую пенополиуретановую оболочку-форму, выполненную из двух частей, входящих друг в друга и соединенных между собой полиуретановым клеем (патент РФ №150467, опубл 20.02.2015).

Был проведен сравнительный анализ VIP-панелей, который показал, что разработанные панели не уступают по своим характеристикам производителям других стран (табл. 1).

Для определения долговечности разработанных VIP-панелей проводились климатические испытания. Были изготовлены образцы вакуумных теплоизоляционных панелей размером 100 × 100 × 10 мм с различными видами наполнителей [4–6]:

- образец 1 – белая сажа марки БС-100;
- образец 2 – пирогенный микрокремнезем;

- образец 3 – модифицированный микрокремнезем (наноструктурированный порошок частиц диатомита);
- образец 4 – пирогенный микрокремнезем марки Орисил 300;
- образец 5 – белая сажа марки БС-100.

Таблица 1

**Сравнение технических характеристик полученных VIP-панелей
и других производителей на основе аморфного микрокремнезема**

Показатели	Единицы измерения	Страна производитель				
		США	Германия	Китай	Китай / США	Россия
		VIP	FRONT-VIP	VOKES-VIP	Nanorop-VIP	Diatomit-VIP
Теплопроводность	Вт/м·°С	0,01–80,008	0,02–0,002	0,02–0,002	0,018–0,002	0,02–0,002
Стабильность размеров	%	1	1	1	1	1
Огнестойкость	класс	A1	A1	A1	A1	A1
Плотность	кг/м ³	100	80	100	90	100
Стоимость	руб./м ²	800	900	900	800	400
Толщина	мм	20	20	20	20	20

Во время проведения эксперимента фиксировались следующие показатели: Q – интенсивность теплового потока, Вт/м²; Δ – толщина образца, мм; t_1 – температура на внешней поверхности панели, °С; t_2 – температура на внутренней поверхности панели, °С; m – масса образца, г; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С) (табл. 2).

Таблица 2

Изменение коэффициента теплопроводности VIP-панелей

Показания от 05.2016 г.						
№	Q , Вт/м ²	t_1 , °С	t_2 , °С	Δ , мм	m , г	λ , Вт/(м·°С)
1	22	2,1	–13,8	10,7665	60,1	0,014897
2	31	2,9	–27,2	11,29	43,4	0,011628
3	22	5,7	–20,5	11,3	38,06	0,009489
4	24	5,7	–13,3	10,2	48,25	0,012884
5	35	1,4	–24,6	10,06	38,79	0,013542

Показания от 01.2017 г.						
№	Q , Вт/м ²	t_1 , °С	t_2 , °С	Δ , мм	m , г	λ , Вт/(м·°С)
1	32	2,6	–15,7	10,7665	60,11	0,0188
2	43	5,1	–19,4	11,29	43,42	0,019
3	36	2,5	–22,3	11,3	38,12	0,016
4	Произошло развакуумирование панели					
5	36	–2	22,7	10,06	38,8	0,017

Анализ экспериментальных данных показал, что полученные VIP-панели можно использовать в качестве теплоизоляционных ограждающих материалов. Образец № 4 не прошел климатические испытания, так как вследствие перепада температур произошло изменение плотности наполнителя, что привело к развакуумированию панели.

С учетом полученного коэффициента теплопроводности был проведен теплотехнический расчет ограждающих конструкций жилых домов с использованием в качестве теплоизоляционного материала разработанных вакуумных панелей. Требуемое сопротивление теплопередаче ($R_0^{тр}$) для наружных стен должно быть не менее $3,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, для кровли – не менее $4,8 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Сопротивления теплопередачи, полученные в процессе эксперимента, для наружных стен и кровли (R_0^ϕ) приведены в табл. 3. Согласно полученным данным, испытываемые образцы удовлетворяют предъявляемым нормам.

Таблица 3

**Результаты расчетов термического сопротивления
с использованием разного теплоизоляционного материала**

Утеплитель	Сопротивление теплопередаче для наружных стен, $R_0^\phi, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Сопротивление теплопередаче для кровли, $R_0^\phi, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$R_0^\phi > R_0^{тр}$
Образец 1	4,2	5,1	Удовлетворяет
Образец 2	4,7	6,1	Удовлетворяет
Образец 3	5,5	7,77	Удовлетворяет
Образец 4	4,51	5,72	Удовлетворяет
Образец 5	4,42	5,74	Удовлетворяет
Газоблок	2,39	1,31	Не удовлетворяет

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- микрокремнезем, полученный из наноструктурированного диатомита, можно использовать в качестве наполнителя для качественных вакуумных теплоизоляционных панелей;
- технические характеристики полученных VIP-панелей не уступают зарубежным аналогам;
- вакуумные теплоизоляционные панели, полученные из модифицированного диатомита, можно использовать в качестве теплоизоляционного материала в ограждающих конструкциях жилых зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В. П., Неверов В. А., Осипов А. К. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вакуумированных дисперсных порошков микрокремнезема и диатомита. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – 220 с.
2. Heinemann U., Caps R., Fricke J. Characterization and optimization of filler materials for vacuum super insulations // *Vuoto scienza e tecnologia*. – 1999. – Vol. 18, No. 12. – pp. 43–46.
3. Селяев В. П., Неверов В. А., Куприяшкина Л. И., Маштаев О. Г. Природные и искусственные микрокремнеземы в качестве наполнителей вакуумных изоляционных панелей // *Строительные материалы*. – 2014. – № 9. – С. 1–7.
4. Куприяшкина Л. И., Долгов И. П., Куприяшкина Е. И., Нурлыбаев Р. Е. Новые стеновые теплоизоляционные конструкции [Электронный ресурс] // *Огарев-online*. – 2016. – № 5. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/novye-stenovye-teploizolyacionnye-konstrukcii>.
5. Селяев В. П., Куприяшкина Л. И., Киселев Н. Н., Селяев П. В. Оптимизация состава наполнителя вакуумной теплоизоляционной панели на основе пирогенного микрокремнезема // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2017. – № 5. – С. 36–42.
6. Васильев Л. Л. Теплопроводность неметаллических зернистых систем // *Строительная теплофизика*. – М.; Л.: Энергия, 1966. – С. 48–56.

ГАРЫНКИНА Е. Н.
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОНОЛИТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований цементных композитов, выдержанных в агрессивной среде. Показана возможность применения экспериментальных данных для определения ресурса железобетонной конструкции. Предложена методика оценки и прогнозирования долговечности строительных конструкций. Определен ресурс монолитной железобетонной плиты перекрытия.

Ключевые слова: железобетон, деградация, агрессивная среда, модель деградации, ресурс, характеристики сорбции, долговечность, эксплуатация.

GARYNKINA E. N.

FORECASTING OF RESOURCE OF REINFORCED MONOLITHIC CONCRETE SLABS

Abstract. The results of experimental studies of cement composites aged in an aggressive environment are provided. The possibility of using the experimental data to determine the resource of concrete structures is shown. The method of assessment and prediction of building structures durability is suggested. The resource of a sample reinforced monolithic concrete slab is calculated.

Keywords: reinforced concrete, degradation, aggressive environment, degradation model, resource, characteristics of sorption, durability, operation.

В наши дни основным конструкционным материалом для строительных целей в Российской Федерации является железобетон. Железобетон – это композиционный строительный материал, который включает в себя бетон и сталь. Изделия из железобетона, имеющие ряд преимуществ по сравнению с другими материалами, с успехом эксплуатируются в строительстве.

На начальном этапе проектирования все здания и сооружения должны отвечать нормативным требованиям с учетом влияния действия нагрузок и агрессивных сред. Несоблюдение проектных рекомендаций ведет к преждевременному износу конструкций и их разрушению. Возрастающее число крупных и мелких аварий, выход объектов из строя ведет к потерям финансовых ресурсов. Только в России эти финансовые издержки оцениваются примерно в 20-25 миллиардов рублей ежегодно. Задача обеспечения долговечности и коррозионной стойкости железобетонных изделий и конструкций является актуальной. Для решения поставленной задачи необходимо разработать методику оценки и прогнозирования ресурса железобетонной конструкции с учетом реальных условий эксплуатации при совместном действии силовых и химически активных сред.

Многими отечественными и зарубежными учеными были описаны процессы коррозии, выявлены и описаны основные характеристики процесса разрушения строительных конструкций, предложены расчетные методы оценки долговечности. Н. С. Стрелецким был предложен универсальный подход по нахождению оптимального срока службы, который должен определяться по минимуму эксплуатационных расходов [1]. В. В. Болотиным, А. Р. Ржаницыным, В. М. Бондаренко, Е. А. Гузеевым, В. И. Соломатовым, В. П. Селяевым, А. И. Попеско и др. были предложены современные методы оценки расчета надежности и долговечности строительных конструкций, основанные на принципах теории вероятности, математической статистики и теории случайных процессов [2–4].

В данной работе рассматривается метод, основанный на применении деградационных функций для оценки и прогнозирования ресурса железобетонных конструкций.

Деградация – это процесс ухудшения характеристик, качества строительных материалов и конструкций при воздействии силовых факторов, химических веществ, живых организмов, агрессивных сред. Для оценки долговечности строительных изделий предложено вместо коэффициентов условий работы применять функции деградации, выражающие изменение во времени несущей способности или жесткости поперечного сечения элемента [4]. Каждому механизму деградации соответствуют определенные модели деградации. Общий вид деградационной функции можно представить выражением [5]:

$$D = \frac{B(t)}{B(0)} = f(t, T, \sigma, c, h, \alpha, a), \quad (1)$$

Метод деградационных функций позволяет комплексно оценивать действие агрессивных сред на элемент строительной конструкции. Вместе с этим появляется возможность учитывать интенсивность деструкции материала, вид напряженного состояния, размеры образца и их изменение под действием среды, распределение прочностных свойств по площади поперечного сечения.

Определение ресурса рассмотрим на примере расчета железобетонной плиты. Для описания процесса взаимодействия материала с агрессивной средой примем модель деградации по диффузионному типу (рис. 1). Диффузионные модели деградации применимы в тех случаях, когда скорости переноса и химического взаимодействия реакционно-способных компонентов материала и среды сопоставимы.

Основными параметрами модели являются: глубинный показатель $a(t)$, коэффициент химического сопротивления k_{xc} . Первый параметр a характеризует скорость продвижения фронта разрушения материала с поверхности вглубь образца. Второй параметр k_{xc} является оценкой скорости изменения твердости или прочности внешних слоев материала, контактирующих с агрессивной средой.

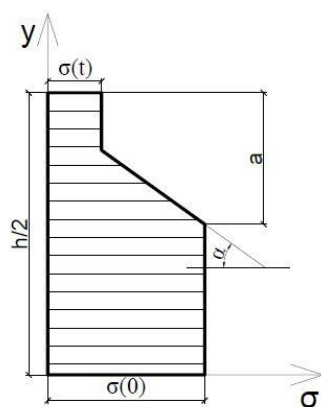


Рис. 1. Модель деградации.

Глубинный показатель предложено определять по сорбционным характеристикам m_0 и $t_{0,5}$. На рисунке 2 приведены экспериментальные данные по изменению массы образцов, экспонированных в воде. Кривые сорбции хорошо описываются уравнением Ленгмюра:

$$m = \frac{m_0 t}{t + t_{0,5}}. \quad (2)$$

Линеаризация данных по сорбции в осях $1/m - 1/t$ дает возможность определить m_0 и $t_{0,5}$. На рисунке 3 показано, что экспериментальные данные изменения массы образцов, экспонированных в воде, хорошо описываются линейной зависимостью. По графикам (рис. 2 и 3) были получены сорбционные характеристики m_0 и $t_{0,5}$ (см. табл. 1). Коэффициент диффузии и глубинный показатель предложено [6; 7; 8] определять путем решений уравнений Ленгмюра и Фика по формулам:

$$D = 0,2 \frac{R^2}{t_{0,5}}; \quad (3)$$

$$a = 0,1\sqrt{Dt}. \quad (4)$$

Таблица 1

Константы сорбции m_0 и $t_{0,5}$ для цементных образцов, экспонированных в H_2O

№ п/п	Среда	m_0 гр.	$t_{0,5}$ сут.	$\sigma(t)/\sigma(0)$		
				0	1	2
1	H_2O	0,09	191	1	0,802	0,592

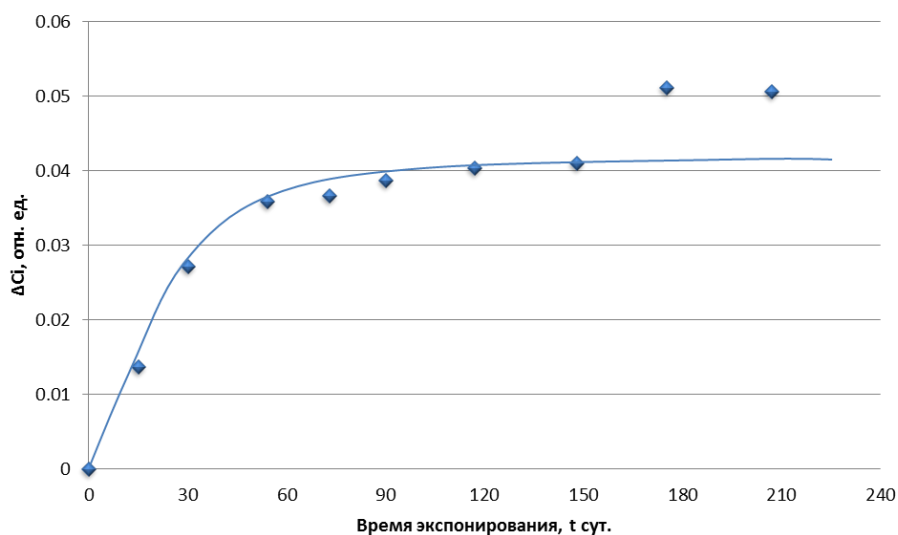


Рис. 2. Приращение по массе цементных композитов, выдержанных в H₂O.

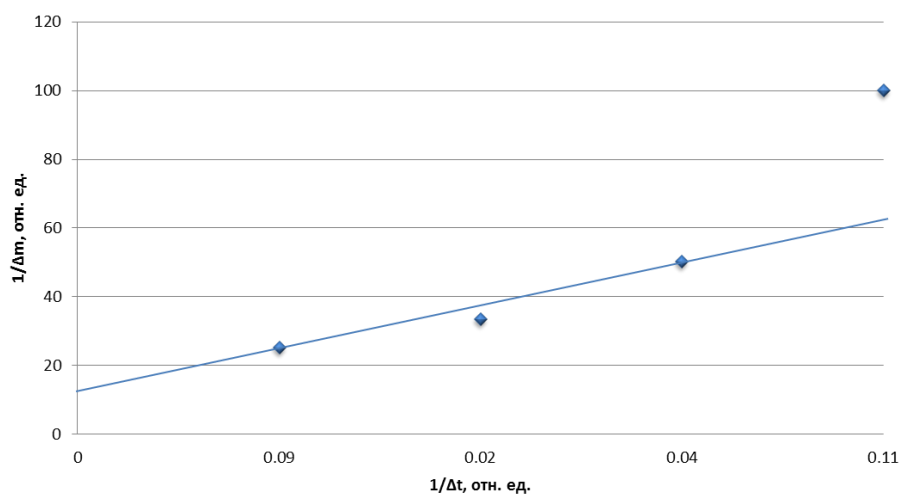


Рис. 3. Изменение массы цементных композитов, выдержанных в H₂O.

Для определения второго параметра $k_{\text{хс}}$ образцы выдерживались в агрессивной среде (H₂O) при температуре 20 °С. После каждого периодического извлечения композитов из среды измерялась масса, определялся предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе. График изменения прочности приведен на рис. 4. Аналитическое описание изменений прочности цементных композитов во времени под действием агрессивной среды можно производить с применением закона взаимодействия веществ (Гульдберга – Вааге):

$$\vartheta = k c_1^h c_2^m c_3^o, \quad (5)$$

где ϑ – скорость взаимодействия; c_1, c_2, c_3 – концентрация веществ; h, m, o – порядок реакции, k – константа.

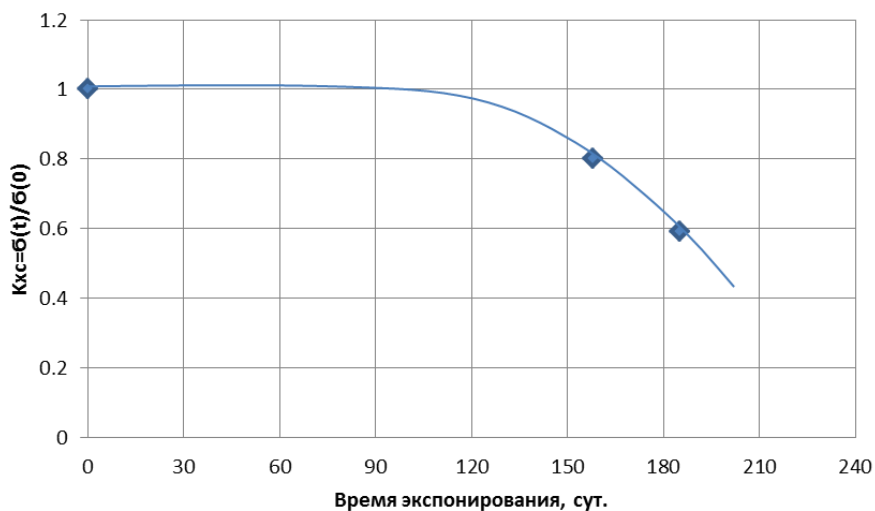


Рис. 4. Изменение прочности цементных образцов после экспонирования в воде.

Для обработки экспериментальных данных, представленных на рисунке 4, и определения параметра « k » произведем линеаризацию (рис. 5 – 7) рассматриваемой функции (5). Рассмотрим моно-, би- и тримолекулярные модели взаимодействия. В первом случае

$$\ln K_{xc1} = l_u C_0 - k_1 t, \quad (6)$$

во втором –

$$1/K_{xc2} = 1/C_0 + k_2 t, \quad (7)$$

в третьем –

$$1/K_{xc3}^2 = 1/C_0^2 + 2k_3 t. \quad (8)$$

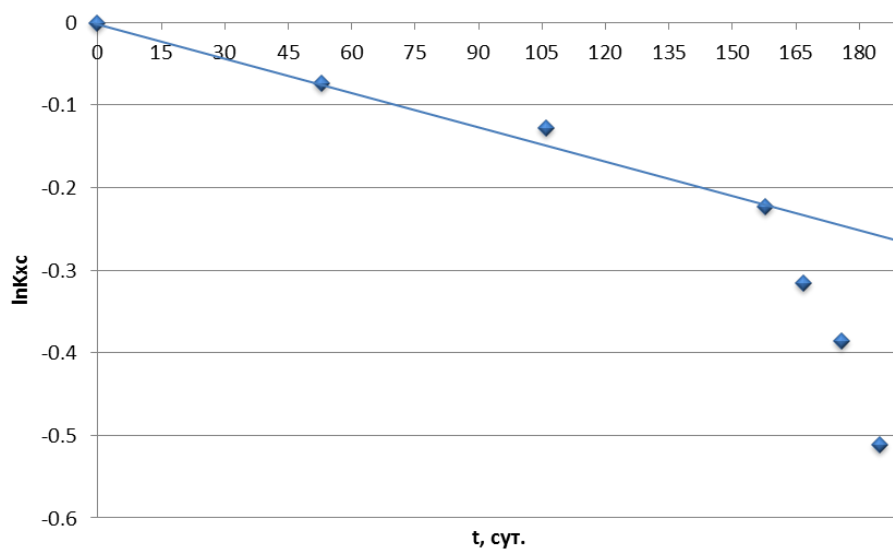


Рис. 5. Линеаризация мономолекулярной модели взаимодействия цементных образцов и воды.

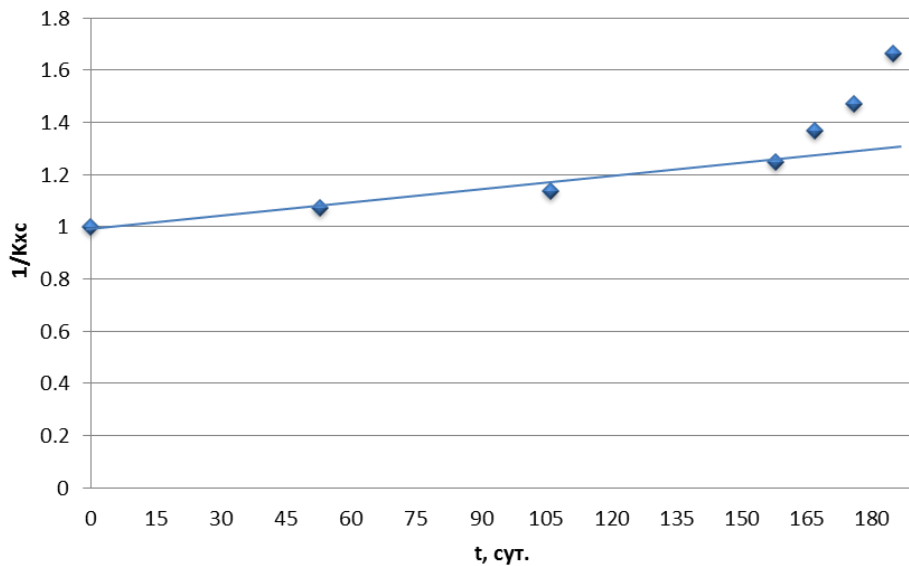


Рис. 6. Линеаризация бимолекулярной модели взаимодействия цементных образцов и воды.

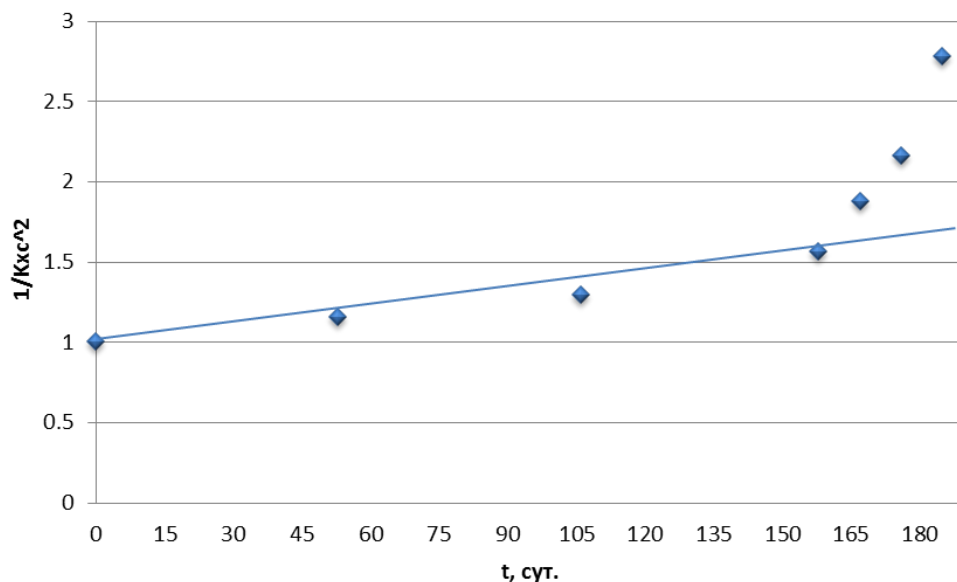


Рис. 7. Линеаризация тримолекулярной модели взаимодействия цементных образцов и воды.

Параметр « k » по уравнению (7) равен:

$$k_2 = 0,002. \quad (9)$$

Результаты обработки экспериментальных данных с применением мономолекулярной модели показали, что она плохо описывает процесс деградации. В тоже время бимолекулярная модель более точно описывает результаты эксперимента.

Рассмотрено влияние воды на работу железобетонных конструкций.

Для оценки ресурса железобетонной плиты в качестве модели деградации, на основе которой будет производиться расчет, выбираем модель диффузионного типа (рис. 1) и соответствующую функцию деградации [9]:

$$D = \frac{M(t)}{M(0)} = 1 - \frac{\xi_{11}(1 - R_{bt}/R_b)}{1 - 0,5\xi_0} = 1 - \frac{\xi_{11}(1 - K_{xc})}{1 - 0,5\xi_0}. \quad (10)$$

Данные для расчета: $h = 7\text{ см}$, $h_0 = 5,5\text{ см}$, класс бетона плиты В15, $R_b = 8,5\text{ МПа}$, $R_{bt} = 0,75\text{ МПа}$. Арматура рабочая – обыкновенная проволока периодического профиля класса Вр500 диаметром 4 мм в сварной рулонной сетке: $R_s = 415\text{ МПа}$.

$$R = 4\text{ см}, k_{xc} = 0,002, \mu = 0,002, t_{0,5} = 191.$$

Коэффициент диффузии равен:

$$D = 0,2 \cdot \frac{R^2}{t_{0,5}} = 0,2 \cdot \frac{0,04^2}{191} = 1,68 \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Глубинный показатель определяем по формуле:

$$a = k(\xi)\sqrt{Dt} = 0,1 \cdot \sqrt{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t}; \quad (12)$$

$$\xi_{11} = \frac{a}{h_0} = \frac{0,1 \cdot \sqrt{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t}}{0,055} = 1,82 \sqrt{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t}; \quad (13)$$

$$\xi_0 = \mu \frac{R_s}{R_b} = 0,002 \cdot \frac{415}{8,5} = 0,0976; \quad (14)$$

$$D = \frac{M(t)}{M(0)} = 1 - \frac{\xi_{11}(1 - K_{xc})}{1 - 0,5\xi_0} = 1 - \frac{1,82 \sqrt{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t} (1 - 0,002)}{1 - 0,5 \cdot 0,0976}. \quad (15)$$

По полученным значениям уравнения (15) строим график деградационной функции (рис. 8).

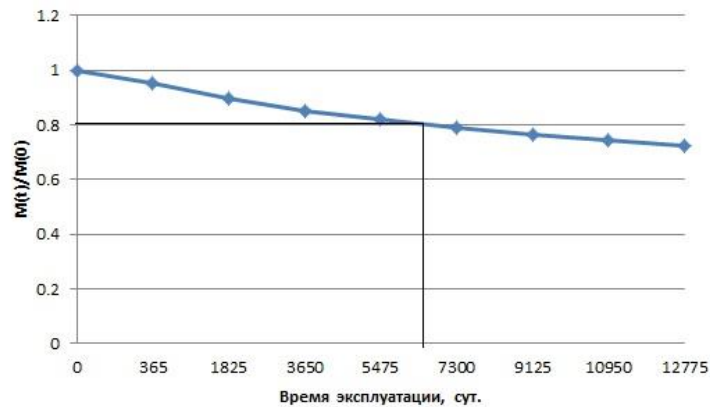


Рис. 8. Определение остаточного ресурса монолитной железобетонной плиты перекрытия методом деградационных функций.

По результатам проведенных исследований выявлено, что после примерно через 19 лет эксплуатации несущая способность плиты уменьшится на 20% и потребуется восстановление (ремонт) для дальнейшей нормальной эксплуатации данной конструкции. Поэтому для повышения ресурса данной конструкции необходимо обосновать выбор класса бетона и арматуры с учетом воздействия агрессивных сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелецкий Н. С. Разводные мосты. Основы проектировки и расчета. – М., 1924. – 312 с.
2. Болотин В. В. Методы теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
3. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
4. Соломатов В. И., Селяев В. П., Соколова Ю. А. Химическое сопротивление материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: РААСН, 2001. – 284 с.
5. Селяев В. П., Низина Т. А., Уткина В. Н. Химическое сопротивление и долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: учебное пособие / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Селяева В. П. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2003. – 48 с.
6. Селяев В. П., Куприяшкина Л. И., Седова А. А., Селяев П. В., Колотушкин А. В. Химическое сопротивление цементных композитов действию водных растворов, содержащих ионы хлора // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 1. – С. 17–25.
7. Селяев В. П., Уткина В. Н., Селяев П. В., Сорокин Е. В., Кечуткина Е. Л. Моделирование влияния коррозионных повреждений структуры бетона на несущую способность железобетонных изгибаемых элементов. Часть 1. Формирование и изменение параметров модели // Сборник научных статей XXI научно-методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций», 16 марта 2017 г. – СПб., 2017. – С. 104–109.
8. Селяев В. П., Уткина В. Н., Селяев П. В., Сорокин Е. В., Кечуткина Е. Л. Моделирование влияния коррозионных повреждений структуры бетона на несущую способность железобетонных изгибаемых элементов. Часть 2. Пример расчета несущей способности железобетонных изгибаемых элементов поврежденных коррозией // Сборник научных статей XXI научно-методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций», 16 марта 2017 г. – СПб., 2017. – С. 104–109.
9. Селяев В. П. Расчет долговечности железобетонных конструкций // Вестник Мордовского университета. – № 4. – 2008. – С. 140–149.

**БАЛЫКОВ А. С., НИЗИНА Т. А., КОРОВКИН Д. И.,
ВОЛОДИН В. В., СМАКАЕВ Р. М., ГАДЖИЕВА У. М.
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЦЕМЕНТНЫХ И МИНЕРАЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Аннотация. Произведен анализ реотехнологической эффективности рецептуры цементно-минеральных суспензий с установлением влияния дозировки различных компонентов на текучесть дисперсных систем. Выявлен наиболее эффективный способ введения порошкового поликарбоксилатного суперпластификатора в цементные системы. Установлена оптимальная дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора и реологически активного карбонатного наполнителя в цементно-минеральных суспензиях при разработке самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, суперпластификатор, реологически активный наполнитель, реотехнологические характеристики, цементная и минеральная суспензия.

**BALYKOV A. S., NIZINA T. A., KOROVKIN D. I.,
VOLODIN V. V., SMAKAEV R. M., GAJIYEVA U. M.
STUDY OF REOTECHNOLOGICAL PROPERTIES
OF CEMENT AND MINERAL SUSPENSIONS
FOR SELF-COMPACTING CONCRETE MIXTURES DEVELOPMENT**

Abstract. An analysis of rheotechnological effectiveness of the recipe of cement-mineral suspensions with studying the effect of dosage of different components on the fluidity of disperse systems is carried out. The most effective method of introducing powder of polycarboxylate superplasticizer in the cement system is revealed. The optimal dosage of polycarboxylate superplasticizer and rheology active carbonate filler in cement-mineral suspensions for the development of self-compacting fine-grained concrete mixtures is found out.

Keywords: self-compacting concrete, superplasticizer, rheology active filler, rheotechnological characteristics, cement and mineral suspension.

За последние десятилетия произошел значительный прогресс бетоноведения, позволивший превратить бетоны в сложный многокомпонентный композиционный материал с высокой функциональностью каждого из компонентов, бетонной смеси и бетона в целом [1]. На сегодняшний день эффекты функциональности хорошо совместимых компонентов бетона проявляются на стадиях приготовления, транспортирования, укладки, твердения и

эксплуатации композитов, что доказано с позиции многих фундаментальных и прикладных наук, в том числе и с применением методов и подходов относительно молодых и стремительно развивающихся научных направлений – метода экспериментально-статистического моделирования [2; 3], фрактального анализа [4; 5] и др.

В настоящее время происходит становление современных бетонов, однозначно относимых мировым технологическим сообществом к категории бетонов нового поколения (БНП) с высокими показателями прочности, удобоукладываемости, стабильности объема и долговечности [6–10]. Особое место среди бетонов нового поколения занимают самоуплотняющиеся бетоны (СУБ) – Self-Compacting Concrete (SCC, англ.), Selbstverdichtender Beton (SVB, нем.), Beton autoplacant (BAP, франц.), получившие в настоящее время за рубежом достаточно широкое распространение. Данный термин, предложенный в 1986 году японским профессором Х. Окамурой, объединяет бетонные смеси с высокими показателями удобоукладываемости (расплыв стандартного конуса свыше 55-60 см при сниженных значениях водоцементного отношения до 0,35-0,4 и менее), обусловленными высокой деформативностью суспензионной матрицы наряду с ее высоким сопротивлением сегрегации или расслоению при перемещении [11].

В рецептуре самоуплотняющихся бетонных смесей необходимо наличие значительного количества дисперсных микроразмерных частиц цемента или минеральных наполнителей (преимущественно 1-100 мкм), увеличивающих совместно с портландцементом объем дисперсно-водной суспензии и повышающих ее реотехнологические показатели. При этом не всякие наполнители способны обеспечивать более высокую текучесть в суспензии с суперпластификатором, чем цементные суспензии. Для характеристики такой способности профессором В. И. Калашниковым был введен термин «реологически активный наполнитель в суспензии с суперпластификатором» [12].

Многообразие горных пород различного происхождения вызывает научный интерес к исследованию возможности их использования в качестве реологически активного минерального наполнителя в самоуплотняющихся бетонных смесях. Проведенные научные исследования отечественных [13] и зарубежных [14] авторов показали эффективность применения тонкомолотых кварцевых песков в качестве тонкодисперсных наполнителей высокоподвижных бетонных смесей, обусловленную явлением перезарядки отрицательной поверхности частиц кислых кварцсодержащих пород (пылевидный кварц, гранит, диабаз, базальт, опока, диатомит) в присутствии портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, вызывающего сильное разжижение водных дисперсий с поликарбоксилатными суперпластификаторами. Однако наиболее совместимыми с анионоактивными разжижителями являются карбонатные породы (известняк, мрамор, доломит) [7; 13], имеющие частицы со значительной долей

положительно заряженных активных центров. При этом известно [15], что некоторые виды известняков в смеси с высокоэффективными поликарбоксилатными суперпластификаторами позволяют получать гравитационно-растекающиеся агрегативно-устойчивые системы с предельно высокой объемной концентрацией твердой фазы, достигающей 70-74%.

Обобщая вышесказанное, можно отметить, что исследования в области самоуплотняющихся бетонных смесей является наукоемкой задачей, для осуществления которых необходимо задействовать положения реологии и физико-химической динамики дисперсных систем. При этом получение самоуплотняющихся бетонных смесей необходимо начинать с разработки реологически активной рецептуры цементно-минеральных суспензий, что является основной целью данного исследования. С учетом того, что самоуплотняющиеся бетонные смеси отличаются повышенным содержанием пластифицированной суспензионной составляющей, основным критерием эффективности данной рецептуры является полнота использования пластифицирующих и водоредуцирующих возможностей суперпластификаторов, позволяющих формировать малоструктурные агрегативно-устойчивые суспензии с предельно-высокой концентрацией твердой фазы, низкими значениями предельного напряжения сдвига и пластической вязкости при высокой гравитационной текучести под действием собственного веса (расплыв из стандартного конуса (ГОСТ 10181) и конуса Хегерманна (ГОСТ 310.4) – не менее 550 и 280 мм соответственно). При этом эффективность пластифицирующих добавок будет зависеть от многих факторов – способа введения и оптимальной дозировки разжижителя, реологической активности применяемых наполнителей и др.

Поставленная цель исследования достигалась решением следующих задач:

1) исследованием водоредуцирующей эффективности поликарбоксилатного суперпластификатора в цементных суспензиях в зависимости от способа введения; выбор наиболее эффективного способа;

2) анализом реотехнологической эффективности рецептуры цементно-минеральных суспензий с установлением влияния дозировки компонентов на текучесть дисперсных систем;

3) установлением оптимальной дозировки поликарбоксилатного суперпластификатора и реологически активного минерального наполнителя в цементно-минеральных суспензиях при разработке самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей.

Для изучения влияния процедуры введения суперпластификатора в цементную суспензию на его водоредуцирующую эффективность использовались: портландцемент класса ЦЕМ I 32,5Б производства ПАО «Мордовцемент» и порошок

поликарбоксилатный суперпластификатор марки «Melflux 5581 F» (BASF Construction Solutions (Trostberg, Германия)). Пластифицирование цементных суспензий осуществлялось при концентрации разжижителя, составляющего 1% от массы портландцемента.

Введение суперпластификатора производилось следующими способами: 0 – приготовление цементного теста без разжижителя; 1 – сухое введение суперпластификатора в виде порошка и его дискретное распределение при перемешивании с портландцементом на начальном этапе приготовления смеси и дальнейшее затворение сухой смеси требуемым количеством воды; 2 – растворение порошкового суперпластификатора в требуемом количестве воды и затворение портландцемента получившимся водным раствором разжижителя; 3 – затворение портландцемента первой порцией воды (половиной объема воды затворения) с последующим введением раствора оставшегося объема воды и суперпластификатора.

Количество воды затворения для каждого способа введения суперпластификатора подбиралось экспериментально с учетом получения цементного теста нормальной густоты (ГОСТ 310.3).

В качестве критерия оценки эффективности способов введения разжижителя в цементные суспензии использовали величину объемной концентрации твердой фазы дисперсных систем в процентах или в долях единицы

$$C_V = \frac{1/\rho_{т.ф.}}{1/\rho_{т.ф.} + B/T}, \quad (1)$$

где $\rho_{т.ф.}$ – истинная плотность цемента, $\rho_{т.ф.} = 3,1 \text{ г/см}^3$; В/Ц – водоцементное отношение непластифицированного $((B/C)_H^{нг})$ или пластифицированного $((B/C)_П^{нг})$ цементного теста нормальной густоты.

Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Способ введения и водоредуцирующая эффективность пластификатора			
Способ введения	$(B/C)_H^{нг}$, отн. ед.	$(B/C)_П^{нг}$, отн. ед.	C_V , %
0	0,265	-	55
1	-	0,14	70
2	-	0,16	67
3	-	0,18	64

Как следует из анализа табл. 1, наибольшая водоредуцирующая эффективность порошкового суперпластификатора «Melflux 5581 F» зафиксирована при его сухом введении в виде порошка на начальном этапе приготовления смеси (способ № 1), что позволило получить пластифицированные цементные суспензии с максимальной объемной концентрацией твердой фазы в изореологическом состоянии $C_V = 70\%$.

На втором этапе производилось исследование реотехнологической эффективности цементно-минеральных суспензий с установлением влияния дозировки компонентов на текучесть дисперсных систем. В ходе экспериментальных исследований изучались реотехнологические характеристики не только чистых цементных суспензий, но и суспензий различных дисперсных наполнителей, а также бинарных суспензий (портландцемент + микрокальцит). Определение реотехнологических свойств приготовленных суспензий осуществлялось путем фиксации их расплывов из малого вискозиметра Суттарда диаметром 10 мм, высотой 40 мм по методике, разработанной в Пензенском университете архитектуры и строительства [16].

В качестве исходных компонентов дисперсных систем использовались бездобавочные портландцементы ЦЕМ I 42,5Б и 32,5 Б ПАО «Мордовцемент», а также ЦЕМ I 42,5Б ПАО «Сенгилеевский цементный завод», карбонатный наполнитель (микрокальцит КМ100 (МКМ)), активные минеральные добавки (микрокремнезем, метакаолин, «Пенетрон Адмикс», поликарбоксилатные суперпластификаторы Melflux 1641 F и Melflux 5581 F, содержание которых было фиксированным и составляло 1% от массы твердой фазы. Для приготовления суспензий использовался наиболее эффективный способ введения разжижителя (способ № 1, табл. 1)

В ходе проведения экспериментального исследования было изготовлено 68 непластифицированных и пластифицированных, одинарных и бинарных, цементных и минеральных суспензий и исследованы их реотехнологические показатели. По итогам установлена зависимость диаметра расплыва суспензии (y , мм) из минивискозиметра Суттарда (диапазон $10 \div 60$ мм) от содержания компонентов (v_i , отн. мас. ед.; $0 \leq v_i \leq 1$; $\sum v_i = 1$; $i = 1, 2, 3, \dots, 12$)

$$y = b_1 \cdot v_1 + b_2 \cdot v_2 + b_3 \cdot v_3 + b_4 \cdot v_4 + b_5 \cdot v_5 + b_6 \cdot v_6 + b_7 \cdot v_7 + b_8 \cdot v_8 + b_9 \cdot v_9 + b_{10} \cdot v_{10} + b_{11} \cdot v_{11} + b_{12} \cdot v_{12}, \quad (2)$$

где $b_1, b_2, \dots, b_{12}$ – коэффициенты полиномиального уравнения, показывающие вклад каждого компонента в достижение требуемого расплыва суспензии; v_1 – водосодержание цементных или минеральных суспензий ($0,13 \div 0,57$ отн. мас. ед.); v_2, v_3, v_4 – содержание портландцементов ЦЕМ I 42,5Б, ЦЕМ I 32,5Б ПАО «Мордовцемент» и портландцемента ЦЕМ I 42,5Б ПАО «Сенгилеевский цементный завод» соответственно ($0 \div 0,86$ отн. мас. ед.); v_5, v_6 – содержание суперпластификаторов Melflux 1641 F и Melflux 5581 F соответственно ($0 \div 0,03$ отн. мас. ед.); v_7 – содержание микрокальцита КМ 100 ($0 \div 0,87$ отн. мас. ед.); v_8, v_9 – содержание микрокремнезема конденсированного уплотненного (МКУ-85) и неуплотненного (МК-85) соответственно ($0 \div 0,54$ отн. мас. ед.); v_{10}, v_{11}, v_{12} – содержание метакаолина белого, серого и «Пенетрон Адмикс» соответственно ($0 \div 0,66$ отн. мас. ед.).

Коэффициенты полиномиального уравнения (2) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значение коэффициентов полиномиального уравнения (2)

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
-55,6	76,3	64,0	67,3	-640,4	-133,4	66,4	123,8	124,1	117,1	92,4	90,7

На третьем этапе осуществлялось установление оптимальной дозировки поликарбоксилатного суперпластификатора и реологически активного минерального наполнителя в цементно-минеральных суспензиях при разработке самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей. Для приготовления суспензий использовался портландцемент класса ЦЕМ I 32,5Б производства ПАО «Мордовцемент». Минеральная часть включала в себя карбонатный наполнитель – микрокальцит KM100 (МКМ) с дозировкой 0÷300% от массы портландцемента (0÷75% от массы твердой фазы) с шагом варьирования 100%.

На начальном этапе определялась нормальная густота цементного и цементно-минерального теста по методике ГОСТ 310.3 с учетом дозировки микрокальцита в смеси. Результаты представлены на рисунке 1. Согласно представленным данным, при повышении доли микрокальцита с 0 до 300% от массы портландцемента нормальная густота цементно-минерального теста снижается с 26,5 до 24,6%. Представленные результаты свидетельствуют о сниженной водопотребности используемого карбонатного наполнителя и повышенной водоредуцирующей эффективности суспензий «портландцемент – микрокальцит» по сравнению с цементными суспензиями при получении минерального теста требуемой консистенции.

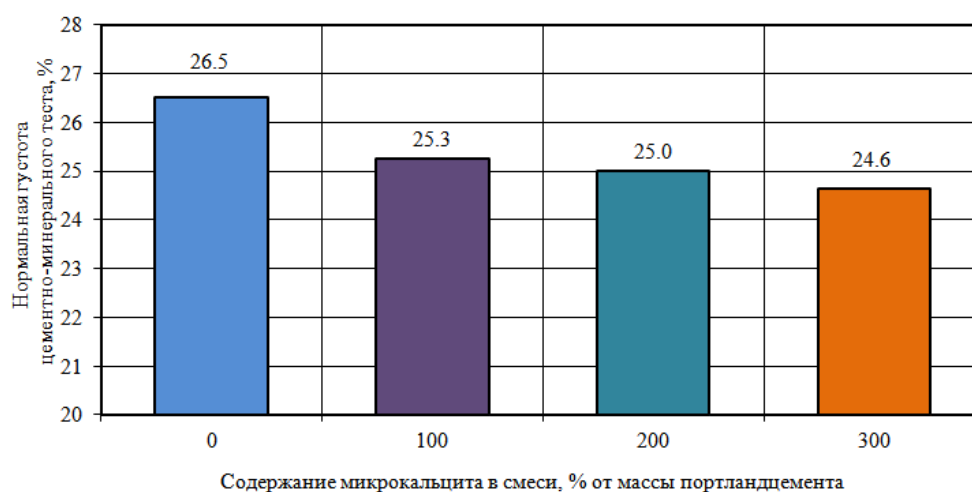


Рис. 1. Нормальная густота цементно-минерального теста в зависимости от дозировки наполнителя.

Исследование влияния дозировки поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокальцита КМ100 на текучесть цементных и цементно-минеральных суспензий с установлением оптимальной дозировки компонентов проводились при фиксированном водотвердом отношении $B/T = 0,15$.

В процессе проведения исследования варьируемыми факторами являлись:

- содержание микрокальцита (МКМ) в смеси твердой фазы «портландцемент + микрокальцит» (Ц + МКМ) – отношение МКМ / Ц, $x_1 = 0 \div 3,0$ отн. ед.;
- содержание суперпластификатора «Melflux 5581 F» (СП) – отношение СП / (Ц + МКМ), $x_2 = 0 \div 1,5\%$.

По результатам исследования осуществлялось построение экспериментально-статистической модели зависимости диаметра расплыва цементно-карбонатных суспензий («портландцемент – микрокальцит») (y , мм) из конуса Хегерманна (ГОСТ 310.4) от содержания варьируемых факторов x_1 и x_2 . ЭС-модели задавались в виде приведенного полинома

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{111} \cdot x_1^3 + b_{222} \cdot x_2^3 + b_{122} \cdot x_1 \cdot x_2^2 + b_{112} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + b_{1122} \cdot x_1^2 \cdot x_2^2 \quad (3)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}, b_{111}, b_{222}, b_{122}, b_{112}, b_{1122}$ – коэффициенты полиномиального уравнения; x_1, x_2 – значения варьируемых факторов.

Используя полином (3), были построены изолинии изменения диаметра расплыва цементно-карбонатных суспензий из конуса Хегерманна (рис. 2) в зависимости от значений факторов x_1 и x_2 в натуральных величинах при варьировании их в указанных выше диапазонах.

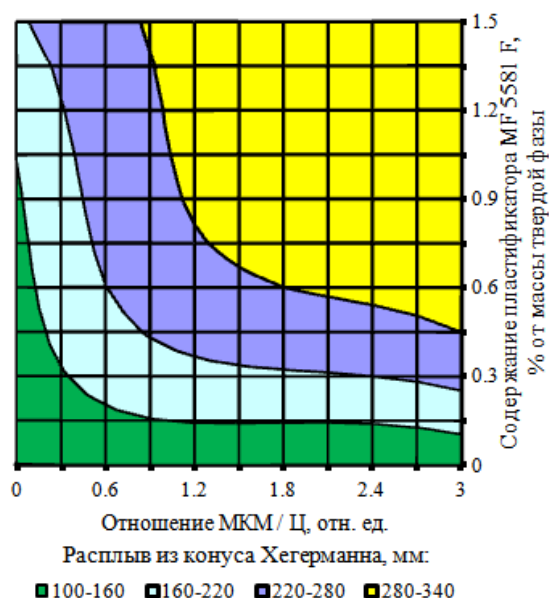


Рис. 2. Изменение диаметра расплыва цементно-карбонатных суспензий из конуса Хегерманна в зависимости от дозировки суперпластификатора и степени наполнения микрокальцитом.

При анализе ЭС-модели (3) и рис. 2 установлены оптимальные уровни варьируемых факторов, позволяющие достичь самоуплотняемости суспензий при значениях диаметра распыла из конуса Хегерманна более 280 мм и водотвердом отношении равном 0,15 отн. ед.: дозировка суперпластификатора Melflux 5581 F – $0,5 \div 1,0\%$ от массы твердой фазы; степень наполнения суспензии микрокальцитом – не менее 105% от массы портландцемента. При этом повышение содержания пластификатора до 1,5% от массы портландцемента не приводит к существенному приросту реотехнологических показателей. Достижение самоуплотняемости дисперсных систем при сниженных дозировках суперпластификатора, равных $0,45 \div 0,6\%$ от массы твердой фазы, возможно при содержании наполнителя, превышающем 180% от массы портландцемента.

Полученные в ходе проведенных исследований реотехнологических свойств цементных и минеральных суспензий результаты станут основой при разработке самоуплотняющихся и высокоподвижных мелкозернистых бетонных смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ущеров-Маршак А. В. Бетоны нового поколения – бетоны с добавками // Бетон и железобетон. – 2011. – № 1. – С. 78–81.
2. Низина Т. А., Балыков А. С. Построение экспериментально-статистических моделей «состав – свойство» физико-механических характеристик модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – Вып. 45(64). – С. 54–66.
3. Низина Т. А., Балыков А. С., Макарова Л. В. Применение моделей «состав - свойство» для исследования свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 12. – С. 15-21.
4. Балбалин А. В., Балыков А. С., Низина Т. А. Фрактальный анализ кривых деформирования композиционных строительных материалов при сжатии [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2015. – № 13. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/fraktalnyj-analiz-krivykh-deformirovaniya-kompozicionnykh-stroitelnykh-materialov-pri-szhatii>
5. Селяев В. П., Низина Т. А., Балыков А. С., Низин Д. Р., Балбалин А. В. Фрактальный анализ кривых деформирования дисперсно-армированных

- мелкозернистых бетонов при сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 129–146.
6. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
7. Калашников В. И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов // Строительные материалы. – 2016. – № 1-2. – С. 96–103.
8. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Кардунян Г. С. Новые модифицированные бетоны. – М.: Навруз, 2010. – 258 с.
9. Балыков А. С., Низина Т. А., Макарова Л. В. Критерии эффективности цементных бетонов и их применение для анализа составов высокопрочных композитов // Строительные материалы. – 2017. – № 6. – С. 69–75.
10. Низина Т. А., Балыков А. С., Макарова Л. В., Каштанова Е. А., Каштанов А. А. Высокая прочность как один из факторов повышения долговечности цементных бетонов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук, профессора Соломатова Василия Ильича. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – С. 84–89.
11. Фаликман В. Р. Новые эффективные высокофункциональные бетоны // Бетон и железобетон. – 2011. – № 2. – С. 78–84.
12. Калашников В. И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 4–6.
13. Калашников В. И., Москвин Р. Н., Белякова Е. А., Белякова В. С., Петухов А. В. Высокодисперсные наполнители для порошково-активированных бетонов нового поколения // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 113–118.
14. Дейзе Т., Хорнунг О., Нельман М. Переход с технологии Микродур к технологии Нанодур. Применение стандартных цементов в практике бетонов со сверхвысокими эксплуатационными свойствами // Бетонный завод. – 2009. – № 3. – С. 4–11.
15. Калашников В. И., Макридин Н. И., Тараканов О. В., Архипов В. П. К терминологии самоуплотняющихся порошково-активированных бетонов и бетонных смесей нового поколения // Композиционные строительные материалы.

Теория и практика: сборник статей международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2016. – С. 8–13.

16. Суздальцев О. В. Долговечные архитектурно-декоративные порошково-активированные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород: дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2015. – 237 с.

**КУПРИЯШКИНА Л. И., СЕДОВА А. А.,
ГОЛЯЕВ Е. С., ДОЛГОВА В. А., КУПРИЯШКИНА Е. И.
ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ
В УСЛОВИЯХ ХРАНЕНИЯ ВОДЫ**

Аннотация. Показана возможность использования цеолитсодержащих пород для покрытий конструкций железобетонных резервуаров. Проведен химический анализ вод Республики Мордовии. Получен результат осадка фильтра взаимодействия воды с цементными композитами, наполненными цеолитсодержащими породами.

Ключевые слова: резервуар, железобетон, агрессивная среда, цеолитсодержащие породы, сточные воды, очистные сооружения, покрытия, композиционный материал, условия эксплуатации.

**KUPRYASHKINA L. I., SEDOVA A. A.,
GALYAEV E. S., DOLGOVA V. A., KUPRYASHKINA E. I.
PROTECTION OF CONCRETE TANKS
UNDER THE CONDITIONS OF WATER STORAGE**

Abstract. The possibility of using zeolite rocks for coatings of concrete tanks is shown. Chemical analysis of waters of the Republic of Mordovia is carried out. The analysis of the filter sediment shows the results of interaction of water and cement composites filled with zeolite rocks.

Keywords: water tank, reinforced concrete, aggressive environment, zeolite rocks, waste water, sewage treatment plant, coating, composite material, operating conditions.

На современном этапе развития строительной отрасли проблема улучшения качества и долговечности покрытий с учетом экономии ресурсов является актуальной. Бетонные и железобетонные конструкции очистных сооружений находятся в жестких условиях воздействия агрессивных сред: водных стоков, грунтовых вод и газов. В этой связи на очистных сооружениях срок эксплуатации железобетонных конструкций не безграничен и требуется их периодический ремонт. Необходимость ремонта конструкций возникает при коррозионных процессах бетона и арматуры, когда нарушается защитный слой бетона. В этом случае изменяется геометрическая конфигурация конструкций, оголяется продольная и поперечная арматура, происходит возникновение сети трещин и выкрашивание бетона. Поэтому необходимо разработать качественные и долговечные покрытия, позволяющие увеличить срок эксплуатации сооружений.

Для разработки составов покрытий, используемых для увеличения срока службы конструкций очистных сооружений (рис. 1), был проведен химический анализ природных

(Ичалковский район и п. Николаевка) и сточных вод (г. Саранск). Исследуемую воду предварительно очищали от крупных примесей с помощью бумажного фильтра и проводили химический анализ состава (табл. 1).



Рис. 1. Резервуары (а) и отстойники (б) для хранения воды.

Исходные стандартные растворы ионов железа (III) и фосфат-ионов, содержащие 1 г/л соответствующих ионов, готовили согласно нормативным требованиям ГСО. Разбавление растворов осуществляли деионизированной водой в день проведения анализа. Концентрацию ионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , NO_3^- определяли методом ионной хроматографии на ионном анализаторе SHIMADZU PIA-1000. Концентрацию ионов Fe^{3+} и PO_4^{3-} измеряли спектрофотометрическим методом с помощью спектрофотометра UV-1800. Элементный анализ осадка, полученного из цементного камня в результате выдерживания его в природной и сточной воде в течение 7, 21, 56 суток, осуществляли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ARL Perform`x 4200.

Таблица 1

Результаты химического анализа природной и сточной воды

Тип воды		Сточная вода, г. Саранск	Ичалковский район, с. Селище	п. Николаевка, г. Саранск
рН		7,04	7,25	6,92
Жесткость воды, моль-экв/л	общая	9,77	8,88	12,63
	карбонатная	8,90	4,93	8,17
	постоянная	0,87	3,95	4,47
Окисляемость, mgO_2/l		387,43	361,9	40,1
Электропроводность, $mkCm/cm$		1186	863	1395
Агрессивная углекислота, mg/l		44,00	22,00	26,60

Из данных таблицы 1 можно заключить, что сточная и природная воды имеют среду, близкую к нейтральной (рН сточной воды равно 7,04, природной – 6,92 и 7,25). Изучаемые типы воды различаются по жесткости. Сверхжесткой является вода п. Николаевка. Общая жесткость равна 12,63 ммоль/л. При этом карбонатная жесткость составляет 8,17 ммоль/л, постоянная – 4,47 ммоль/л, вода сильно минерализованная. Общая жесткость воды очистных сооружений составляет 9,77 ммоль/л, т.е. вода обусловлена в основном карбонатами, вода сильноминерализованная. Природную воду Ичалковского района можно отнести к среднеминерализованной. Общая жесткость равна 8,88 ммоль/л, карбонатная и постоянная жесткость близки по своим значениям.

Исследуемые воды отличаются по окисляемости. Высоким потреблением O_2 отличается сточная вода (387,43 мг O_2 /л). Лишь немного по окисляемости уступает вода Ичалковского района с. Селище – 361,9 мг O_2 /л. Низкое значение окисляемости для воды п. Николаевка – 40,1 мг O_2 /л. Вероятно, сточная вода и вода Ичалковского района сильно загрязнены органическими веществами, нефтепродуктами и неорганическими восстановителями. Наиболее высокое содержание агрессивной углекислоты установлено в сточной воде – 44,00 мг/л, что наполовину ниже содержания агрессивной углекислоты в воде Ичалковского района и п. Николаевка. Наиболее высокое значение электропроводности установлено в воде п. Николаевка – 1395 мкСм/см, для сточной воды – 1186 мкСм/см и 863,9 мкСм/см для воды Ичалковского района. Известно, что электрическая проводимость растет с увеличением концентрации электролита, по электропроводности можем судить о качестве природных и сточных вод. Наиболее минерализованными из изученных вод является вода п. Николаевка и сточная вода.

Анализ вод на содержание катионов и анионов показал, что наиболее высокое содержание ионов Ca^{2+} найдено в воде п. Николаевка и с. Селище Ичалковского района, ионы Na^+ в большом количестве содержатся в сточной воде. Также в ней преобладают ионы Mg^{2+} и Fe^{3+} , увеличено содержание Cl^- , SO_4^{2-} ионов. Фторид-ионы содержатся в большой концентрации в сточной воде – 7,52 мг/л. Вода с. Селище Ичалковского района и п. Николаевка является питьевой, но содержание F^- -ионов превышает ПДК более, чем в 3 раза. Достаточно высокая концентрация фосфат-ионов определена в сточной воде.

Таким образом, по результатам химического анализа можно сделать вывод, что исследуемые воды проявляют агрессивность по отношению к бетону, вызывают коррозию арматуры, могут снижать прочность и морозостойкость (рис. 2).

Для проведения исследований влияния вод на разрабатываемые защитные покрытия железобетонных резервуаров были подготовлены образцы цементных композитов, в которых в качестве наполнителя использовались цеолитсодержащие породы (ЦСП) Атяшевского

месторождения республики Мордовия (10, 20 и 30%). Природные цеолиты – новый тип полезных ископаемых, использование которых в промышленном и сельском хозяйстве началось только в 60-х годах прошлого столетия. Пористая микроструктура и другие особенности строения цеолитов определяют их уникальные адсорбционные катионообменные и каталитические свойства, обуславливающие их применение в промышленности, позволяя использовать их в качестве сорбентов для очищения воды [1]. Одновременно добавка цеолитсодержащих пород к цементным составам не только активизирует процесс твердения, но и улучшает микроструктуру, что приводит к увеличению прочности, коррозионной стойкости и непроницаемости цементного камня [2].



Рис. 2. Воздействие агрессивной среды на железобетонные конструкции (разрушение бетона и коррозия арматуры).

Продуктами гидратации цемента, в первую очередь, являются гидросиликаты, трехкальциевый высокоосновной алит $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и двухкальциевый белит $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Содержание в цементе Ca_3S составляет 62,5 % и Ca_2S – 14-15 %. Выщелачивание гидроксида кальция из бетона приводит к потере прочности бетона. При потере бетоном 33% CaO наступает его разрушение. При больших скоростях течения воды выщелачивание зависит от скорости отвода CaO с поверхности бетона [3; 4]. Согласно полученным экспериментальным данным (табл. 2), введение цеолитсодержащих пород позволяет уменьшить вымывание Ca^{2+} и замедляет процессы разрушения защитного слоя.

Известно также присутствие в воде солей (ионов), не вступающих в реакцию с элементами цементного камня, но повышающих ионную силу раствора, что увеличивает выщелачивание CaO , т.е. способствует коррозии бетона. Поэтому уменьшение присутствия ионов Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- при введении ЦСП способствует замедлению процессов разрушения бетона.

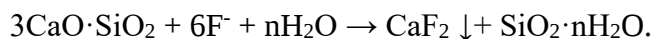
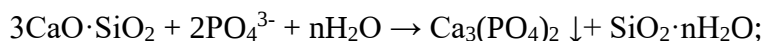
**Результаты анализа фильтра после выдерживания (56 суток)
цементного камня, наполненного ЦСП, в различных типах вод**

Вода	ЦСП, %	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺
Очистные сооружения, г. Саранск	0	246,616	314,368	41,469	35,150	Следовые кол-ва
	10	325,440	384,612	38,654	14,706	Следовые кол-ва
	20	283,678	308,501	37,173	21,675	Следовые кол-ва
	30	286,967	324,569	39,812	13,734	Следовые кол-ва
п. Николаевка, г. Саранск	0	203,575	276,797	31,759	27,532	Следовые кол-ва
	10	169,754	241,006	27,918	24,581	Следовые кол-ва
	20	142,753	185,055	28,087	29,979	Следовые кол-ва
	30	135,830	149,382	28,614	30,256	Следовые кол-ва
Ичалковский район, с. Селище	0	189,710	289,153	32,685	21,711	Следовые кол-ва
	10	147,227	225,419	27,158	5,672	Следовые кол-ва
	20	125,692	193,604	26,156	3,941	Следовые кол-ва
	30	152,658	221,590	27,171	1,843	Следовые кол-ва

При введении ЦСП в состав цементных покрытий для очистных сооружений концентрация фторид-ионов в воде повышается, что, вероятно, связано с понижением концентрации СаО в цементном камне, а значит, меньше образуется Са(ОН)₂ за счет гидратации цемента, и поэтому фторид-ионы меньше будут вступать в реакцию осаждения с образованием осадка СаF₂ ($K_s = 4 \cdot 10^{-11}$). Показано, что повышение концентрации фторид-ионов ярко выражено в сточной воде. Это является свидетельством того, что Са(ОН)₂ взаимодействует с фосфат-ионами с образованием малорастворимого осадка Са₃(РО₄)₂ ($K_s = 2 \cdot 10^{-29}$), а доля фторид-ионов в воде повышается, образуя в дальнейшем труднорастворимые новообразования, которые забивают поры, уплотняют его и увеличивают срок службы конструкций [5].

Вероятно, при контакте цементного камня с водой происходит разрушение гидросиликатов кальция, вымываются ионы кальция, которые с фосфат-, фторид-, сульфат-ионами воды образуют малорастворимые соли Са₃(РО₄)₂, СаF₂, СаSO₄, а свободный

гидроксид кальция остается в незначительном количестве, поэтому pH растворов повышается незначительно [6; 7]:



Фосфат кальция, фторид кальция и гель кремниевой кислоты заполняют поры бетона, вызывая их частичное закупоривание (кольматацию). Поэтому процесс разрушения бетона становится временно самотормозящимся [8].

Предлагаемые экспериментальные составы цементных композитов, наполненных ЦСП, целесообразно использовать в качестве защитного слоя в конструкциях очистных сооружений. Это позволит увеличить срок службы конструкций, эксплуатирующихся в условиях взаимодействия с агрессивными водами. При разработке предлагаемых покрытий конструкций железобетонных резервуаров предлагается вводить в состав торкрет-бетона цеолитсодержащие породы в пределах 20% для уменьшения корродируемости арматуры, увеличения плотности внутреннего слоя, повышения прочности и стойкости к воздействию агрессивных сред. Разрабатываемые составы покрытий позволят экономить до 20% цемента при получении железобетонных конструкций очистных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брэк Д. Цеолитовые молекулярные сита / пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 784 с.
2. Рабо Дж. Химия цеолитов и катализ на цеолитах / пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – Том 1. – 506 с.
3. Куприяшкина Л. И., Осипов А. К., Савинова О. Н., Седова А. А., Селяев В. П., Баландина А. В. Влияние концентрации солей магния на прочность цементного камня, наполненного цеолитсодержащей породой [Электронный ресурс] // Огарёв-online. – 2016. – № 19. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/vliyanie-koncentracii-solej-magniya-na-prochnost-cementnogo-kamnya-napolnennogo-ceolitsoderzhashhej-porodoj>.
4. Пеков И. В., Турчкова А. Г., Ловская Е. В. Цеолиты щелочных массивов. – М.: Экост, 2004. – 168 с.
5. Куприяшкина Л. И., Гарынкина Е. Н. Проблемы повышения стойкости бетона и железобетона в растворах щелочей // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы Четырнадцатой Международной научно-технической конференции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – С. 251–254.

6. Куприяшкина Л. И., Седова А. А., Куприяшкина Е. И., Гарынкина Е. Н. Действие магниезиальных солей на наполненные цементные композиты // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – С. 59–63.
7. Седова А. А., Иванов В. М., Селяев В. П., Осипов А. К., Куприяшкина Л. И. Изучение процессов повреждения цементного камня растворами карбоновых кислот // Вестник Моск. ун-та. Сер.2. Химия. – 2014. – Т.55, № 5. – С. 296–301.
8. Рахимбаев Ш. М. Процессы кольматации при химической коррозии цементных систем. Физическая модель // Бетон и железобетон. – 2013. – № 4. – С. 30–32.

ЛЕДЯЙКИН А. С., УТКИНА В. Н.

РАЗВИТИЕ ВЫСОТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В РОССИИ

Аннотация. Представлен обзор развития высотного строительства в России. Рассмотрены конструктивные решения, применяемые в высотных зданиях. Определены задачи и проблемы высотного строительства в стране.

Ключевые слова: высотное строительство, небоскреб, стальной каркас, железобетон, конструкции, проблемы, развитие.

LEDYAYKIN A. S., UTKINA V. N.

DEVELOPMENT OF HIGH-RISE CONSTRUCTION IN RUSSIA

Abstract. An overview of the development of high-rise construction in Russia is provided. The design solutions of high-rise buildings are considered. The objectives and problems of high-rise construction in the country are defined.

Keywords: high-rise construction, skyscraper, steel frame, reinforced concrete, constructions, problems, development.

Высотное строительство является символом процветания и экономического роста во всем мире. Строительство высотного здания является очень дорогим и технически сложным процессом. Оно требует высокого уровня развития промышленности, высокой квалификации проектировщиков и строителей. Небоскребы строятся во всех экономически развитых странах, таких как США, Китай, ОАЭ, Япония и других. Россия не является исключением. Сегодня в мире около 10 тысяч небоскребов, из них в России – 221. Она лидирует в Европе по высоткам, семь из десяти самых высоких башен на континенте находятся в России [1; 2].

Высотные здания и сооружения в нашей стране начали строить позже, чем в США. Первые высотки в Советском Союзе появились после окончания Великой Отечественной войны. В 1947 году была начата работа по проектированию и строительству первых восьми Сталинских высоток в Москве. Опираясь на зарубежный опыт строительства, необходимо было не повторять ошибок при возведении таких зданий.

Среди первых высоток выделяется комплекс зданий Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова на Воробьевых горах (рис. 1). В 1953 году завершилось строительство центральной части комплекса высотой 238 метров. Это сооружение оставалось самым высоким на континенте до 1990 года. В состав комплекса входит 27 основных построек. Главный корпус имеет 32 этажа, в нем размещены факультеты и

административные помещения. Монументальность здания просматривается в каждом его элементе, включая башню со шпилем высотой 57 м.



Рис. 1. МГУ им. М.В. Ломоносова (238 м, 1953 г.).

Для высотных зданий применялись каркасы из стали и железобетона. Стальной каркас являлся более индустриальным, но его применение связано с большим расходом стали. При проектировании высотных зданий в Москве конструкторы разработали новое, промежуточное по степени экономичности и индустриальности решение – железобетонный каркас с жесткой арматурой. Стальные конструкции каркасов высотных зданий были не только изготовлены, но и полностью смонтированы на сварке, имеющей значительные преимущества перед соединениями на заклепках – снижение веса, трудоемкости изготовления элементов и монтажа. Перекрытия проектировались монолитными железобетонными, жестко связанными с каркасом. Они обеспечивали пространственную жесткость здания и более равномерную работу всех элементов каркаса на горизонтальные усилия от ветровых нагрузок [3].

В течение 1956 – 1959 годов принималось решение о постройке нового телевизионного комплекса, который послужил бы заменой Шаболовки. В 1960 году в Москве было начато строительство Останкинской телебашни высотой 540 м (рис. 2). По проекту башня представляет собой форму перевернутого цветка лилии с толстым стеблем, переходящим в мощные лепестки-опоры. В первом варианте было всего четыре опоры, но затем их количество увеличили до десяти. Центр тяжести башни расположен на высоте 110 м.

В качестве основного материала был выбран предварительно напряженный железобетон. Башня опирается на неглубокий монолитный кольцевой железобетонный фундамент, имеющий ширину 9,5 м, высоту 3 м и диаметр 74 м. Фундамент заложен в грунт на глубину не более 4,65 метра. Устойчивость башни на опрокидывание обеспечивается за счет превышения массы основания над массой мачтовой конструкции и имеет шестикратный запас. Железобетонная опора всего сооружения представляет собой тонкостенную коническую оболочку, которая стоит десятью «ногами» на фундаменте. Диаметр нижнего основания оболочки равен 60,6 м, а на высоте 63 метра он составляет 18 м. Верхняя часть железобетонного ствола, начиная с высоты 321 м, выполнена в виде цилиндра с наружным диаметром 8,1 метра. В центре конического основания на самостоятельном фундаменте в виде круглой плиты диаметром 12 м и толщиной 1 м возведен железобетонный стакан высотой 63 м и диаметром 7,5 м. В нем расположены скоростные лифты, силовые кабели, кабели связи, шахта с водопроводными стояками и аварийная стальная лестница. Балки междуэтажных перекрытий опираются на стакан, лестничная клетка проходит между стаканом и конусным основанием. Сооружение отдельных фундаментов для двух независимых конструкций (башни и стакана) позволяет передать на грунт различное давление при их неравномерной осадке [4].



Рис. 2. Останкинская телебашня (540 м, 1960 –1967 г.).

В конце 1990-х годов было принято решение строительства Московского международного делового центра (ММДЦ) «Москва-Сити», где уже возведено 13 высотных объектов из 23-х запланированных. В 2003 году началось строительство уникального комплекса «Федерация» (рис. 3).

Это сооружение состоит из двух разновысотных трехгранных башен «Запад» и «Восток», расположенных на одном стилобате. «Запад» имеет высоту 243 метра и 63 этажа, а «Восток» – 374 метров и 97 этажей. Эти башни предполагалось соединить между собой вертикальной «стрелой» – шпилем высотой 506 метров, но от строительства шпиля затем было решено отказаться.



Рис. 3. Башня «Федерация» («Запад» – 243 м, «Восток» – 374 м, 2003 – 2017 гг.).

При возведении комплекса был использован специально разработанный бетон класса В90. Фундамент состоит из монолитного ростверка высотой 6 м и буронабивных свай диаметром 1,5 м и длиной 30 м. Основными несущими вертикальными элементами зданий являются монолитные стеновые конструкции центрального ядра и 25 колонн по периметру. Поэтажно все вертикальные конструкции объединены горизонтальными дисками перекрытий из монолитных плит. По всей высоте зданий через каждые 25 – 30 этажей предусмотрены аутригерные этажи из высокопрочных стальных конструкций. Они имеют повышенную жесткость, обеспечивающую расчетные параметры горизонтальных деформаций конструкций и устойчивости всего здания. Эти этажи технологически совмещены с техническими этажами, где размещаются инженерное оборудование и трассы

трубопроводов. Фасады башен сложной геометрической формы выполнены с применением новейших систем остекления, отражающих солнечное излучение и сохраняющих оптимальную температуру в здании. Ограждающие конструкции шестиуровневого стилобата также имеют сплошное остекление [5].

Оригинальное проектное решение применялось и в многофункциональном комплексе «Город Столиц». Он строился на берегу Москва-реки в 2005 – 2009 годах (рис. 4).



Рис. 4. Комплекс «Город Столиц» («Москва» – 302 м, «Санкт-Петербург» – 257 м, 2005 – 2009 гг.).

Этот комплекс состоит из двух башен «Москва» и «Санкт-Петербург» на общем стилобате. Высота башни «Москва» равна 302 м (73 этажа), а «Санкт-Петербург» – 257 м (65 этажей). 18-этажный стилобат имеет высоту 76 м.

Башни состоят из отдельных блоков прямоугольной формы, которые попеременно сдвигаются вокруг своей оси на уровне технических этажей. Здания имеют очень необычную геометрию, сложное конструктивное решение с пространственным каркасом и ядрами жесткости. Геометрическая форма башен позволяет обеспечить высокую прочность конструкции и создавать просторные помещения с панорамным остеклением [6].

Символом новой Москвы является и башня «Эволюция» (строительство 2011–2014 гг.). Спиралеобразная башня олицетворяет собой союз двух начал (рис. 5). Высота башни 255 м, каждый из 52-х этажей имеет поворот относительно предыдущего на 3 градуса. Таким образом, здание получилось «закрученным» более чем на 150 градусов. Основные несущие конструкции в виде центрального ядра и восьми колонн с 15-ти метровыми

пролетами между осями расположены строго вертикально на всю высоту. Только четыре угловых опоры повторяют спиралеобразную геометрию здания. На самом верху башни две асимметричные «арки» пролетом 41 м визуально объединяют два противоположных фасада [7; 8].

Принятый в 2010 г. генплан развития Москвы предполагает, что в столице появится около сотни небоскребов, будет закончено возведение ММДЦ «Москва-Сити» и начнется строительство «Большого Сити». Развивается высотное строительство и за пределами Москвы в крупных городах России, таких как Санкт-Петербург, Екатеринбург, Грозный и др.



Рис. 5. Башня «Эволюция» (255 м, 2011 – 2014 гг.).

Нельзя не отметить выдающийся проект общественно-делового комплекса «Лахта Центр», строящегося в Санкт-Петербурге на берегу Финского залива (рис. 6). В концепции центра отражены основные архитектурные мотивы северной столицы. Здесь мы видим одинокий шпиль в горизонтальном ландшафте и наклонные здания стилобатной части, которые символизируют корпус корабля. Современный комплекс максимально сливается с окружающей средой. Этот эффект будет усилен и за счет применения нового стекла. Высотное здание будет менять цвет в разное время суток, что создаст ощущение «живого» объекта.

«Лахта Центр» включает небоскреб и многофункциональное здание, которое разделено на Южный и Северный блоки. Небоскреб должен стать самым высоким зданием в

России и Европе. Его высота достигнет 462-х метров при 87 этажах. «Лахта Центр» планируется ввести в эксплуатацию в 3-м квартале 2018 года. На данный момент (декабрь 2017 года) продолжается монтаж шпиля. Установлен 7-й ярус колонн. Общая высота небоскреба достигла 422 метров [9].

Башня имеет уникальные конструктивные решения. Коробчатый фундамент состоит из трех железобетонных плит, установлен на 264 буронабивных сваи, каждая глубиной 82 м и диаметром 2 м. Пространства между плитами фундамента образуют подземные этажи. Небоскреб имеет железобетонное ядро с высшей степенью огнестойкости, внутри которого находятся технические помещения и зоны безопасности, коммуникации и вертикальный транспорт. Горизонтальную жесткость обеспечивают аутригерные этажи, расположенные через каждые 70 м по высоте. Устойчивость башни должна быть обеспечена даже при удалении 30 % опорных конструкций. В состав башни входят 189 тысяч металлоконструкций и балок перекрытий, но одинаковых – только две. Это объясняется тем, что здание закручивается, и каждое перекрытие отличается от следующего на 3 градуса. Более трети комплекса займут общественные пространства: планетарий, открытый амфитеатр, обзорная площадка, а также универсальный зал для конгрессов, театральных и музыкальных представлений



Рис. 6. «Лахта Центр» (462 м, 2012 – 2018 гг.).

За период с 1947 по 2017 гг. был накоплен бесценный опыт проектирования, строительства и эксплуатации высотных зданий в России. Интерес к этой теме наглядно продемонстрировал прошедший в Екатеринбурге в октябре 2017 г. Международный форум «100+ Forum Russia», на котором определены основные задачи, проблемы и перспективы развития высотного строительства.

Основными задачами современного высотного строительства являются: повышение надежности зданий и сооружений; применение передовых архитектурных и конструктивных решений с учетом таких особенностей, как совместная работа несущих конструкций, очень высокая нагрузка на конструкции, фундаменты и основания, превалирующее значение горизонтальных нагрузок; эффективное использование энергии на отопление и вентиляцию; обеспечение безопасности людей.

Отмечается и ряд проблем. В первую очередь, это несовершенство нормативной документации по проектированию и строительству высотных зданий. Во-вторых, вопрос обеспечения пожарной безопасности. В настоящее время идет активная работа по созданию отечественной нормативной базы по высотному строительству [10; 11].

Другая проблема – это сложность размещения небоскребов в существующей городской застройке. Большинство городов России имеет сложившийся исторический центр, который совпадает с наиболее удачными местами для строительства высотных объектов. На окраинах городов высотные здания являются менее привлекательными для людей, экономически неоправданными, отсюда возникает сложный выбор [12].

Но, несмотря на проблемы, темпы развития строительства высотных зданий в России растут. Этому содействует развитие материально-технической базы, повышение стоимости городской земли в крупных городах страны, совершенствование существующих и изобретение новых, более эффективных, строительных материалов, конструкций и инновационных технологий, а также использование современных программных комплексов и информационного моделирования в строительном проектировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современное высотное строительство. – М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007. – 440 с.
2. Ледяйкин А. С., Уткина В. Н. Обзор зарубежного опыта проектирования высотных зданий [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2017. – №11. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/obzor-zarubezhnogo-opyta-proektirovaniya-vysotnyx-zdaniy>.

3. История строительства высотки МГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masterok.livejournal.com/658447.html>.
4. Строительство Останкинской башни [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://varlamov.ru/98913.html>.
5. Комплекс «Федерация». Инженерные решения башни «Восток» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://zvt.abok.ru/articles/331/Kompleks_Federatsiya_Inzhenernie_resheniya_bashni_Vostok.
6. Генералов В. П. Особенности проектирования высотных зданий: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самарск. гос. арх.-строит. ун-та, 2009. – 296 с.
7. Сапожникова А. Символы новой Москвы. // Высотные здания. – 2007. – № 6. – С. 46–51.
8. Башня Эволюция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Башня_Эволюция.
9. Лахта Центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lakhta.center/ru/>.
10. Потапова Ю. И. Высотное строительство в России – проблемы, задачи и способы их решения // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 14–16.
11. Исаков А. И. Высотное строительство в России // Синергия наук. – 2016. – № 6. – С. 442–458.
12. Левада Г. П., Костина Л. К., Тарасов М. В. Определение наиболее рациональной этажности современных офисных зданий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 5–12.

ЧЕРНОВ А. Н., НИЗИНА Т. А., НИЗИН Д. Р., ПОПОВА А. И., АНТИПОВ И. О.
ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ИЗМЕНЕНИЕ ДЕКОРАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОКСИДНЫХ
КОМПОЗИТОВ В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ¹

Аннотация. Приведены результаты исследования изменений декоративных характеристик полимеров на основе эпоксидных смол. Установлены зависимости между изменением колориметрических характеристик и интенсивностью солнечной радиации, ультрафиолета А и В. Произведена оценка количественного влияния различных климатических факторов на цветовые характеристики декоративных покрытий. Разработанные математические модели характеризуются высокими коэффициентами детерминации, что позволяет достичь высокой степени аппроксимации.

Ключевые слова: защитно-декоративные покрытия, эпоксидные связующие, климатические факторы, интенсивность солнечной радиации, ультрафиолет А, ультрафиолет В, цветовая насыщенность, яркость.

CHERNOV A. N., NIZINA T. A., NIZIN D. R., POPOVA A. I., ANTIPOV I. O.
THE EFFECT OF INTENSITY OF ACTINOMETRIC PARAMETERS
ON CHANGE OF DECORATIVE CHARACTERISTICS
OF EPOXY COMPOSITES UNDER CLIMATIC ACTION

Abstract. The study results of the changes in the decorative characteristics of epoxy polymers are presented. The dependencies between the change in the colorimetric characteristics and the intensity of solar radiation, ultraviolet A and B, were established. The quantitative influence of various climatic factors on the color characteristics of decorative coatings was assessed. The developed mathematical models are characterized by high coefficients of determination, which allows achieving a high degree of approximation.

Keywords: protective and decorative coatings, epoxy binders, climatic factors, intensity of solar radiation, UV A, UV B, color saturation, brightness.

За последние полвека полимерные материалы плотно вошли во все отрасли экономики. Огромное разнообразие видов полимеров делает область их применения практически неограниченной [1–3]. Благодаря высокой химической стойкости полимерные композиты широко используются в качестве защитных покрытий [1; 2]. Одним из основных

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-01050 «Исследование влияния интенсивности воздействия климатических факторов на характер разрушения полимерных композитов и прогнозирование их долговечности в условиях натурального воздействия».

недостатков существующих полимерных композитов является низкая стабильность их свойств в натуральных условиях эксплуатации [4]. Интенсивное воздействие солнечной радиации, влажности, повышенных температур и других агрессивных факторов инициирует процессы деструкции в композите, что приводит к существенному снижению эксплуатационных качеств [5–9]. Повышение срока службы изделий и конструкций может быть достигнуто при рациональном подходе к выбору применяемых материалов, способов защиты и их эффективности в различных климатических условиях.

В процессе климатического старения в полимерах происходит изменение химической структуры, вызванное действием различных агрессивных факторов, которые могут существенно различаться в зависимости от климатической зоны и сезонности [9–11]. Известно, что на физико-механические характеристики полимерных композиционных материалов наибольшее влияние оказывают влажность и температура [12; 13]. Вместе с тем, практика показывает, что на изменение декоративных характеристик влияние оказывает не только температурно-влажностный режим, но и интенсивность солнечного излучения [14–18]. В результате действия солнечной радиации в поверхностном слое полимера происходят фотохимические реакции, инициирующие распад молекулярных связей и разориентацию полимерных волокон в структуре композита [9; 13]. От длины волны и энергии попавшего на полимер излучения зависит характер изменений химической структуры [9]. Световое излучение видимого диапазона слабо поглощается эпоксидными композитами, вследствие чего не оказывает на них заметного влияния. Коротковолновое излучение с длиной волны менее 300 нм практически полностью задерживается озоновым слоем. Наиболее интенсивное воздействие на полимеры оказывает ультрафиолет, имеющий длину волны 300÷400 нм [16; 18]. Несмотря на то, что большая его часть так же поглощается озоновым слоем, ультрафиолет оказывает наиболее пагубное воздействие на органические вещества. Энергии ультрафиолетового излучения достаточно для разрыва многих молекулярных связей.

Как показывает практика, в результате длительного воздействия солнечного излучения на полимерные композиты происходит значительное изменение их декоративных характеристик, что, как правило, свидетельствует о протекании процессов деструкции в материале [18–20]. Анализ изменения цветовых характеристик имеет высокое значение для прогнозирования свойств материалов в процессе их климатического старения.

Существует три основных способа оценки колориметрических характеристик: визуальное определение и описание; сравнение с эталоном; количественное измерение [6]. Однако только последний способ позволяет с достаточной точностью определять изменение цветовых параметров вне зависимости от субъективности производящего измерения. На

сегодняшний день для оценки декоративных характеристик достаточно широко используются компьютерные программы [21–25].

В рамках проведенных исследований на климатической площадке эколого-метеорологической лаборатории Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва с апреля 2015 года в течение 12 месяцев экспонировались четыре группы образцов полимерных материалов – композиты на основе низковязкой эпоксидной смолы Этал-247 с отвердителями трех видов (Этал-1472, Этал-45 TZ2, Этал-2МК), формирующие черный, коричневый и прозрачный цвет покрытия (табл. 1). Четвертый вид исследуемого композита представляет собой двухкомпонентное полимерное покрытие для полов «Полидек ЭП-500» и имеет серый цвет.

Таблица 1

Составы исследуемых полимерных композитов

Номер состава	Цвет композита	Вид эпоксидного связующего	Вид отверждающей системы
1	Черный	Этал-247	Этал-1472
2	Коричневый	Этал-247	Этал-45TZ2
3	Серый	Полидек ЭП-500	
4	Прозрачный	Этал-247	Этал-2МК

Для оценки воздействия интенсивности климатических факторов использовалась автоматическая станция контроля загрязнения атмосферного воздуха с актинометрическим комплексом в составе, позволяющим производить мониторинг метеорологических параметров и загрязняющих веществ в окружающем воздухе в круглосуточном режиме [26]. В ходе натурного экспонирования производилось фиксирование значений суммарной солнечной радиации и ультрафиолетовых излучений диапазонов А и В с частотой в 10 минут. Оценка изменения колориметрических характеристик экспонируемых образцов осуществлялась с помощью программного комплекса «Статистический анализ цветовых составляющих лакокрасочных покрытий» [27]. После определенных сроков экспонирования образцы сканировались с разрешением 2400 dpi с помощью полноцветного планшетного сканера Epson Perfection V330 Photo. Для количественной оценки колориметрических характеристик и яркости использовалась цветовая модель СМУКН, наиболее подходящая для оценки отражаемого светового излучения.

Цветовое различие по насыщенности определялось путем сравнения цветовой насыщенности исследуемого покрытия с абсолютно белым, имеющим максимальную плотность распределения ($f(X)=100\%$) при $X=255$ [6]:

$$S_p = \frac{\sum_{i=0}^{255} (255 - X_{pi}) \cdot f(X_{pi})}{255 \cdot 100} \quad (1)$$

где X_{pi} – уровень цветовой составляющей, изменяющийся от 0 до 255;

$f(X_{pi})$ – плотность распределения.

Цветовая насыщенность определялась по формуле:

$$E_{СМУКН} = \sqrt{S_C^2 + S_M^2 + S_Y^2 + S_K^2 + S_H^2}, \quad (2)$$

где S_C , S_M , S_Y , S_K и S_H – цветовое различие по насыщенности голубой, пурпурной, желтой, черной составляющих и яркости.

В ходе экспериментального исследования производилась оценка изменения декоративных характеристик эпоксидных композитов различных цветов в процессе климатического старения. Для этого определялось изменение цветовой насыщенности $\Delta E_{СМУКН}^t$ и яркости ΔS_H^t по формулам:

$$\Delta E_{СМУКН}^t = E_{СМУКН}^{t=0} - E_{НСМУК}^t, \quad (3)$$

$$\Delta S_H^t = S_H^{t=0} - S_H^t. \quad (4)$$

На основании полученных данных были построены графики изменения цветовой насыщенности и яркости от длительности экспонирования (рис. 1), описываемые экспоненциальной зависимостью вида:

$$\Delta E_{СМУКН}^t = E_0 \cdot \exp(\alpha_X \cdot X^{\beta_X}), \quad (5)$$

где E_0 , α_X , β_X – коэффициенты, зависящие от вида исследуемого материала и переменного фактора X , который может быть отождествлен со временем экспонирования (T , сутки), дозой суммарной солнечной радиации (Q , МДж/м²) или ультрафиолетовых излучений диапазонов A (U_A , МДж/м²) и B (U_B , кДж/м²).

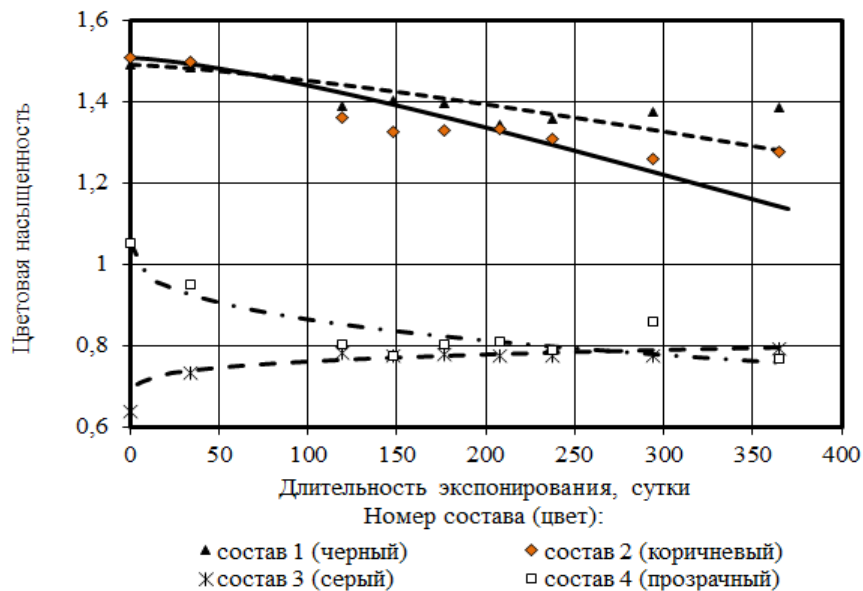
Полученные экспоненциальные кривые свидетельствуют (рис. 1) о значительном снижении цветовой насыщенности образцов черного и коричневого цветов, несмотря на стабильность их декоративных показателей в первые месяцы исследований. Для композитов составов 3 и 4 (серый и с прозрачный), напротив, наблюдается интенсивное снижение декоративных характеристик в начале экспонирования. Вместе с тем, после достижения определенных значений цветовая насыщенность данных составов стабилизируется, в то время как аналогичные характеристики образцов черного и коричневого цветов продолжают снижаться. Показатели яркости для всех составов снижались менее интенсивно, при этом для составов 2 и 4 изменения данной характеристики практически не наблюдаются.

Очевидно, что при экспонировании образцов в натуральных условиях необходимо учитывать интенсивность климатических факторов, которая может значительно колебаться в зависимости от времени суток и погодных условий. Графики изменения цветовой насыщенности и яркости в зависимости от интенсивности суммарной солнечной радиации

представлены на рис. 2.

Кривые зависимости цветовой насыщенности и яркости эпоксидных композитов от актинометрических параметров, описываемые уравнением (5), имеют ббольшую сходимость с полученными экспериментальными данными, чем кривые зависимости от длительности экспонирования, что подтверждается более высокими коэффициентами детерминации (табл. 2).

а)



б)

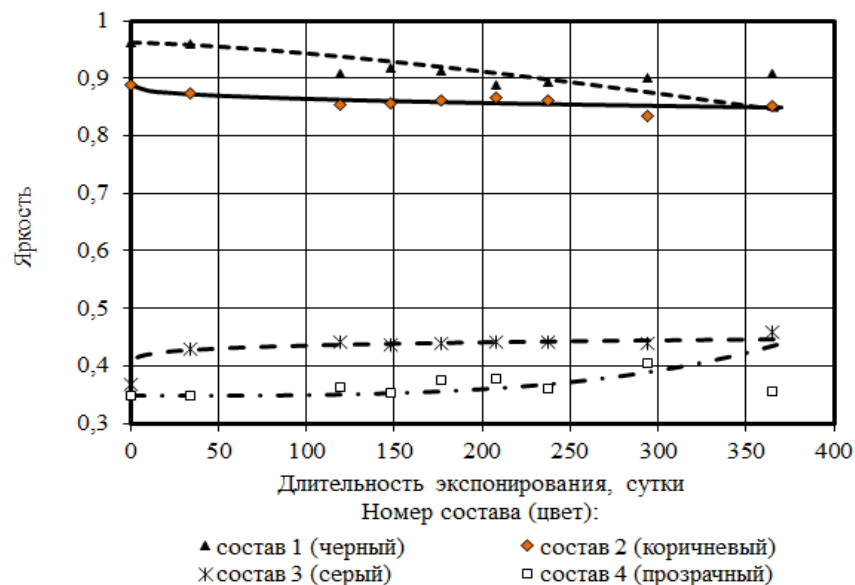


Рис. 1. Изменение цветовой насыщенности (а) и яркости (б) эпоксидных композитов в зависимости от длительности экспонирования в натуральных условиях.

График зависимости яркости эпоксидных композитов от интенсивности солнечной радиации, представленный на рисунке 2(б), позволяет сделать вывод о сравнительно не высоком влиянии солнечного излучения на данный показатель. По результатам проведенных исследований установлена зависимость изменения яркости от исходной цветовой

насыщенности образцов – для составов с низкими значениями цветовой насыщенности зафиксировано увеличение яркости, составы с более насыщенным цветом покрытия, напротив, демонстрируют ее снижение.

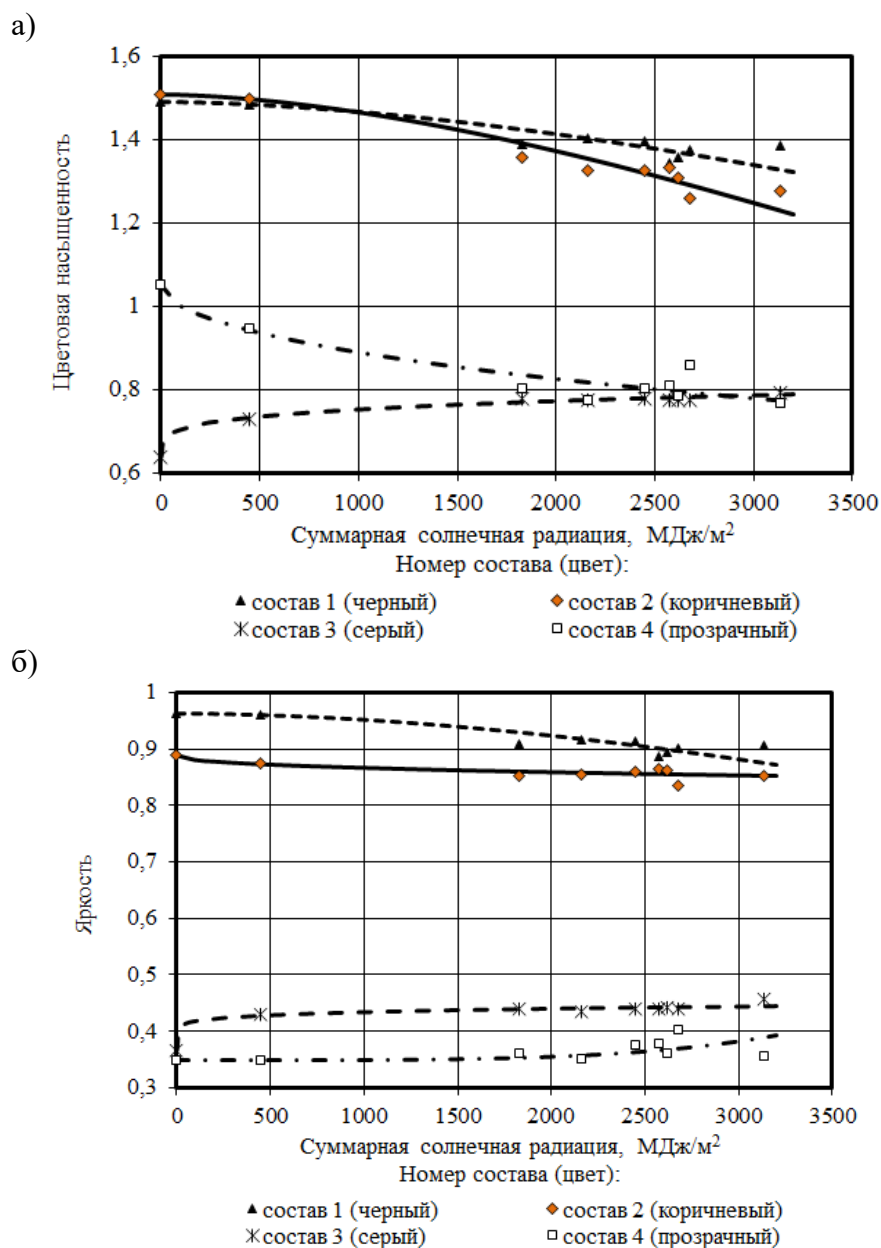


Рис. 2. Изменение цветовой насыщенности (а) и яркости (б) эпоксидных композитов в зависимости от интенсивности суммарной солнечной радиации.

При анализе полученных данных установлено, что образцы черного и коричневого цветов менее подвержены воздействию солнечной радиации на начальном этапе экспонирования, что, вероятно, связано с большей прочностью химических и структурных связей в поверхностном слое по сравнению с образцами других составов. Несмотря на значительное снижение декоративных характеристик в ходе первых месяцев натурного экспонирования, образцы составов 3 и 4 (серый и прозрачный) являются более стойкими при

длительной эксплуатации в натуральных условиях. Согласно А. Н. Мелкумову [9], при климатическом старении в материале одновременно происходят процессы деструкции и структурообразования. Очевидно, что стабилизация колориметрических характеристик составов 3 и 4 связана с уравниванием данных процессов в структуре эпоксидных композитов.

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения (5), описывающего влияние актинометрических параметров и длительности экспонирования в натуральных условиях на декоративные характеристики эпоксидных композитов

Номер состава	Вид эпоксидного компози́та (цвет)	Переменный фактор	Коэффициенты уравнения (5)			R^2
			E_0	α_x	β_x	
Цветовая насыщенность						
1	Этал-247 + Этал-1472 (черный)	T, сутки	1,489	$-5,21 \times 10^{-5}$	1,351	0,795
		Q, МДж/м ²		$-1,06 \times 10^{-7}$	1,725	0,941
		U _A , МДж/м ²		$-1,55 \times 10^{-5}$	1,758	0,941
		U _B , кДж/м ²		$-3,44 \times 10^{-7}$	1,594	0,966
2	Этал-247 + Этал-45TZ2 (коричневый)	T, сутки	1,507	$-7,94 \times 10^{-5}$	1,384	0,867
		Q, МДж/м ²		$-1,94 \times 10^{-7}$	1,723	0,976
		U _A , МДж/м ²		$-2,78 \times 10^{-5}$	1,758	0,978
		U _B , кДж/м ²		$-6,80 \times 10^{-7}$	1,581	0,989
3	Полидек ЭП-500 (серый)	T, сутки	0,638	$7,90 \times 10^{-2}$	0,172	0,803
		Q, МДж/м ²		$3,68 \times 10^{-2}$	0,216	0,920
		U _A , МДж/м ²		$6,84 \times 10^{-2}$	0,222	0,929
		U _B , кДж/м ²		$4,32 \times 10^{-2}$	0,198	0,929
4	Этал 247 + Этал-2МК (прозрачный)	T, сутки	1,051	$-3,20 \times 10^{-2}$	0,394	0,620
		Q, МДж/м ²		$-4,31 \times 10^{-3}$	0,529	0,811
		U _A , МДж/м ²		$-1,96 \times 10^{-2}$	0,542	0,821
		U _B , кДж/м ²		$-6,01 \times 10^{-3}$	0,493	0,846
Яркость						
1	Этал-247 + Этал-1472 (черный)	T, сутки	0,962	$-2,51 \times 10^{-5}$	1,445	0,793
		Q, МДж/м ²		$-3,23 \times 10^{-8}$	1,849	0,942
		U _A , МДж/м ²		$-6,68 \times 10^{-6}$	1,885	0,943
		U _B , кДж/м ²		$-1,12 \times 10^{-7}$	1,710	0,969
2	Этал-247 + Этал-45TZ2 (коричневый)	T, сутки	0,889	$-5,05 \times 10^{-3}$	0,379	0,565
		Q, МДж/м ²		$-1,30 \times 10^{-3}$	0,429	0,538
		U _A , МДж/м ²		$-4,49 \times 10^{-3}$	0,445	0,544
		U _B , кДж/м ²		$-1,83 \times 10^{-3}$	0,395	0,535
3	Полидек ЭП-500 (серый)	T, сутки	0,367	$1,06 \times 10^{-1}$	0,105	0,648
		Q, МДж/м ²		$7,70 \times 10^{-2}$	0,113	0,543
		U _A , МДж/м ²		$1,06 \times 10^{-1}$	0,116	0,550
		U _B , кДж/м ²		$8,81 \times 10^{-2}$	0,097	0,478
4	Этал 247 + Этал-2МК (прозрачный)	T, сутки	1,115	$-1,36 \times 10^{-9}$	1,361	0,751
		Q, МДж/м ²		$-6,63 \times 10^{-16}$	4,070	0,880
		U _A , МДж/м ²		$-8,68 \times 10^{-11}$	4,140	0,876
		U _B , кДж/м ²		$-1,03 \times 10^{-14}$	3,764	0,905

В результате проведенных исследований установлено, что при климатическом старении наряду с длительностью натурной экспозиции необходимо учитывать интенсивность климатических факторов, что подтверждается более высокими значениями коэффициентов детерминации, полученными для кривых, описывающих изменение колориметрических характеристик от влияния актинометрических параметров по сравнению с аналогичными зависимостями от длительности экспонирования. Оценка полученных в ходе экспериментальных исследований данных позволяет сделать вывод о влиянии цвета покрытия на характер изменения декоративных характеристик при действии климатических факторов. Количественная оценка интенсивности солнечной радиации, ультрафиолета А и В имеет большое значение для прогнозирования изменений декоративных характеристик полимерных композитов в условиях натурального экспонирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Говарикер В. Р., Висванатхан Н. В., Шридхар Дж. Полимеры: Научное издание. – М.: Наука, 1990. – 396 с.
2. Соломатов В. И., Селяев В. П., Соколова Ю. А. Химическое сопротивление материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 2001. – 384 с.
3. Хозин В. Г. Усиление эпоксидных полимеров. – Казань: Дом печати, 2004. – 446 с.
4. Селяев В. П., Низина Т. А., Егунова Е. А. Сопротивление полиуретановых композитов действию УФ-облучения // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 4–9.
5. Павлов И. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. – М.: Химия, 1982. – 220 с.
6. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 260 с.
7. Карякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
8. Низина Т. А., Зимин А. Н., Селяев В. П., Низин Д. Р. Анализ декоративных характеристик эпоксиуретановых покрытий, работающих в условиях воздействия ультрафиолетового облучения // Известия КазГАСУ. – 2011. – № 3. – С. 139–144.
9. Мелкумов А. Н., Татевосьян Г. О. Старение изделий из пластмасс в климатических условиях Узбекистана. – Т.: Узбекистан, 1975. – 177 с.
10. Низин Д. Р., Артамонов Д. А., Чернов А. Н., Низина Т. А. Результаты натурных испытаний полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных

связующих // Огарёв-online. Раздел «Технические науки». – 2014. – Спецвыпуск. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/rezultaty-naturnykh-ispytaniij-polimernykh-kompozicionnykh-materialov-na-osnove-ehpoksidnykh-svyazuyushhikh>.

11. Старцев О. В., Мелетов В. П., Перов Б. В., Машинская Г. П. Исследование механизма старения органотекстолита в субтропическом климате // Механика композитных материалов (Рига). – 1986. – № 3. – С. 462–467.

12. Старцев О. В., Медведев И. М., Кротов А. С., Панин С. В. Зависимость температуры поверхности образцов от характеристик климата при экспозиции в натуральных условиях // Коррозия: материалы, защита. – 2013. – № 7. – С. 43–47.

13. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 1. – С. 34–40.

14. Низина Т. А., Старцев В. О., Низин Д. Р., Молоков М. В., Артамонов Д. А. Исследование изменения цветовых характеристик модифицированных эпоксидных композитов, экспонированных в условиях морского климата // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 107–114.

15. Низина Т. А., Селяев В. П., Низин Д. Р., Артамонов Д. А. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных связующих // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 34–42.

16. Низина Т. А., Старцев В. О., Селяев В. П., Старцев О. В., Низин Д. Р. Анализ влияния актинометрических параметров на интенсивность изменения цветовых характеристик эпоксидных композитов в условиях морского климата // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 5. – С. 95–101.

17. Старцев В. О., Низина Т. А., Старцев О. В. Цветовой критерий климатического старения эпоксидного полимера // Пластические массы. – 2015. – №7-8. – С. 45–48.

18. Низина Т. А., Селяев В. П., Низин Д. Р., Чернов А. Н. Моделирование влияния актинометрических параметров на изменение декоративных характеристик эпоксидных композитов, экспонированных в натуральных условиях // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 2. – С. 27–36.

19. Низина Т. А., Селяев В. П., Низин Д. Р., Чернов А. Н. Влияние цвета полимерных композиционных материалов на режим эксплуатации защитно-декоративных покрытий в условиях воздействия натуральных климатических факторов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 1. – С. 59–67.

20. Низина Т. А., Селяев В. П., Низин Д. Р., Чернов А. Н. Влияние цвета покрытия и интенсивности актинометрических параметров на температуру перегрева поверхности защитно-декоративных покрытий на основе эпоксидных связующих // Вестник Приволжского территориального отделения РААСН. – Вып. 19. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2016. – С. 248–257.
21. Селяев В. П., Низин Д. Р., Чернов А. Н., Карпов Д. С., Ситникова О. Н. Анализ методов оценки колориметрических характеристик полимерных композитов, экспонированных в натуральных климатических условиях // Повышение надежности и безопасности транспортных сооружений и коммуникаций: материалы I Междунар. науч.-техн. конф., Т. 2. – Саратов, 2015. – С. 223–227.
22. Фролкин О. А. Компьютерное моделирование и анализ структуры композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Саранск, 2000. – 223 с.
23. Селяев В. П., Низина Т. А., Зубанкова Н. О. Использование метода прямого сканирования для оценки изменения цветовых характеристик лакокрасочного покрытия под действием климатических факторов // Вестник отделения строительных наук. – Вып. 8. – Москва, 2004. – С. 355–361.
24. Селяев В. П., Низина Т. А., Зубанкова Н. О. Методика обобщенной оценки декоративных характеристик лакокрасочных покрытий на основе компьютерных технологий // Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – № 6. – С. 40–45.
25. Селяев В. П., Низина Т. А., Егунова Е. А. Метод компьютерного экспресс-анализа декоративных характеристик защитных покрытий // Вестник МГСУ. – 2012. – № 1. – С. 153–158.
26. Низина Т. А., Селяев В. П. Материальная база вуза как инновационный ресурс развития национального исследовательского университета // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 115–121.
27. Селяев В. П., Низина Т. А., Зубанкова Н. О., Ланкина Ю. А. Статистический анализ цветовых составляющих лакокрасочных покрытий // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610820 от 28.02.2006 г. в Роспатенте по заявке № 2005613472 от 29.12.2005 г.

КИЛЬДЕЕВ И. Р., ТЕРЕШКИН И. П., ПАНЧИНА А. А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХИМИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ БЕЗГИПСОВЫХ
ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ С НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТЬЮ¹

Аннотация. Представлены результаты исследований безгипсового портландцемента с комплексной добавкой из лигносульфоната и силиката натрия по влиянию на физико-механические свойства и химическое сопротивление композитов на основе цементных вяжущих. Показана возможность получения композитов на основе безгипсового портландцемента с комплексной добавкой, обладающих улучшенными физико-механическими характеристиками.

Ключевые слова: безгипсовый портландцемент, комплексная добавка, лигносульфонат, силикат натрия, цемент, бетоны, модификация, прочность.

KILDEYEV I. R., TERESHKIN I. P., PANCHINA A. A.
STUDY OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND CHEMICAL
RESISTANCE OF COMPOSITES BASED ON PLASTERLESS PORTLAND CEMENT
BINDERS WITH LOW WATER CONSUMPTION

Abstract. The results of studies of the effect of plasterless Portland cement with a complex additive of lignosulfonate and sodium silicate on the physical and mechanical properties and chemical resistance of composites based on cement binders are provided. The possibility of obtaining composites based on plasterless Portland cement with a complex additive with improved physical and mechanical characteristics is shown.

Keywords: plasterless Portland cement, complex additive, lignosulfonate, sodium silicate, cement, concrete, modification, strength.

Решение вопросов снижения материалоемкости и себестоимости строительных конструкций на основе цемента с одновременным повышением их качества и эксплуатационной надежности в настоящее время является особенно актуальным в строительном производстве [1–8]. Одним из перспективных способов (технологией) производства высокоэффективных и долговечных строительных конструкций и изделий на основе портландцементных вяжущих является комплексная химизация технологии их производства при использовании безгипсового портландцементного вяжущего (клинкера) с серийной промышленной тонкостью помола [1–3].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке НИР по договору №266/17 от 18.12.2017 г.

Ранее нами были проведены исследования влияния количества пластифицирующей добавки и ускорителя твердения на некоторые свойства композиций на основе безгипсового портландцемента промышленной тонкости помола, доказана эффективность применения некоторых из них при получении вяжущего с низкой водопотребностью (ВНВ) для строительных композитов [1; 2]. В данной статье приводятся результаты последующих исследований влияния многокомпонентных добавок на физико-механические свойства и химическое сопротивление композитов на основе безгипсового портландцемента промышленной тонкости помола (молотого клинкера для портландцемента ЦЕМ I 32.5 Н) с комплексной добавкой из лигносульфоната технического (ЛСТ) и силиката натрия.

В работе исследовалось влияние многокомпонентного модификатора, состоящего из пластифицирующей добавки (0,45% от массы вяжущего) и ускорителя твердения (1,8% от массы вяжущего) при водоцементном отношении сырьевых смесей экспериментальных композиций 0,28 и 0,25. Для сравнения получаемых результатов был приготовлен контрольный состав на основе портландцемента без минеральных добавок ЦЕМ I 32.5 Н при водоцементном отношении 0,28. Результаты основных свойств композитов на основе разработанных вяжущих представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики композитов

№	Свойство, единица измерения	Композиции на основе		
		цемента при В/Ц=0,28	безгипсового цемента и комплексной добавки, В/Ц=0,28	безгипсового цемента и комплексной добавки, В/Ц=0,25
1	Твердость, Т МПа	154,44	201,69	208,34
2	Модуль деформации, E_{g15} МПа	2357,84	3484,96	3504,32
3	Доля упругой составляющей в общей деформации, ε_y	0,1167	0,1294	0,1303
4	Доля высокоэластичной составляющей деформации, $\varepsilon_{вэ}$	0,0057	0,0021	0,0019
5	Доля пластической составляющей деформации, $\varepsilon_{пл}$	0,877	0,868	0,878
6	Предельная деформация разрушения, $\varepsilon_{пр}$	0,0175	0,0155	0,0156
7	Предельная пластическая деформация материала, $\varepsilon_{пл.пр}$ МПа·с	0,0156	0,0135	0,0129
8	Коэффициент структуры, $K_{стр.}$	15,61	14,37	16,12
9	Коэффициент энергоемкости материала, $K_{эн}$ Дж/м ³	0,724	0,835	0,869
10	Коэффициент пластичности, $K_{пл}$	0,0769	0,0742	0,0784
11	Прочность при сжатии, $R_{сж}$ МПа	41,31	53,95	55,73

Анализ полученных значений твердости и модуля упругости цементных композитов позволяет констатировать, что полученные образцы на основе экспериментальных составов с безгипсовым портландцементом и комплексной добавкой имеют повышенную твердость и прочность, значения которых повышаются при снижении водопотребности вяжущего. Похожий эффект объясняется образованием наиболее оптимальной структуры цементного камня, которая создается при твердении у композиций с эффективными комплексными добавками при низком водоцементном отношении. Об увеличении значений модуля упругости у композитов на основе безгипсового вяжущего с пластифицирующей и ускоряющей добавками более чем на 40% свидетельствуют диаграммы сжатия, представленные на рисунке 1.

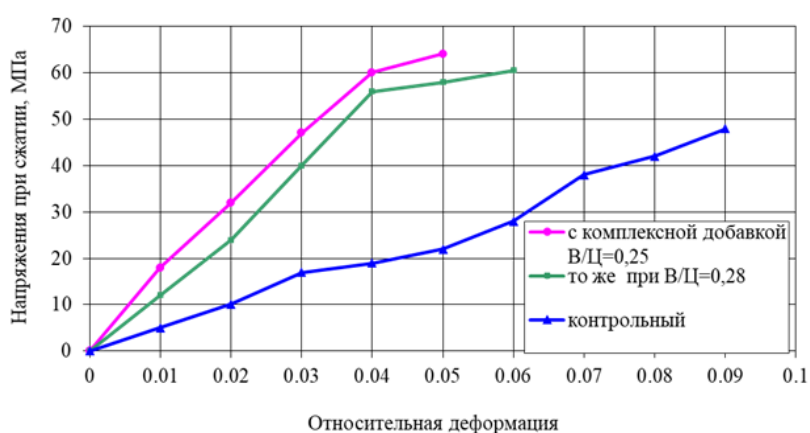


Рис. 1. Зависимость относительных деформаций композитов от напряжений сжатия.

При исследовании поровой структуры композитов на основе безгипсового портландцемента с комплексной добавкой были получены характеристики порового пространства полученных экспериментальных образцов. Значения, характеризующие поровую структуру композитов, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики поровой структуры цементных композитов

№	Свойство, единица измерения	Композиции на основе		
		цемента при В/Ц=0,28	безгипсового цемента с комплексной добавкой при В/Ц=0,28	безгипсового цемента с комплексной добавкой при В/Ц=0,25
1	Водопоглощение по массе, W_b , %	13,91	12,15	10,83
2	Объемное водопоглощение, W_0 , %	28,81	23,49	19,37
3	Равновесное поглощение, W_p , %	8,37	9,61	8,66
4	Истинная пористость, Π_n , %	29,02	29,96	24,25
5	Коэффициент микропористости, K_m	0,607	0,791	0,8
6	Показатель среднего размера пор, λ_2	2,445	1,949	1,327
7	Однородность пор по размерам, α	0,551	0,677	0,731

Изучение значений показателя равновесного водопоглощения и коэффициента микропористости позволяет сделать вывод о том, что введение комплексной добавки в безгипсовые цементные композиции приводит к повышению числа закрытых (условно-замкнутых) пор. Снижение показателя среднего размера пор и увеличение показателя однородности пор по размерам свидетельствует об организации оптимальной структуры порового пространства цементного камня при наличии такой комплексной добавки.

С целью подтверждения данного вывода были проведены изучения химической стойкости композитов на основе экспериментального ВНВ в 2% серной кислоте. После 28 суток твердения в нормально-влажностных условиях исследуемые образцы погружали в раствор кислоты и выдерживали в нем 84 суток. Концентрацию агрессивной среды при этом поддерживали постоянной в течение всего периода испытаний. Через определенные промежутки времени проводились испытания образцов на сжатие для получения деградационной функции $D(N)$. Результаты коррозионных испытаний приведены на рисунках 2 и 3.

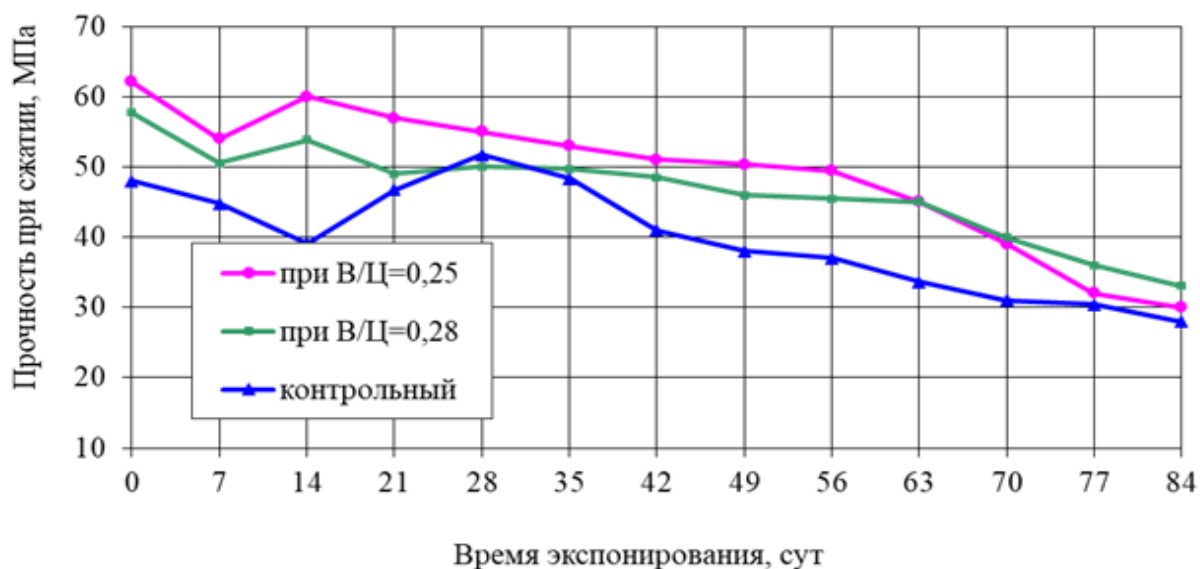


Рис. 2. Зависимость прочности композитов на основе безгипсового портландцемента с комплексной добавкой при экспонировании в 2% растворе серной кислоты.

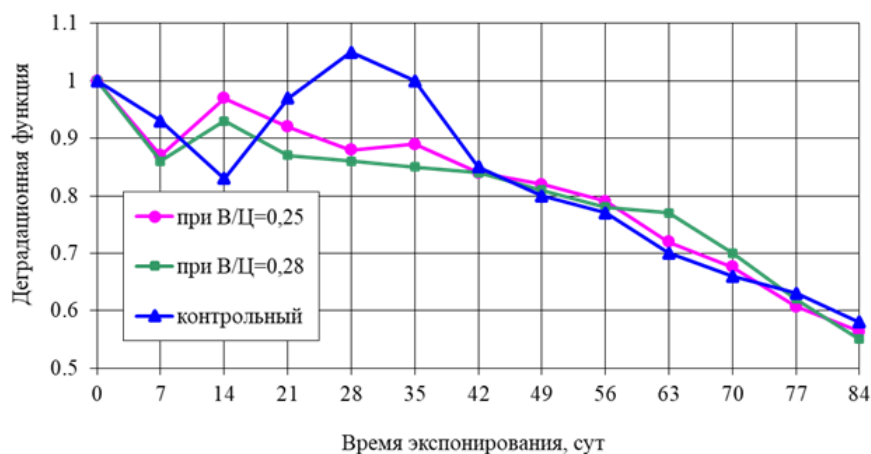


Рис. 3. Химическое сопротивление отвержденных композиций с комплексной добавкой на основе безгипсового портландцемента (среда выдерживания – 2% серная кислота).

Цементный камень деградирует в растворах серной кислоты при его сульфатизации; скорость данного процесса в основном определяется диффузией агрессивной среды. Поэтому в ранний период времени отмечается характерное для данного процесса повышение прочности, вследствие увеличения плотности материала при формировании в его порах и капиллярах кристаллов гидросульфата алюмината кальция (ГСАК). При последующем выдерживании в агрессивной среде растущие ГСАК разрушают структуру материала, что приводит к снижению прочности. Похожая картина наблюдается и у образцов на основе безгипсового цемента с силикатом натрия и ЛСТ. Кривая изменения прочности обнаруживает максимум в области 14 суток, а затем происходит плавное снижение прочности. При этом необходимо отметить, что образцы меньше набухают в процессе взаимодействия с кислой средой, деформации набухания носят плавный характер по сравнению с контрольными образцами. Химическая стойкость в кислой среде таких отвержденных композиций не ниже контрольных.

Как показывают результаты проведенных исследований, отвержденные безгипсовые портландцементные композиции с комплексной добавкой, в состав которой входит силикат натрия и лигносульфонат, характеризуются более организованной поровой структурой цементного камня и улучшенными физико-механическими свойствами. Химическая стойкость в кислой среде таких композитов не ниже, чем у цементных. Дальнейшая проведенная в работе оптимизация безгипсового ВНВ позволила получить композиты с высокой прочностью при обычной серийной тонкости помола портландцементного вяжущего (остаток на сите № 008 не менее 5% и не более 15%). Достигалось это четким контролем введения определенного количества ускорителя твердения и пластификатора. Нормальная густота таких композиций обеспечивалась уже при водовязущем отношении $0,18 \div 0,2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терешкин И. П. Разработка вяжущих низкой водопотребности для стендовых технологий: дисс. ...канд. тех. наук. – Саранск, 2001. – 244 с.
2. Терешкин И. П., Панчина А. А., Кильдеев И. Р. Разработка эффективных комплексных добавок для цементных бетонов // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы четырнадцатой Международной научно-технической конференции: в 2 частях / Отв. ред. В. Т. Ерофеев. – Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2015. – Ч. 2. – С. 93–102.
3. Патент RU 2199497 С2 Сырьевая смесь / В. П. Селяев, В. И. Соломатов, И. П. Терешкин, А. И. Коротин, Ю. А. Бормусов, В. Л. Агушев – № 2000126710/03; заявлено 10.10.2002; опубл. 27.02.2003 Бюл. № 6.
4. Кожникова Е. А. Оценка влияния водоцементного отношения на прочность бетона с активированным цементом [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1. – Режим доступа: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_131_Kozhnikova.pdf_b538a3eaa3.pdf.
5. Макаров Ю. А. Химическое сопротивление бетонополимеров: дисс. ...канд. тех. наук. – Саранск, 2000. – 211 с.
6. Моргун В. Н., Пушенко О. В. О структуре фибропенобетонов [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 3. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/955.
7. Панчина А. А., Кильдеев И. Р., Терешкин И. П. Эффективная добавка для цементных сырьевых смесей на основе природных цеолитосодержащих пород Республики Мордовия // Огарев-online [Электронный ресурс]. – 2016. – № 5. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/effektivnaya-dobavka-dlya-cementnyx-syrevyx-smesej-na-osnove-prirodnix-ceolitosoderzhashhix-porod-respubliki-mordoviya>.
8. Балыков А. С., Низина Т. А., Коровкин Д. И., Володин В. В., Каштанов А. А., Каштанова Е. А. Высокопрочные мелкозернистые бетоны на основе природного и техногенного сырья [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2017. – № 11. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/vysokoprochnye-melkozernistye-betony-na-osnove-prirodnogo-i-technogennoogo-syrya>.

КОРОТИН А. И., КАРЕВ Д. В., СЕДИНА Е. А.
ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ
КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ «РЕЛАМИКС М2»

Аннотация. Получение высокоэффективных модифицированных материалов на основе минеральных вяжущих в настоящее время остается весьма актуальной задачей. В работе были проведены исследования по совершенствованию комплекса основных физико-технических свойств композиций на основе портландцемента при введении в состав модифицирующей комплексной добавки «Реламикс М2».

Ключевые слова: сырьевые смеси, цементные композиции, неорганическое вяжущее, модифицированные многокомпонентные вяжущие, комплексные добавки, химические добавки.

KOROTIN A. I., KAREV D. V., SEDINA E. A.
OPTIMIZATION OF PROPERTIES OF CEMENT COMPOSITIONS
BASED ON MINERAL BINDERS BY INTRODUCING
COMPLEX ADDITIVE "RELAMIX M2"

Abstract. The production of highly efficient modified materials based on mineral binders is currently very relevant. The study presents the results of improving the basic physico-engineering properties of Portland cement compositions with the introduction of the modifying complex additive "Relamix M2".

Keywords: raw mixtures, cement compositions, inorganic binder, modified multicomponent binders, complex additives, chemical additives.

Сырьевые смеси на неорганическом связующем позволяют получать на их основе очень широкую линейку товаров – от штучных строительных изделий и деталей до конструкций, образующих основу здания. Такого рода высококачественные и конкурентоспособные материалы и изделия, полученные при использовании высокотехнологичного оборудования с применением современных технологий, на сегодняшний день являются наиболее востребованными при возведении зданий и сооружений различного назначения. В настоящее время получены значительные положительные результаты в области проектирования и разработки сырьевых смесей для получения высокоэффективных материалов и изделий на основе неорганического связующего. Известны высокофункциональные модифицированные бетоны, обладающие хорошими эксплуатационными свойствами: долговечностью, повышенными прочностью,

химической стойкостью и защитой по отношению к стальной арматуре. Эти бетоны использовались при возведении ряда уникальных объектов в России и в мире. Также высокофункциональные модифицированные бетоны нашли широкое применение при строительстве облегченных каркасов многоэтажных энергоэффективных зданий. Мировая практика показывает, что высокопрочные и долговечные бетоны также весьма перспективны для возведения морских гидротехнических сооружений в северных приливных морях, например, для конструкций платформ по добыче нефти, в частности, в арктическом шельфе [1].

Из всего широкого спектра применяемых сегодня строительных материалов, изделий и конструкций в среднесрочной перспективе цементный бетон и его производные останутся одними из ключевых строительных компонентов в подавляющем большинстве областей и направлений строительства [2; 3].

В настоящее время для повышения прочности и уменьшения водопотребности композиций на основе минеральных вяжущих в их состав вводятся химические и минеральные добавки, оказывающие разностороннее воздействие на весь диапазон их физико-технических свойств. Наиболее активно в настоящее время в технологии производства цементных композитов применяются пластифицирующие и суперпластифицирующие добавки, которые, кроме разжижающего воздействия, оказывают дополнительное положительное влияние на сырьевые смеси, например, ускорение набора прочности в начальные сроки твердения (первые трое суток) [4]. Применение синтетических добавок в цементных системах позволяет снизить их водопотребность до 30% без уменьшения подвижности и прочности, а в некоторых случаях и более. Одним из перспективных направлений производства высокопрочных и долговечных бетонов является предельное снижение водоцементного (В/Ц) отношения сырьевых смесей. Хотя факторы, определяющие водопотребность минеральных вяжущих на основе портландцемента (главным образом содержание трехкальциевого алюмината (C_3A), дисперсность и зерновой состав) хорошо известны, комплексно изменить их с целью существенного снижения водопотребности непосредственно при производстве вяжущего на сегодняшний день представляется весьма затруднительно [5]. Поэтому достаточно перспективным направлением применения добавок в серийном производстве изделий и конструкций на основе неорганических вяжущих представляется совместное введение в состав сырьевой смеси комплекса химических и минеральных компонентов именно на стадии производства [6]. Однако в этом случае необходимо очень тщательно прорабатывать технологию введения данных компонентов для получения максимального синергетического эффекта от присутствия всех компонентов комплексных добавок.

Комплексные добавки многофункциональны и способны влиять сразу на несколько характеристик сырьевых смесей и конечных материалов на их основе. Применение комплексных химических добавок позволяет добиваться универсальности их действия в композициях весьма разнообразного состава, приготовленных на основе минеральных клинкерных вяжущих. При выборе компонентов комплексных добавок и определении дозировки необходимо четко представлять роль каждого компонента в полифункциональном модификаторе [7].

В данном исследовании было изучено влияние модифицирующих добавок с предпочтительным пластифицирующим эффектом на повышение механических и водоредуцирующих свойств сырьевых смесей на основе минерального вяжущего. В качестве модификатора в работе применяли добавку «Реламикс М2» (ТУ 5745-070-58042865-2012), которая используется для получения товарных бетонов на основе цемента, производства сборных изделий и конструкций из тяжелого и мелкозернистого бетона различного назначения классов В20 и выше, возведения конструкций монолитных сооружений с повышенной степенью и сложной конфигурацией армирования, получения легких бетонов и строительных растворов различного назначения. При приготовлении конструкционных бетонов классов В7.5-В40 добавку «Реламикс М2» рекомендуется применять для увеличения подвижности сырьевой смеси, повышения прочности бетона, снижения расхода вяжущего. Целесообразность применения добавки «Реламикс М2» определяется достижением различных технологических показателей эффективности при производстве товарного бетона, бетонных и железобетонных изделий и конструкций, возведении сооружений, а также показателей экономической эффективности при их изготовлении и эксплуатации. Добавка обеспечивает отпускную прочность бетона на низкоактивных и низкомарочных цементах. В легких бетонах добавка применяется одновременно с воздухововлекающими добавками в целях уменьшения водосодержания бетонной смеси, приготовленной на мелких пористых заполнителях с повышенной водопотребностью. В ячеистых бетонах эффективность добавки «Реламикс М2» имеет место при применении в качестве вяжущего цемента или комплексного вяжущего на основе портландцемента [8].

Применяемая в работе добавка «Реламикс М2» представляет собой водный раствор темно-коричневого цвета с плотностью не менее 1.16 г/см³ и показателем рН не менее 7 [8]. Полученные образцы цементных композиций, модифицированные добавкой «Реламикс М2», испытывали на сжатие в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Добавку в сырьевую смесь вводили с водой затворения в количестве от нуля до трех процентов от массы вяжущего. На первом этапе в сырьевую смесь вводили половину от всего количества воды затворения и тщательно перемешивали до однородной массы. Затем добавляли 25% воды затворения с растворенной в

ней модифицирующей добавкой. После этого в сырьевую смесь добавляли оставшиеся 25% воды затворения. Исследование изменения прочности и подвижности композиций производилось при равном $В/Ц=0,3$ и равной подвижности в возрасте 1, 3, 7, 14, 28 и 56 суток. Подвижность модифицированных цементных композиций определяли по их растекаемости на вискозиметре Сутгарда. Полученные образцы до испытаний выдерживались в нормальных влажностных условиях (НВУ) без дополнительной термовлажностной обработки.

Результаты анализа влияния исследуемой добавки на подвижность и прочность модифицированных цементных композиций представлены на рисунках 1 – 7.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что с введением модифицирующей добавки при сохранении неизменного водоцементного отношения значительно увеличивает растекаемость композиций (рис.1), при этом прочность модифицированного цементного камня постепенно повышается (рис. 2, 3). При введении добавки в количестве двух процентов и выше сырьевая смесь становится гиперподвижной (литой) (рис. 1).

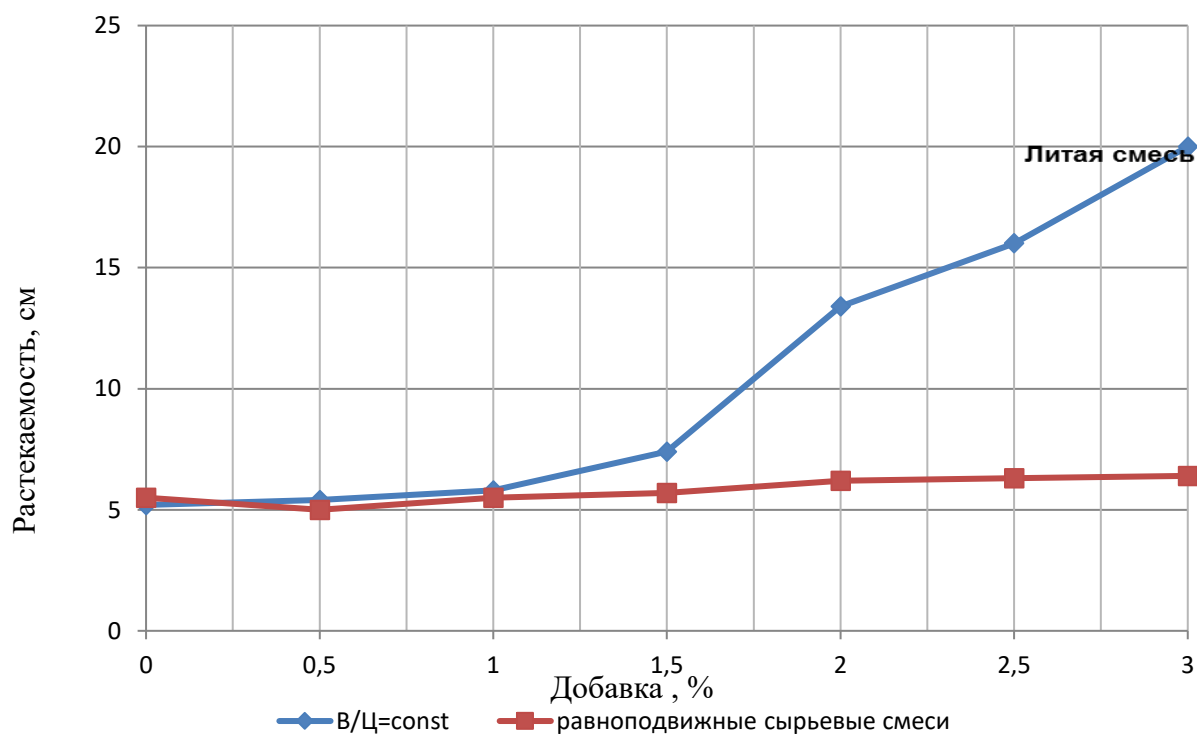


Рис. 1. Растекаемость цементного теста.

Введение модифицирующей добавки при уменьшении водоцементного отношения и сохранении равной подвижности сырьевой смеси значительно повышает прочность модифицированного цементного камня (рис. 4, 5). Как показали исследования, максимальный рост прочности достигается при введении добавки в количестве 1,0 – 2,0% при сохранении постоянного водоцементного отношения (рис. 3) и 1,5 – 2,5% для равноподвижных сырьевых смесей и составляет более 50% в стандартном возрасте (28 суток)

по отношению к контрольному составу. При этом важно отметить, что фактически не наблюдается замедление набора прочности в начальные сроки твердения (первые трое суток) (рис. 2, 4). А в возрасте более трех суток прочность модифицированных композиций становится выше прочности контрольных образцов (рис. 2, 4).

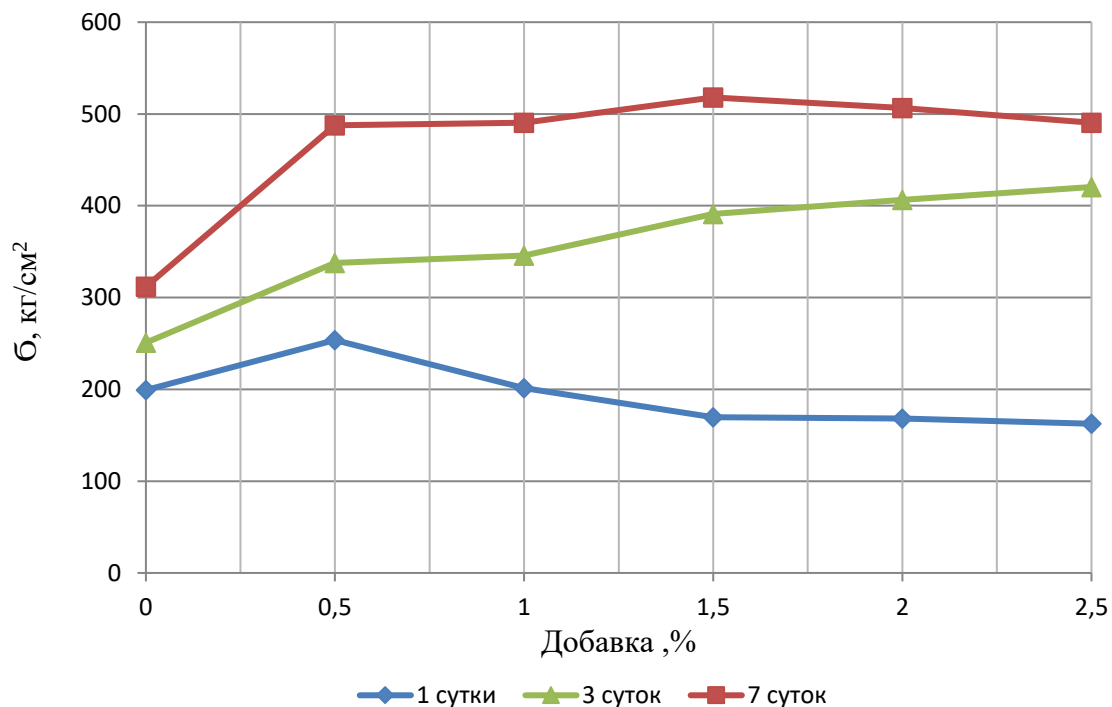


Рис. 2. Изменение прочности цементных композитов в зависимости от количества добавки (при В/Ц = const).

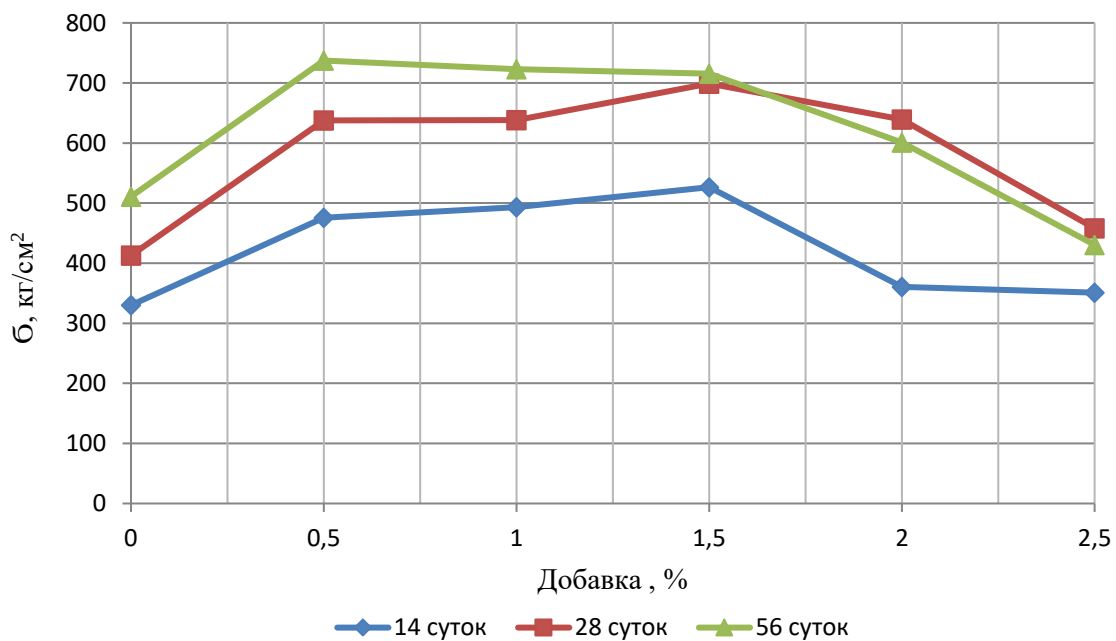


Рис. 3. Изменение прочности цементных композитов в зависимости от количества добавки (при В/Ц = const).

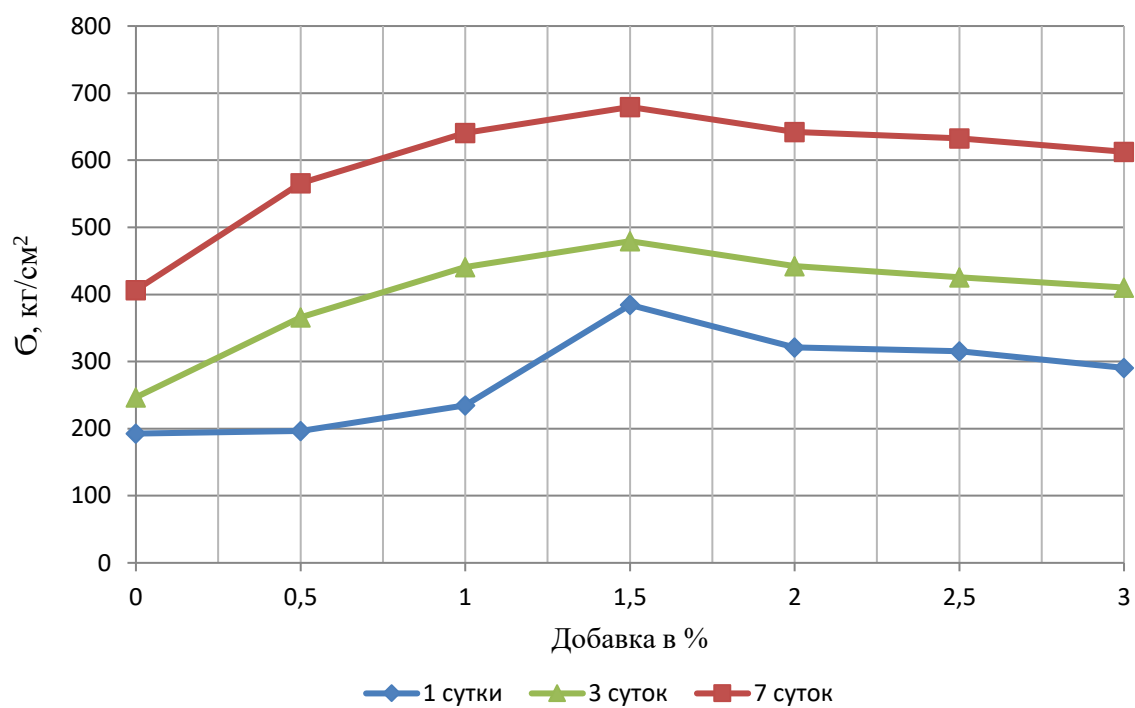


Рис. 4. Изменение прочности цементных композитов в зависимости от количества добавки (равноподвижные сырьевые смеси).

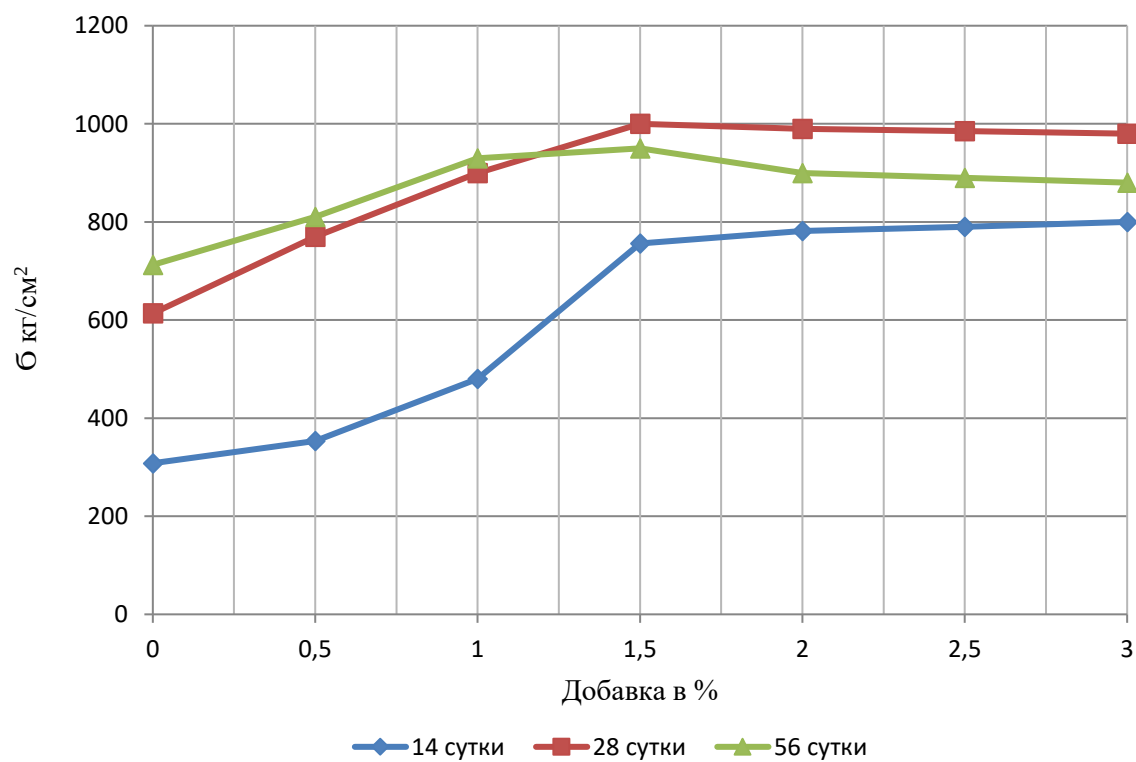


Рис. 5. Изменение прочности цементных композитов в зависимости от количества добавки (равноподвижные сырьевые смеси).

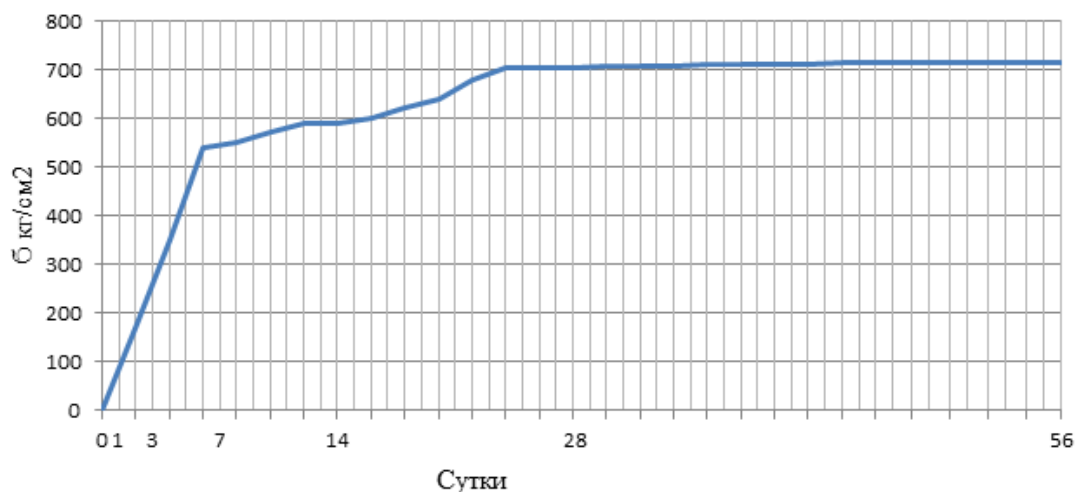


Рис. 6. Изменение прочности цементных композиций (при В/Ц=const), количество добавки 1,5% от массы Ц.

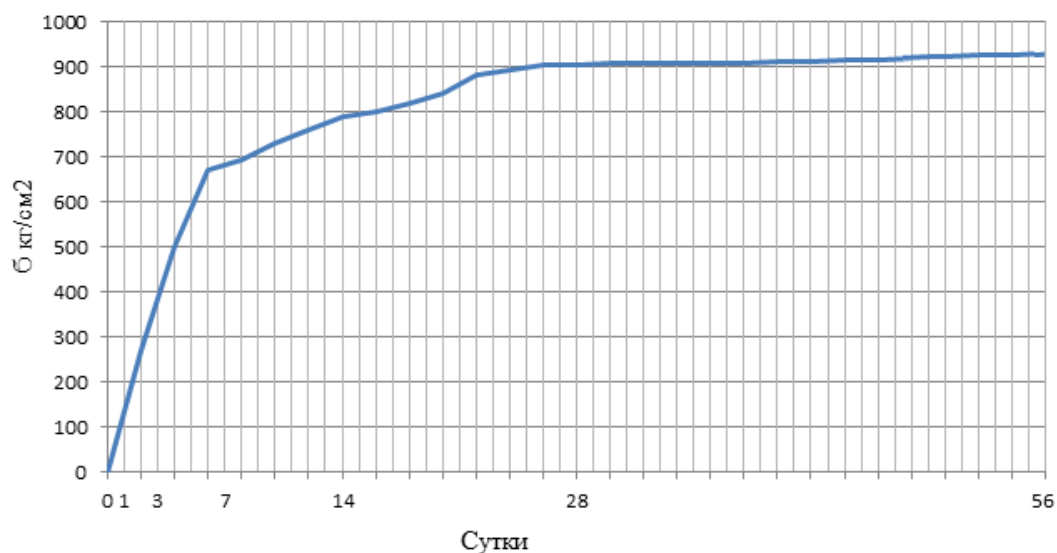


Рис. 7. Изменение прочности равноподвижных цементных композиций (растекаемость 6 см, количество добавки 2,5% от массы Ц).

Применение добавки «Реламикс М2» позволяет значительно повышать прочность композиций, увеличивать подвижность сырьевых смесей, получать литые сырьевые смеси, повышать производительность технологических линий за счет ускоренного набора прочности в первые часы и сутки твердения, что, в свою очередь, дает возможность повысить производительность оборудования и снизить конечную себестоимость продукции. Эффект от введения добавки позволяет предположить возможность получения комбинаций данной добавки с другими химическими и минеральными компонентами для получения комплексного эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Ярмаковский В. Н., Ерофеев В. Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Строительные науки. – 2015. – С. 93–102.
2. Коротин А. И., Карев Д. В., Святкина Г. Н., Седина Е. А., Седин Н. С. Улучшение составов пенобетона путем применения различных компонентов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук профессора Соломатова Василия Ильича. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – С. 46–48.
3. Куприяшкина Л. И., Гришенков Д. И., Лаврентьев О. В. Воздействие щавелевой кислоты на цементное вяжущее, наполненное цеолитсодержащими породами // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук профессора Соломатова Василия Ильича. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – С. 46–48.
4. Коротин А. И., Карев Д. В., Седин Н. С., Седина Е. А. Актуальные вопросы применения комплексных добавок в цементных бетонах [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2017. – №11. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/aktualnye-voprosy-primeneniya-kompleksnykh-dobavok-v-cementnykh-betonax>.
5. Буренина О. Н., Давыдова Н. Н., Андреева А. В., Даваасенгэ С. С., Саввинова М. Е. Исследование влияния комплексных минеральных модифицирующих добавок, включая нанодобавки, на свойства мелкодисперсного бетона // Актуальные вопросы технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Пермь, апрель 2015 г.). – Пермь: Зебра, 2015. – С. 101–104.
6. Коротин А.И., Терешкин И.П., Неверов В.А., Швечков С.А., Морозов М.А. Структурообразование цементных композитов, модифицированных комплексными добавками с нанокomпонентами // Материалы международной научно-технической конференции «Структурообразование, прочность и механика разрушения композиционных строительных материалов и конструкций». – Вісник ОДАБА. – Выпуск № 47, частина 1. – Одесса: Зовнімрекламсервіс, 2012. – С. 188–192.
7. Коротин А. И., Терешкин И. П. Разработка эффективных портландцементных композиций с низкой водопотребностью для строительных конструкций // Актуальные

вопросы архитектуры и строительства: сборник научных статей. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. – С. 306–308.

8. Добавки для бетона. АО ГК «Полипласт» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.polyplast-un.ru/products/stroitelnaya-otrasl/dobavki-dlyabetonov/uskoriteli-nabora-prochnosti.html>.

ЛАЗАРЕВ А. Л., ПОЛТОРАЦКИЙ Д. М., ТАНЯКИН И. А.
ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНЕШНЕГО
АРМИРОВАНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Изложены основные принципы метода расчета функционально-градиентных композиционных материалов с покрытием. Приведен пример прогнозирования свойств армированного углеродным волокном композита, выполненный методом расчета функционально-градиентных материалов с учетом выравнивания напряжений в прослойке.

Ключевые слова: прогнозирование свойств, расчет, функционально-градиентные композиционные материалы, углеродное волокно.

LAZAREV A. L., POLTORATSKY D. M., TANYAKIN I. A.
PRACTICAL IMPLEMENTATION OF METHODS FOR DESIGNING
EXTERNAL REINFORCEMENT OF WOODEN ELEMENTS BASED
ON FUNCTIONALLY GRADIENT COMPOSITE MATERIALS

Abstract. The basic principles of the method for calculating functionally gradient composite materials with coating are described. An example of predicting the properties of a carbon fiber-reinforced composite is provided. The predicting is performed by calculating functionally gradient materials considering stress equalization in the interlayer.

Keywords: prediction of properties, calculation, functionally gradient composite materials, carbon fiber.

Современные технологии предъявляют к конструктивным материалам повышенные функциональные требования. Высокая прочность, жесткость, сопротивляемость химическим, биологическим, физическим, атмосферным воздействиям – это далеко не полный перечень функциональных требований, которым должны отвечать современные композиты, свойства которых в изделии изменяются по объему или высоте поперечного сечения в соответствии с функциональными требованиями.

Существует множество способов получения композитов с заданным распределением свойств. Наиболее перспективными являются слоистые композиты. Большой интерес к слоистым композитам объясняется тем, что в результате возрастает прочность материала, увеличивается его долговечность, а также возникают особые свойства, недостижимые для обычного материала.

Применительно к деревянным конструкциям слоистыми считаются армированные элементы. Необходимость применения арматуры для деревянных конструкций обусловлена рядом причин:

- изменение эксплуатационного режима и нагрузок на конструкции;
- возникновение эксплуатационных дефектов;
- реконструкция и изменение конструктивной схемы и расчетных схем элементов;
- использование при изготовлении сращенных элементов из более низких сортов древесины;
- дефекты при изготовлении клееных конструкций.

В качестве арматуры применяются стальные стержни, листовые элементы, стеклопластиковая арматура и другие материалы.

Известно, что стальные армирующие стержни дают приращение несущей способности деревянных балок в два раза по сравнению с клеенощатыми и в три раза выше, чем у балок составного сечения на податливых связях. Также уменьшается прогиб при эксплуатационных нагрузках.

Известен и способ армирования деревянных балок как стальной, так и стеклопластиковой арматурой [1]. При этом для стальной арматуры определены основополагающие правила конструирования деревянных балок:

- поперечное сечение балок прямоугольное с постоянной высотой, либо двутаврового или коробчатого сечения;
- соотношение длины балки к ее ширине в пределах от 15 до 20;
- рекомендуется выполнять сечение в сжатой и растянутой зоне.

При решении проблемы армирования деревянных конструкций проектировщики сталкиваются с решением ряда вопросов:

- закрепление арматуры в балке;
- выбор схемы армирования (с точки зрения оптимального количества, размеров и размещения армирующих элементов, прогноз увеличения прочности и стоимость армированных элементов);
- разработка программного комплекса расчета армированных элементов;
- размещение арматуры в массиве элемента для обеспечения, в том числе, эстетических требований;
- обеспечение совместной работы армирующего и основного элемента.

В настоящее время широкое применение нашла арматура на основе углеродного волокна. Углеволокно – высокопрочный, высокомодульный, линейно упругий материал. Он применяется в виде холстов, а также лент. Усиление углепластиком относят к внешнему

армированию, поскольку материалы крепятся на конструкции с помощью монтажного клея (эпоксидного, эпоксиполиуретанового или полимерцементного).

Быстрота и легкость монтажа элементов внешнего армирования из углеволокна является основным преимуществом описываемого способа армирования. Кроме того, внешнее армирование не искажает эстетический облик конструкции, при этом процесс усиления становится значительно проще, чем традиционные технологии.

Углеклесты эффективны на участках, где действуют главные растягивающие напряжения и имеется опасность раскалывания вдоль волокон. Также целесообразно их приклеивание на гибкие фанерные стенки в зоне действия поперечной силы. Эти элементы внешнего армирования обычно либо приклеиваются к поверхности, либо вклеиваются в предварительно подготовленные пропилы. Пропилы предпочтительно делать вертикальными для минимального нарушения целостности сечения.

Вариант с установкой арматуры в пропилы предпочтителен, когда необходимо сохранить первоначальный вид балок и сделать незаметным само усиление.

Незаметность наряду с технологической простотой и высокой скоростью монтажа относят к основным преимуществам армирования деревянных конструкций из углеволоконных элементов.

Технология изготовления покрытия оказывает значительное влияние на работу изделия в процессе эксплуатации. Распределение упругих свойств по сечению основного материала и покрытия могут иметь дискретный или градиентный характер, что должно отражаться на методах расчета элементов с покрытием.

В литературе описан ряд методов расчета слоистых композитов на силовые воздействия различными методами [2–4]. Для элемента с дискретным характером распределения свойств по высоте сечения применима модель составного стержня.

При рассмотрении элементов с покрытием методом составного стержня, структура материала моделируется стержневой системой, в которой составляющие стержни соединены равномерно распределенными по длине связями сдвига и поперечными связями. Структуру функционально-градиентного материала (ФГКМ) можно условно представить слоистой. Можно предположить, что поперечное сечение элемента ФГКМ состоит из слоев, соединенных по всей длине. Материал отдельных слоев представим практически однородным. Составляющие стержни соединяются между собой связями.

Во многих случаях податливостью поперечных связей можно пренебрегать. Во время работы составного стержня, состоящего из $n + 1$ отдельных стержней, в связях сдвига каждого шва возникают усилия T , являющиеся функциями координаты x .

Суммарные сдвигающие усилия в T_i — м шве в сечении x определяются по формуле

$$T_i = \int_0^x \tau_i dx. \quad (1)$$

С учетом этих усилий формулы для определения полного изгибающего момента в системе будут иметь следующий вид:

$$M = M^0 + \sum_{i=1}^{N+1} M_i^r = M_0 - \sum_{i=1}^n T_i u_i - \sum_{i=1}^n T_i v_i = M^0 - \sum_{i=1}^n T_i \omega_i, \quad (2)$$

где M^0 – суммарный изгибающий момент, равный сумме моментов, возникающих в каждом отдельном стержне от действия нагрузки без учета усилий, передающихся от поперечных связей и связей сдвига; ω_i – расстояние между центрами тяжести сечений двух смежных стержней разделенных i -м швом.

Внутренний момент в том же стержне равен полному моменту M , умноженному на отношение $E_i J_i / (\sum E J)$:

$$M_i = \frac{M^0}{\sum E_i J_i} E_i J_i - \sum_{j=1}^n T_j \omega_j \frac{E_i J_i}{\sum E_i J_i}.$$

Нормальные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_x = \frac{N_i}{F_i} + \frac{M_i z_i}{J_i},$$

где z_i – расстояние от центра тяжести i -го стержня до рассматриваемого волокна.

Эпюра продольных напряжений в составном стержне получается ступенчатой, но с одинаковым наклоном к вертикали во всех стержнях.

Скачки в эпюре продольных напряжений в каждом шве равны $M \omega_i / (\sum E J)$. Данный метод удобен для моделирования ФГКМ при использовании дискретного распределения свойств по высоте поперечного сечения. В тех случаях, когда свойства материала по сечению изменяются равномерно, возможно применение методов механики сплошной среды.

Для конструкций с дискретным распределением свойств материала по высоте поперечного сечения расчет необходимо проводить с учетом нелинейного изменения нормальных напряжений в бетоне конструкционного слоя.

Нормальные напряжения в сечении определяют выражением

$$\sigma = \frac{N_i}{F_i} + \frac{4M_i}{bh^2 \int_{-1}^1 f(\eta) \eta d\eta} \quad (3)$$

(где N_i – осевая сила в каждом составляющем стержне; M_i – внутренний момент в том же стержне; F_i – площадь поперечного сечения i -го стержня);

с учетом формул

$$\sigma_x = kx f(\eta) \quad (4)$$

и

$$\int_{-b}^b \sigma_x y dy = M. \quad (5)$$

Внутренний момент в i -м стержне определен из выражения

$$M_i = \frac{M^0}{\sum EJ} E_i J_i - \sum_{i=1}^n T_i \omega_i \frac{E_i J_i}{\sum EJ}.$$

Здесь $\sum EJ$ и $E_i J_i$ рассчитываются по формулам

$$\sum EJ = (J_1 + J_2) \int_{h_2}^{h_1} E(y) dy, \quad (6)$$

$$E_i J_i = J_i \frac{\int_0^{h_i} E(y) dy}{h_i}. \quad (7)$$

Предполагаем, что сдвигающие усилия развиваются в промежуточном слое, соединяющем первый и второй стержни.

Модуль упругости $E_{\text{км}}$ композиционного материала можно оценить по следующей формуле:

$$E_{\text{км}} = E_1 \gamma_1 + E_2 \gamma_2,$$

где E_1, E_2 – модули упругости структур составляющих композит в каждом слое стержня; γ_1, γ_2 – объемное содержание.

При проектировании функционально-градиентных композитов с покрытием необходимо обеспечить надежную работу композита, покрытия и промежуточного слоя. Эффект от покрытия наблюдается лишь при его совместной работе с основным материалом, что говорит о необходимости уделять особое внимание при расчете таких конструкций возникающим в контактном слое напряжениям и отслоению покрытия. При работе изгибаемых изделий с покрытием в контактном слое возникают значительные сдвигающие напряжения. Они распределены по длине образца неравномерно и имеют максимальные значения на краях. Для того, чтобы обеспечить совместную работу элемента и покрытия, целесообразно снизить сдвигающие напряжения на краях слоя. Добиться этого можно путем изменения конструкции соединения и свойств прослойки.

Известно, что усилия на непрерывные связи соединительного слоя, работающие на сдвиг, передаются неравномерно. Перенапряженными являются крайние участки, где возникает опасность разрушения. Устранить это обстоятельство можно путем усложнения конструкции соединения (геометрии и деформативных свойств связей).

При рассмотрении образцов с покрытием мы имеем случай прикрепления упругой пластинки постоянного сечения к жесткому основанию через связующие прослойки.

Напряжения в прослойке являются функциями координат $\tau = \tau(z)$ и $\sigma = \sigma(x)$. Предполагая, что для достижения цели может потребоваться изменение по сечению толщины прослойки, зададим $h=h(x)$.

В работах [3; 5] предложены зависимости, определяющие характер изменения толщины клеевой прослойки и упругих свойств связевого материала по длине изгибаемого материала.

В первом случае, при $\frac{G_0}{G_\xi} = 1$, характер изменения толщины прослойки определяется формулой

$$\frac{h_\xi}{h_0} = f(\zeta) \cdot \left\{ 1 + \frac{G_0}{E} \cdot \frac{1}{b\delta} \cdot \frac{1}{h_0} \xi^2 \right\}. \quad (8)$$

Изменения толщины промежуточного слоя можно достичь, варьируя глубину проникания композита при нанесении покрытия.

Если же решение реализуется за счет изменения свойств соединительной прослойки, то мы имеем $\frac{h_\xi}{h_0} = 1$ и характер изменения деформационных параметров по формуле

$$\frac{G_0}{G_\xi} = \frac{1}{f(\zeta)} \left\{ 1 + \frac{G_0}{E} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{1}{h_0} \xi^2 \right\}, \quad (9)$$

где $\zeta = z/l$; $\xi = x/l$ - безразмерные координаты; G_0 - модуль прослойки при $x=0$.

Реализация принципов проектирования функционально-градиентных покрытий проверялась испытанием нескольких серий изгибаемых деревянных балочек. Образцы имели различное соотношение высоты сечения к длине образцов от 1/15 до 1/30. Часть образцов была выполнена с однослойным покрытием равной толщины, другая – с изменением толщины, выполненным по принципам ФГКМ, рассчитанным по вышеприведенным формулам. Различалось также количество приклеиваемой арматуры.

В качестве материалов для изготовления испытательных образцов использовались:

- эпоксидная смола ЭД-20 представляет собой жидкий реакционноспособный олигомерный продукт на основе диглицидилового эфира дифенилолпропана;
- активный разбавитель Этал-1 – алифатическая трехфункциональная смола, применяется как модификатор и разбавитель эпоксидных смол и составов на их основе – клеев, мастик, герметиков, адгезивов и т.д.;
- нетоксичный отвердитель аминного типа Этал-45М, который рекомендован к применению при изготовлении антикоррозионных покрытий, изготовлении стеклопластиковых изделий методом контактного формования;
- однонаправленные углеродные ленты FibArm.

Нити однонаправленных углеродных лент FibArm составляют высококачественные углеродные волокна. В качестве утка используются высокопрочные стеклянные нити, получаемые путем высокотемпературного воздействия на органические вещества в инертной среде. Углеродная лента значительно превосходит по физико-механическим показателям традиционные материалы, например, изготовленные из стекловолокна, базальта, арамида.

Таблица 1

Результаты испытаний

№	Соотно- шение высота/ длина	Прочность при изгибе, МПа	Среднее по серии, МПа	Характер разрушения	Изменение толщины прослойки	
KIV1	1/20	220,5	233,365	В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва	Один слой	
KIV2		220,5				
KIV3		183,75				
KIV4		202,13		В середине пролета по нормальному сечению, с разрывом арматуры		
KIV5		229,69				
KIV6		266,44				
KIV7		268,28		В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыв		
KIV8		275,63				В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыв
KV5	1/15	291,1	361,9883	В середине пролета по нормальному сечению, с отслоением арматуры	ФГКМ	
KV6		429,2		В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва, разрушение в середине сечения вдоль волокон		
KV7		312,38				В середине пролета по нормальному сечению, без разрыва арматуры
KV8		330,75				
KV9		257,25				
KV10		451,25				
KI-1		1/15		330,75		309,7883

KI-2		316,05		В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва, разрушение в середине сечения вдоль волокон	
KI-3		330,75			
KI-4		301,35		В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва	
KI-5		278,48			
KI-6		301,35			
KII-1		308,7			
KII-2		338,1			
KII-3		345,45			
KII-4	1/30	389,55	349,125	В середине пролета по нормальному сечению, с отрывом арматуры и приповерхностным слоем от касательных напряжений	Один слой без ФГКМ
KII-5		279,3			
KII-6		382,2			
KII-7		360,15			

Характер разрушения подтверждает объективность применения градиентных покрытий для приклейки внешнего армирующего слоя на основе углеродного волокна. Несмотря на применение образцов с соотношением геометрических параметров, вызывающих пиковые краевые напряжения, отслоения арматуры не происходило у образцов с функционально-градиентным клеевым слоем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уточкина Е. С., Крицин А. В. Внешнее армирование несущих деревянных конструкций углеродной лентой // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-2. – С. 294–296.
2. Ржаницын А. Р. Строительная механика. – М.: Высш. шк., 1991. – 440 с.
3. Селяев В. П., Карташов В. А., Клементьев В. Д., Лазарев А. Л. Функционально-градиентные композиционные строительные материалы и конструкции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 160 с.
4. Победра Б. Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
5. Какурин И. Р., Киселев А. Н., Лазарев А. Л., Шорин М. А. Практическое применение методов проектирования характеристик элементов на основе функционально-градиентных композиционных материалов [Электронный ресурс] //

Огарев-online. – 2014. – Спецвыпуск. – Режим доступа:
<http://journal.mrsu.ru/arts/prakticheskoe-primenenie-metodov-proektirovaniya-kharakteristik-ehlementov-na-osnove-funkcionalno-gradientnykh-kompozicionnykh-materialov>.

**АРТАМОНОВ Д. А., БАШКАЕВ Д. С.,
ГРИГОРЬЕВА А. А., КОЗЛЯТНИКОВ И. С.**

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Аннотация. Представлены результаты исследования изменения микротвердости полимерных материалов на основе эпоксидных связующих. Установлены показатели микротвердости контрольных составов и образцов после 365 суток климатического воздействия. Определены статистические характеристики кривых распределения микротвердости. Проведена оценка влияния климатических факторов на состояние поверхностных слоев композиционных полимерных материалов.

Ключевые слова: эпоксидные смолы, климатическое воздействие, микротвердость, кривые распределения.

**ARTAMONOV D. A., BASHKAYEV D. S., GRIGOREVA A. A., KOZLYATNIKOV I. S.
ANALYSIS OF EPOXY POLYMERS MICROHARDNESS UNDER CLIMATIC ACTION**

Abstract. The results of studying of epoxy polymeric materials microhardness are presented. The microhardness indicators of the control compounds and samples after 365 days of climatic action were established. The statistical characteristics of the microhardness distribution curves are determined. The effect of climatic factors on the surface layers of the compositional polymer materials was assessed.

Keywords: epoxy resins, climatic action, microhardness, distribution curves.

В течение всего периода эксплуатации бетонные и железобетонные конструкции подвергаются воздействию агрессивных факторов. Для предотвращения проникновения жидких и газообразных сред в объем строительных конструкций используются защитно-декоративные покрытия, в том числе на основе полимерных материалов. Вариативность свойств полимерных материалов позволяет применять их для защиты от различных внешних факторов. Наиболее часто используемыми для покрытий полимерными материалами являются составы на основе эпоксидных смол, что, в первую очередь, связано с сочетанием высоких физико-механических и технологических свойств, а также их широкой доступностью [1; 2].

Способность материала сопротивляться проникновению агрессивных сред, в основном, определяется плотностью структуры, а также состоянием поверхностных слоев, целостность которых может быть нарушена вследствие длительного нахождения в условиях, далеких от оптимальных. Микротвердость характеризует состояние поверхности образцов и

позволяет определить износостойкость материала, наносимого на конструкцию в качестве защитно-декоративного покрытия.

Существуют различные методы определения микротвердости полимерных материалов. Наиболее распространены методы Бринелля, Роквелла и Виккерса, различающиеся по типу используемого индентора, испытательной нагрузке и способу определения показателя микротвердости – по восстановленному или невосстановленному отпечатку [3–5]. Недостатком этих методов является трудоемкость при сборе большого количества данных, необходимых для оценки свойств материалов при длительных по времени воздействиях.

Одним из методов определения микротвердости является склерометрический метод, основанный на нанесении царапин на поверхность исследуемого изделия. Образование царапин связано с пластическим деформированием материала и его смещением от оси канавки к краям, а методика испытаний материалов описана в ГОСТ 21318-75* «Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками» [6].

Согласно ГОСТ 21318-75*, определение ширины канавки производится винтовым окулярным микрометром, однако выполнение измерений с его применением трудоемко, а результат может варьироваться в зависимости от наблюдателя. Повысить скорость процесса измерения возможно за счет использования программного комплекса «Идентификация и анализ пористости строительных материалов», основанного на применении метода прямого сканирования [7]. Обработка полученных при сканировании оцифрованных изображений царапин с помощью программного комплекса также помогает уменьшить влияние человеческого фактора, из-за которого неизбежно увеличивается вероятность возникновения ошибок.

Алгоритм обработки результатов состоит из следующих этапов [8]:

1. формирование блока данных (по каждой царапине отдельно) с определением для каждой ординаты Y минимального $X_{min}(Y)$ и максимального $X_{max}(Y)$ значения абсцисс;
2. подсчет среднего значения по каждой ординате $X_{cp}(Y)$;
3. аппроксимация срединных точек линейным уравнением $Y_{cp} = a_0 + b_0 \cdot X_{cp}$;
4. определение коэффициентов уравнений, перпендикулярных срединной линии, для каждой ординаты в отдельности;
5. определение левой и правой границ царапины с учетом перпендикулярности прямых $Y = a_1 + b_1 \cdot X$ к срединной линии;
6. вычисление ширины царапины b (в мм) с учетом величины разрешения при сканировании;
7. подсчет значений микротвердости по формуле

$$H_{\nabla P} = \frac{3,138 \cdot P}{b^2}, \quad (1)$$

где P – прикладываемая нагрузка, Н; b – ширина царапины, мм;

8. проведение статистической обработки результатов исследования.

Исследование микротвердости проводилось на образцах полимерных материалов, использующих в качестве связующего эпоксидную смолу ЭД-20 и модифицированные эпоксидные смолы Этал-247 и Этал-370. Для отверждения смол использовались отвердители марок Этал-1440Н, Этал-1460, Этал-1472 и Этал-45М производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ» (табл. 1).

Таблица 1

Исследуемые составы эпоксидных полимерных материалов

Марка эпоксидной смолы	Марка отвердителя	Соотношение смола : отвердитель
ЭД-20	Этал-1440Н	100:56
	Этал-1460	100:39
	Этал-1472	100:25
	Этал-45М	100:50
Этал-247	Этал-1440Н	100:53,2
	Этал-1460	100:37
	Этал-1472	100:23,75
	Этал-45М	100:47,5
Этал-370	Этал-1440Н	100:56
	Этал-1460	100:39
	Этал-1472	100:25
	Этал-45М	100:50

Эпоксидные полимеры исследовались в течение одного года в условиях натуральных климатических испытаний. Микротвердость измерялась для контрольных составов и для составов после 365 суток климатического старения. На основе полученных данных были построены кривые распределения (рис. 1–4), статистические показатели которых представлены в таблице 2 для контрольных составов и в таблице 3 для составов после 365 суток климатического воздействия.

По результатам анализа кривых распределения микротвердости контрольных составов и их статистических характеристик (табл. 2, 3) выявлено, что наибольшие значения статистических показателей, к которым относятся среднее арифметическое, мода и медиана, отмечаются у составов ЭД-20 + Этал-45М, Этал-247 + Этал-1472, Этал-370 + Этал-1460, Этал-370 + Этал-1472 и Этал-370 + Этал-45М. Среднее арифметическое микротвердости данных составов находится в диапазоне от 454 до 803 Н/мм², мода – от 495 до 924 Н/мм², медиана – от 436 до 777 Н/мм². Снижение характеристик ниже данных уровней для остальных составов демонстрирует невысокое сопротивление их поверхностных слоев к действию механических нагрузок.

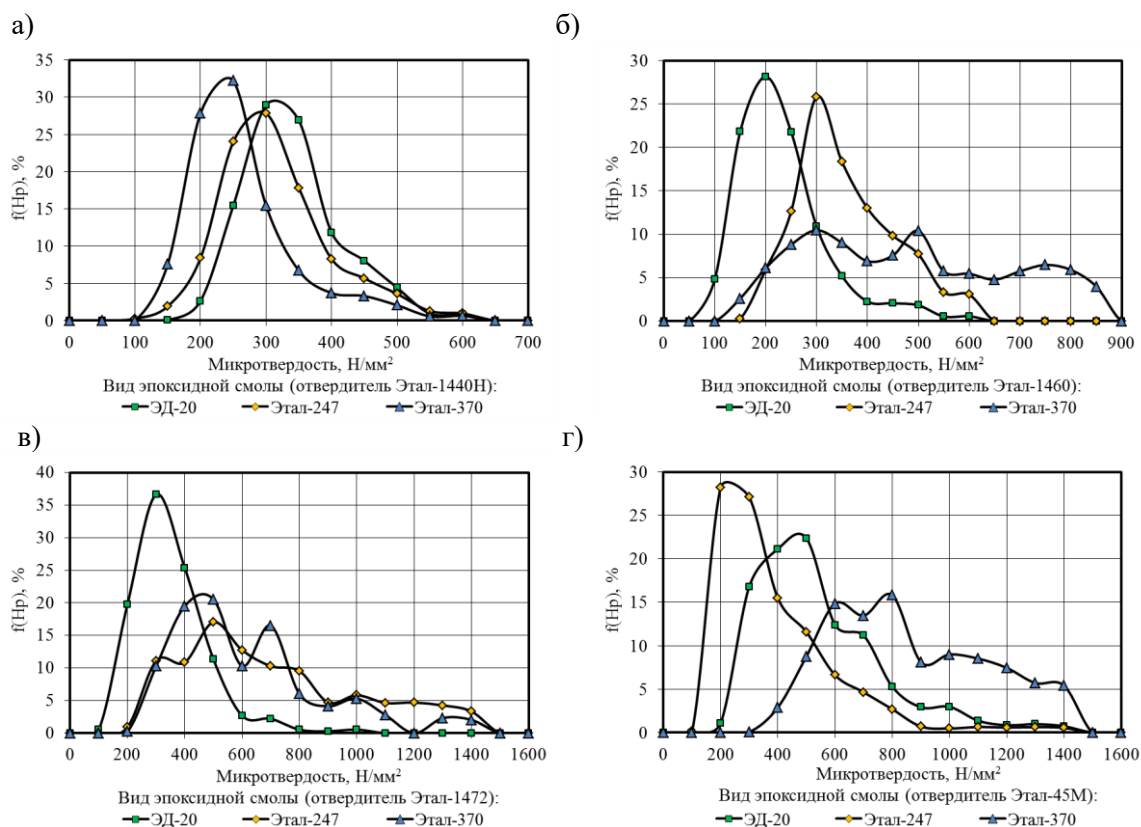


Рис. 1. Кривые распределения микротвердости полимерных композитов в зависимости от вида эпоксиной смолы (отвердитель: а – Этал-1440Н; б – Этал-1460; в – Этал-1472; г – Этал-45М).

К статистическим показателям относятся также средние квадратичные отклонения и коэффициенты вариации. Наибольшим коэффициентом вариации обладает состав Этал-247 + Этал-45М, что свидетельствует о наибольшем распределении свойств по поверхности композита. Для составов ЭД-20+Этал-1460, ЭД-20+Этал-1472, ЭД-20+Этал-45М, Этал-247+Этал-1472, Этал-370+Этал-1460 и Этал-370+Этал-1472 коэффициент вариации находится в пределах от 42 до 47%. Установлено, что коэффициент вариации для составов с невысокими показателями среднего арифметического, моды и медианы (ЭД-20+Этал-1440Н, Этал-247+Этал-1440Н, Этал-247+Этал-1460 и Этал-370+Этал-1440Н) является наименьшим и составляет 24÷35%. В этих же пределах находится коэффициент вариации для состава Этал-370+Этал-45М, микротвердость которого максимальна среди всех рассматриваемых композитов.

Согласно результатам исследований микротвердости полимерных составов, снижение прочности поверхностных слоев эпоксидных полимеров, оцениваемых по среднему арифметическому, через год климатических воздействий составляет 1,5÷3 раза. Исключениями являются составы на основе смолы Этал-247, отверждаемой Этал-45М, и смолы Этал-370, отверждаемой Этал-1440Н. Микротвердость данных составов изменяется не более 10% по сравнению с контрольными, а для полимера Этал-370+Этал-1440Н отмечается повышение микротвердости на 7% через один календарный год натурных испытаний.

**Статистические характеристики кривых распределения микротвердости
эпоксидных полимеров в контрольном состоянии**

Марка смолы	Статистические характеристики	Марка отвердителя			
		Этал-1440Н	Этал-1460	Этал-1472	Этал-45М
ЭД-20	Среднее арифметическое	313,7	208,5	300,2	492,0
	Минимум	127,5	59,1	78,3	183,0
	Максимум	565,3	571,0	996,1	1366,6
	Мода	307,0	231,1	249,0	565,3
	Медиана	307,0	186,4	274,0	458,8
	Среднее квадратичное отклонение	76,1	89,6	128,1	220,0
	Коэффициент вариации	24,3	43,0	42,7	44,7
Этал-247	Среднее арифметическое	287,6	334,0	641,3	339,0
	Минимум	78,8	148,0	170,7	93,7
	Максимум	565,3	571,0	1366,6	1379,3
	Мода	250,6	280,0	565,3	308,5
	Медиана	275,9	310,2	565,3	278,6
	Среднее квадратичное отклонение	85,9	99,0	303,6	214,1
	Коэффициент вариации	29,9	29,6	47,3	63,2
Этал-370	Среднее арифметическое	237,2	454,7	567,2	803,5
	Минимум	108,8	105,7	183,0	294,5
	Максимум	568,9	845,8	1346,1	1379,3
	Мода	201,5	495,9	647,8	924,2
	Медиана	219,6	436,0	489,4	776,9
	Среднее квадратичное отклонение	83,8	197,4	259,2	267,1
	Коэффициент вариации	35,3	43,4	45,7	33,2

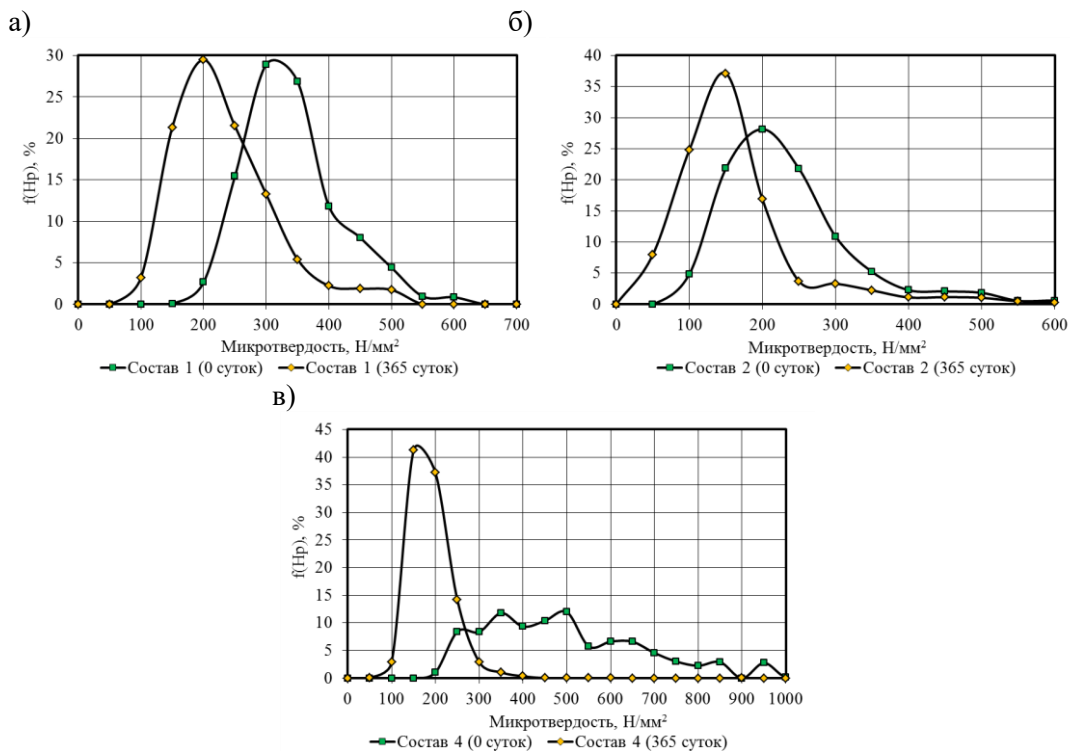


Рис. 2. Кривые распределения микротвердости полимерных композитов на основе эпоксидной смолы ЭД-20 в контрольном состоянии и через 365 суток натурального экспонирования в зависимости от вида отвердителя:
а – Этал-1440Н; б – Этал-1460; в – Этал-1472; г – Этал-45М.

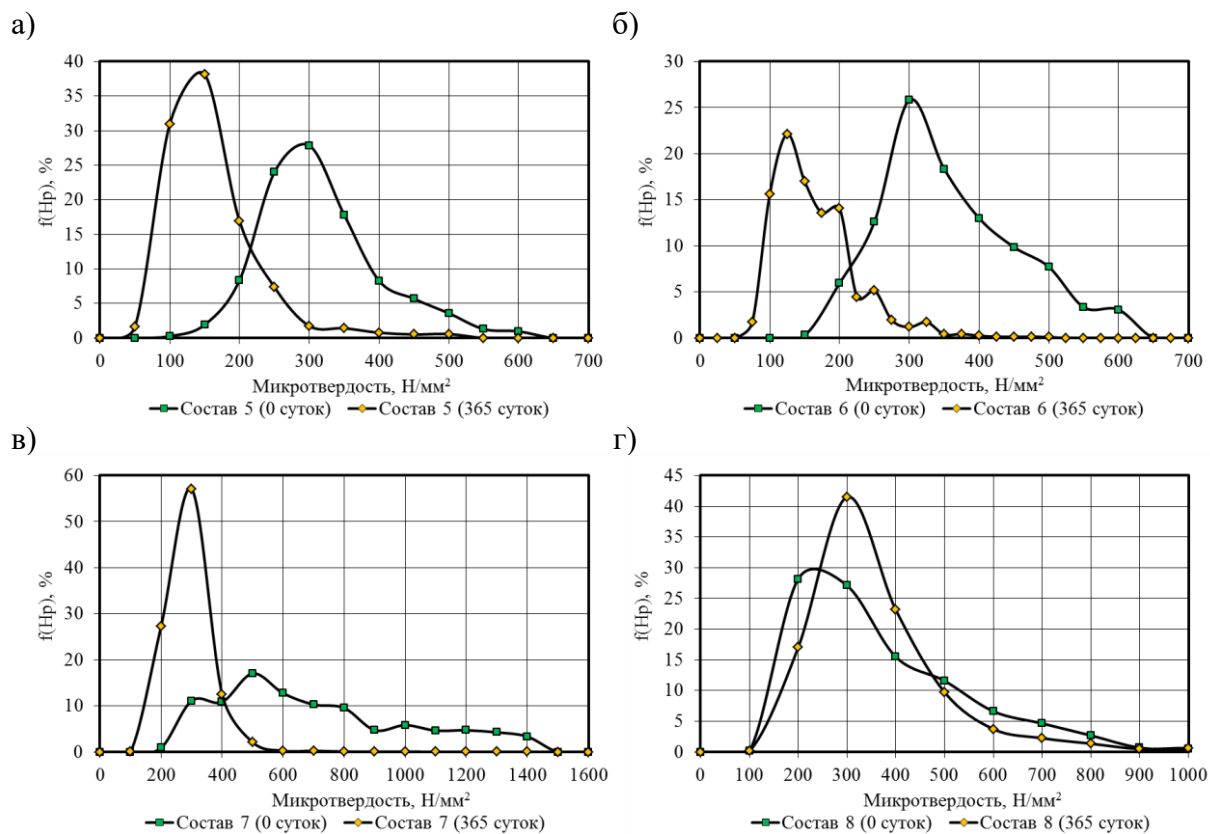


Рис. 3. Кривые распределения микротвердости полимерных композитов на основе эпоксидной смолы Этал-247 в контрольном состоянии и через 365 суток натурального экспонирования в зависимости от вида отвердителя:
а – Этал-1440Н; б – Этал-1460; в – Этал-1472; г – Этал-45М.

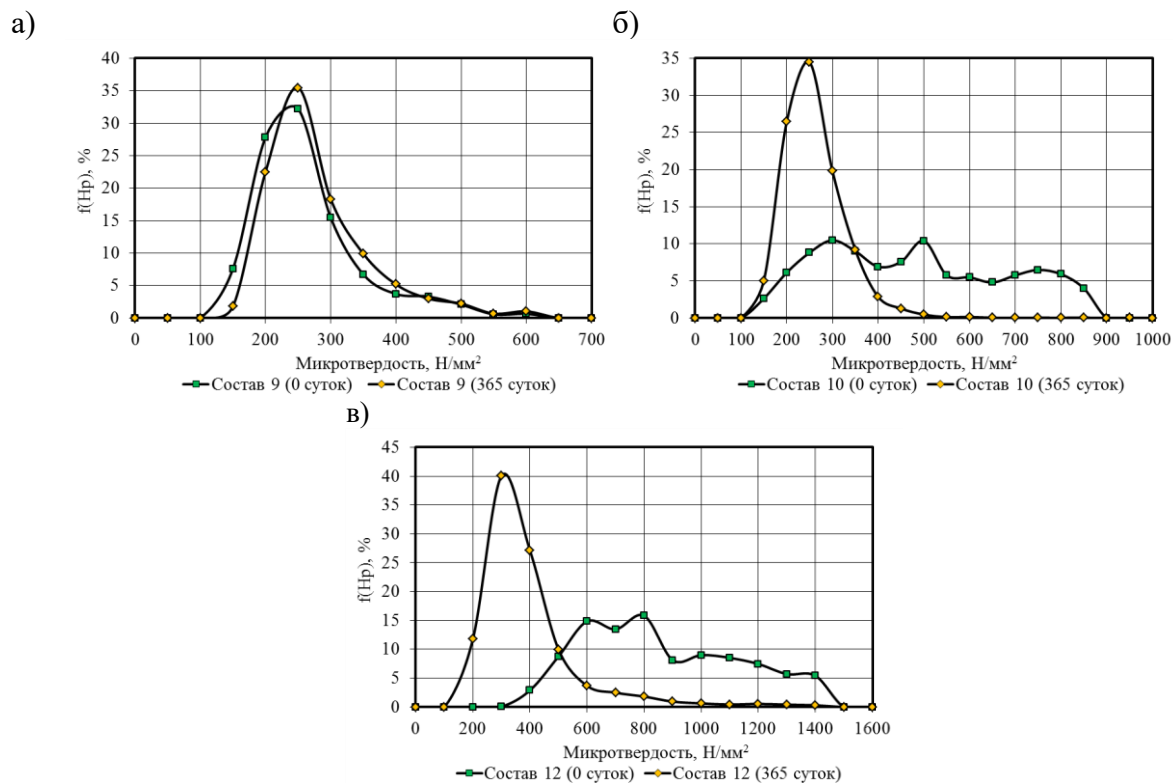


Рис. 4. Кривые распределения микротвердости полимерных композитов на основе эпоксидной смолы Этал-370 в контрольном состоянии и через 365 суток натурального экспонирования в зависимости от вида отвердителя:
а – Этал-1440Н; б – Этал-1460; в – Этал-1472; г – Этал-45М.

**Статистические характеристики кривых распределения микротвердости
эпоксидных полимеров после 365 суток натурных испытаний**

Марка смолы	Статистические характеристики	Марка отвердителя			
		Этал-1440Н	Этал-1460	Этал-1472	Этал-45М
ЭД-20	Среднее арифметическое	206,9	138,3	–	164,2
	Минимум	81,5	24,6	–	47,9
	Максимум	495,9	565,3	–	1077,5
	Мода	220,4	131,3	–	159,9
	Медиана	193,2	118,9	–	154,1
	Среднее квадратичное отклонение	79,1	87,3	–	47,3
	Коэффициент вариации	38,2	63,1	–	28,8
Этал-247	Среднее арифметическое	134,2	152,0	244,7	307,2
	Минимум	35,0	60,8	96,6	72,2
	Максимум	489,4	489,4	3674,2	996,1
	Мода	130,1	183,0	220,4	305,1
	Медиана	121,2	140,1	230,5	275,9
	Среднее квадратичное отклонение	66,3	60,6	138,1	133,7
	Коэффициент вариации	49,4	39,9	56,4	43,5
Этал-370	Среднее арифметическое	255,6	235,5	–	341,4
	Минимум	106,0	102,9	–	105,9
	Максимум	571,0	1241,7	–	1379,3
	Мода	211,7	211,7	–	293,9
	Медиана	231,4	221,3	–	293,9
	Среднее квадратичное отклонение	83,0	69,6	–	175,8
	Коэффициент вариации	32,5	29,6	–	51,5

Анализ статистических характеристик кривых распределения микротвердости позволяет заключить, что наибольшая прочность поверхностных слоев после климатических испытаний в натурных условиях отмечается для составов на основе смол Этал-247 и Этал-370, отверждаемых Этал-45М. Высокие показатели поверхностной прочности эпоксидных композитов характеризуют целостность защитного покрытия в условиях климатического воздействия, что означает сохранность основания, на которое наносится покрытие, от агрессивных факторов и, как следствие, увеличенный срок службы конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mohamed A. Samaha, Mohamed Gad-el-Hak. Polymeric Slippery Coatings: Nature and Applications [Электронный ресурс] // Polymers. – 2014. – № 6(5). – Режим доступа: <http://www.mdpi.com/2073-4360/6/5/1266/htm>.

2. Лапицкая Т. В., Лапицкий В. А. Эпоксидные материалы // Композитный мир. – 2006. – № 7. – С. 16–17.
3. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2007. – 260 с.
4. Булычев С. И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
5. Соломатов В. И., Селяев В. П., Низина Т. А. Исследование химического сопротивления полимерных композитов методом микротвердости // Новое в строительном материаловедении. Юб. сб. науч. тр. – Вып. 902. – М: МИИТ, 1997. – С. 29–35.
6. ГОСТ 21318-75*. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. – М.: Издательство стандартов, 1988.
7. Селяев В. П., Низина Т. А., Фролкин О. А., Цыганов В. В., Ланкина Ю. А. Идентификация и анализ пористости строительных материалов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610364 от 24.01.2006 г. в Роспатенте по заявке № 2005613072 от 24.11.2005 г.
8. Низина Т. А., Селяев В. П., Кочетков С. Н., Зимин А. Н. Применение программного комплекса «Идентификация и анализ пористости строительных материалов» для обработки результатов склерометрических испытаний // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – Вып. 13. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2010. – С. 163–166.