



eISSN 2311-2468
Том 4, № 5. 2016
Vol. 4, no. 5. 2016

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн

Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



ГРИШЕНКОВ Д. И., ЛАВРЕНТЬЕВ О. В., ГАРЫНКИНА Е. Н., КУПРИЯШКИНА Л. И.

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРТОФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ НА ЦЕМЕНТНЫЙ
КАМЕНЬ ПРИ ВВЕДЕНИИ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ**

Аннотация. Изучена возможность использования местных сырьевых ресурсов (цеолитсодержащих пород республики Мордовия) в качестве наполнителя для бетонной смеси. Рассмотрено воздействие ортофосфорной кислоты на наполненное цементное вяжущее. Проанализирована зависимость изменения прочностных характеристик от степени наполнения цеолитсодержащими породами и концентрации агрессивной среды.

Ключевые слова: бетон, цеолит, наполнитель, прочностные характеристики, ортофосфорная кислота, агрессивная среда.

GRISHENKOV D. I., LAVRENTEV O. V., GARYNKINA E. N., KUPRIYASHKINA L. I.

**STUDY OF THE EFFECT OF PHOSPHORIC ACID
ON CEMENT STONE WITH ZEOLITE-CONTAINING FILLERS**

Abstract. The authors study the potential for use of local raw materials – zeolite-containing rocks of the Republic of Mordovia as a filler for concrete mixtures. The effect of phosphoric acid on the filled cement binder is considered. The study presents an analysis of change dependency of the strength characteristics on the degree of filling with the zeolite rock and concentration of corrosive environment.

Keywords: concrete, zeolite, filler, mechanical strength characteristics, orthophosphoric acid, corrosive environment.

Повышение качества и долговечности строительных конструкций на основе достижений науки и техники не теряет своей актуальности и в наши дни. В настоящее время разрабатываются всевозможные способы повышения стойкости строительных конструкций и материалов в агрессивных средах, так как происходит значительное изменение общей экологической обстановки во всем мире вследствие загрязнения земной коры, воздушного и водного пространств. Промышленные стоки, атмосферные осадки или воды могут содержать самые различные примеси, в том числе кислоты и щелочи. Одно из основных направлений в строительной отрасли – разработка долговечных, надежных и экономичных строительных материалов и изделий.

В данной статье рассматривается возможность использования цеолитсодержащих пород для создания цементных вяжущих, работающих при воздействии фосфорной кислоты. Наиболее часто ортофосфорную кислоту встречают в цехах гальванической обработки. Пары кислот, выделяемые в ходе технологических процессов, оказывают отрицательное

воздействие на конструкции промышленных зданий. Для расчета оптимального состава вяжущего был реализован двухфакторный план эксперимента (см. табл. 1), согласно которому была установлена зависимость прочностных характеристик от концентрации агрессивной среды и процентного содержания наполнителя в смеси [1].

Таблица 1

Составы цементных композитов

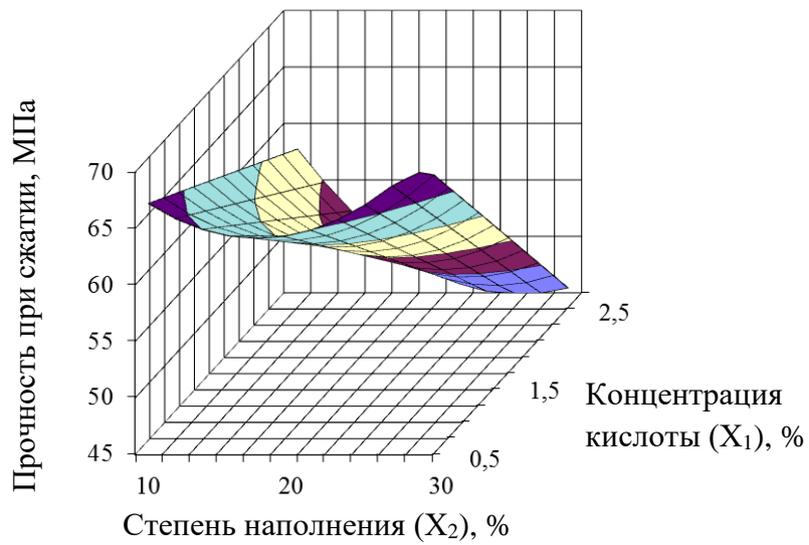
Составы	Степень наполнения, %	Масса цемента, г	Масса воды, г	Масса наполнителя, г
1	20	800	400	200
2	30	700	500	300
3	10	900	400	100
4	10	900	400	100
5	30	700	500	300
6	30	700	500	300
7	20	800	400	200
8	10	900	400	100
9	20	800	400	200

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы размерами $2 \times 2 \times 2$ см. В качестве наполнителя использовали цеолитсодержащие породы Атяшевского месторождения (ЦСП) [2, 3] и цемент марки ЦЕМ II/A-П32,5 М. Концентрация кислоты варьировалась от 0,5 до 2,5%. Образцы, выдержанные в агрессивной среде, испытывались на сжатие через 7, 14 и 28 суток. Опираясь на полученные экспериментальные данные, были получены полиномиальные уравнения регрессии, по которым были смоделированы объемные графики влияния степени наполнения и концентрации кислоты на прочность при сжатии цементных композитов, выдержанных в растворе ортофосфорной кислоты в течение 28 суток (рис. 1).

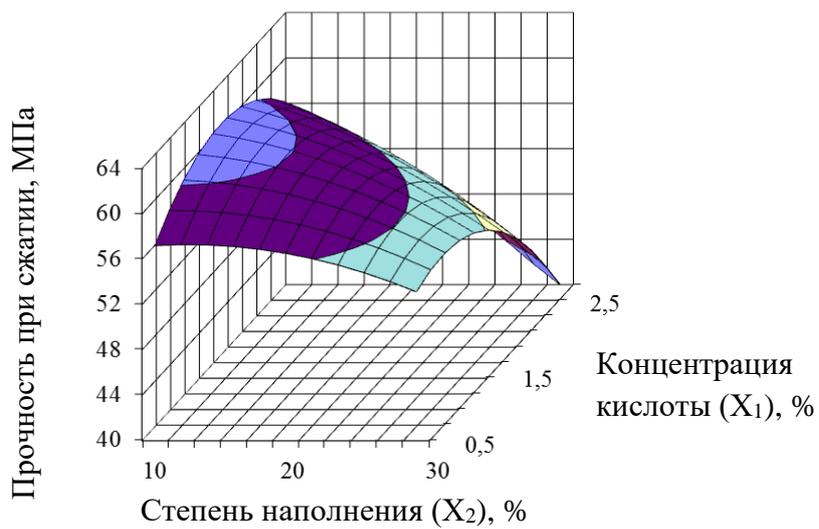
Согласно полученным графическим зависимостям, наблюдалась потеря прочности образцов при увеличении концентрации H_3PO_4 от 0,5% до 1,5%, особенно при степени наполнения ЦСП 30%. Прочность ненаполненного вяжущего составляет 51 МПа [1]. При небольшой концентрации H_3PO_4 (около 0,5%) происходило нарастание прочности в независимости от степени наполнения. Опираясь на данные графика, можно сделать следующие выводы:

1) наиболее эффективным являются композиты со степенью наполнения ЦСП 10%, обладающие наибольшей прочностью через 28 суток экспонирования при любой концентрации H_3PO_4 ;

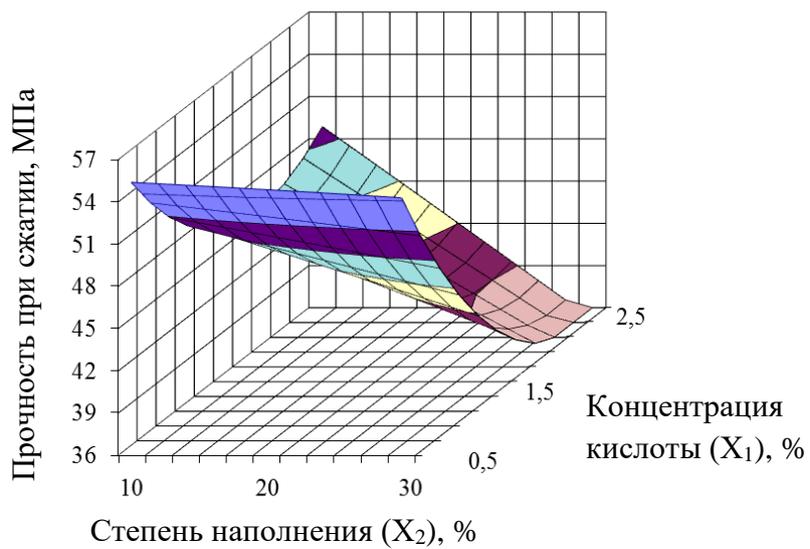
2) при воздействии агрессивной среды небольшой (порядка 0,5%) концентрации цементные композиции можно вводить в цементное вяжущее до 30% ЦСП без потери прочностных показателей; при больших (около 2,5%) концентрациях кислоты использовать не более 10÷15% ЦСП.



а)



б)



в)

Рис. 1. Влияние степени наполнения и концентрации кислоты на прочность при сжатии цементных композитов, экспонируемых в растворе ортофосфорной кислоты в течение: а – 7 суток; б – 14 суток; в – 28 суток.

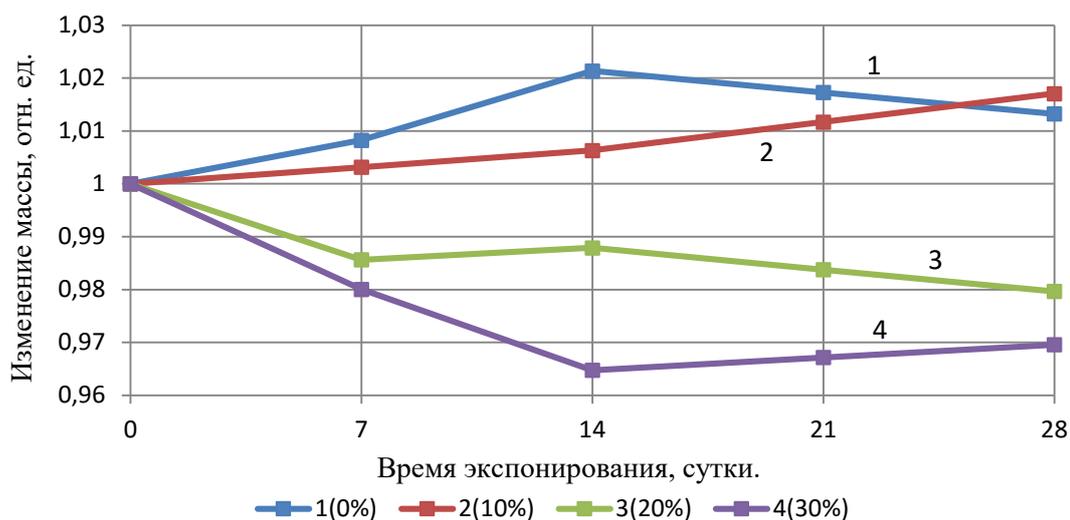
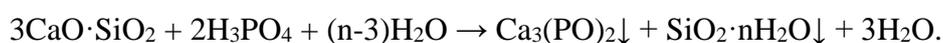


Рис. 2. Влияния степени наполнения (цеолитсодержащие породы) на изменение массы цементных композитов, выдержанных в растворе ортофосфорной кислоты в течение 28 суток.

Помимо прочностных показателей фиксировали изменение массы композитов во время экспонирования в агрессивной среде (рис. 2). Уменьшение массы образцов свидетельствует о вымывании легкорастворимых составляющих цементного камня и новых не прочных соединений, образующихся вследствие реакции цементного камня и кислоты. Увеличение массы составов 1 и 2 приводит к временному положительному эффекту, так как происходит накапливание и забивание пор труднорастворимыми соединениями, которое дает вначале положительный эффект, так как не позволяет агрессивной среде проникать вглубь цементного камня, происходит процесс кольматации. Это приводит к временному повышению прочности и замедлению процесса разрушения. Затем вследствие возникновения больших напряжений в порах происходит разрыв пор и дальнейшее разрушение цементного камня [4].

При выдерживании цементного композита в растворах ортофосфорной кислоты различной концентрации на протяжении 28 суток одновременно фиксировалось изменения pH среды (рис. 3). Основываясь на показаниях графиков, можно сделать заключение, что максимальный показатель pH среды у образцов, экспонируемых в кислотах небольшой концентрации, а минимальный – с концентрацией 2,5%.

При контакте бетона с водным раствором фосфорной кислоты происходит разрушение силиката кальция, особенно в первые дни контакта (7-8 суток) с образованием гидроксида кальция, что приводит к значительному повышению pH раствора. Вероятно, гидроксид кальция, под действием воды, нейтрализуется кислотой с образованием малорастворимого фосфата $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ или кислых солей кальция CaHPO_4 , $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ в более кислых средах



Фосфат кальция и гель кремниевой кислоты почти полностью остаются в порах бетона, вызывая их частичное закупоривание (кольматацию), что приводит к торможению процесса

коррозии бетона (самотормозящийся процесс). Чем больше образуется фосфата кальция и геля кремниевой кислоты, тем плотнее и менее проницаемым становится бетон для ионов кальция, тем сильнее тормозится процесс коррозии во времени [3].

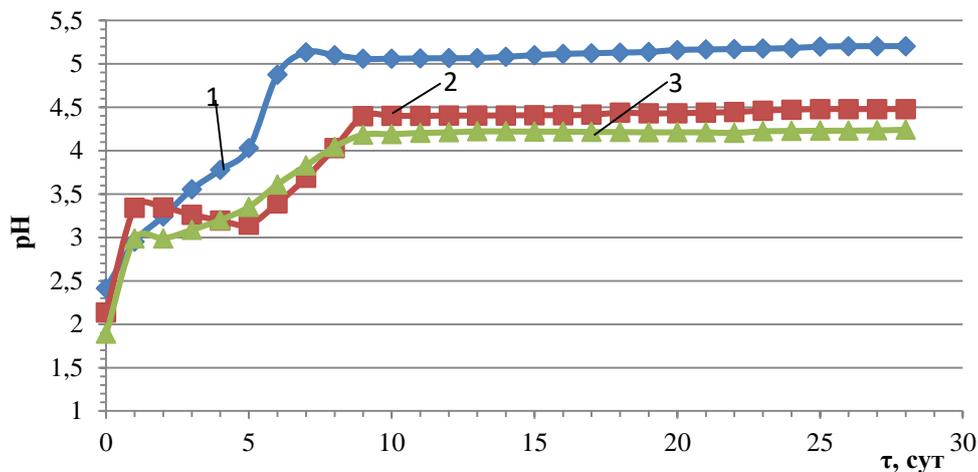


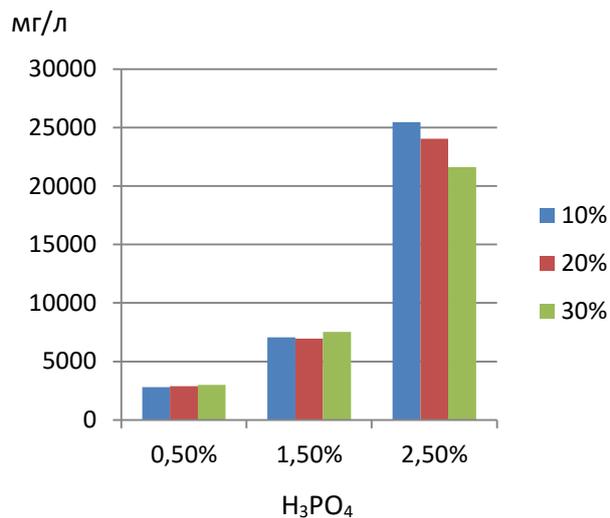
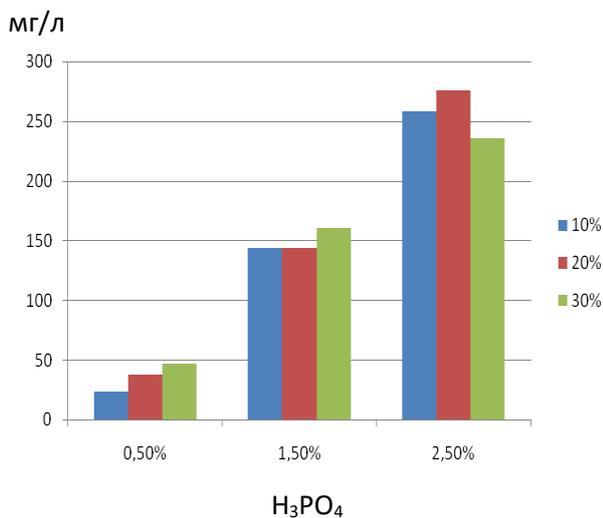
Рис. 3. Изменение pH среды при выдерживании цементного камня (20% наполнителя) в течение 28 суток в растворах ортофосфорной кислоты различной концентрации: 1 – 0,5%; 2 – 1,5%; 3 – 2,5%.

Для изучения процессов деградации композиционных материалов анализировалось изменение массы осадка. Экспериментальные данные представлены в таблице 2. Установлено увеличение массы осадка по мере повышения степени наполнения ЦСП, концентрации кислоты и времени контакта цементного камня с фосфорной кислотой. По изменению данного показателя сделан вывод об усилении процесса коррозии бетона по мере увеличения степени наполнения ЦСП до 30% и концентрации кислоты до 2,5%.

Таблица 2

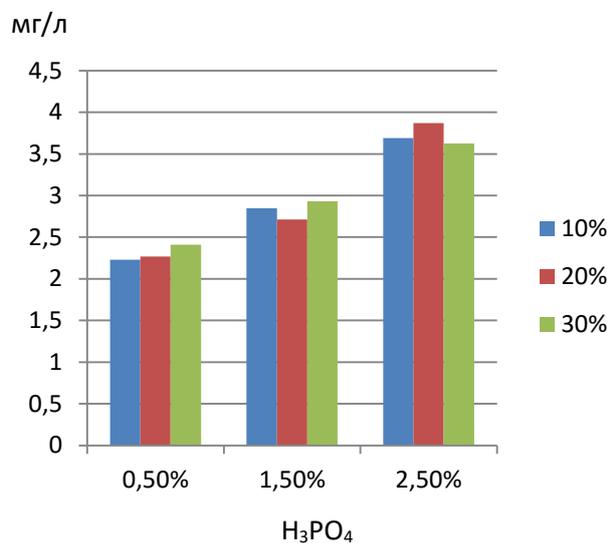
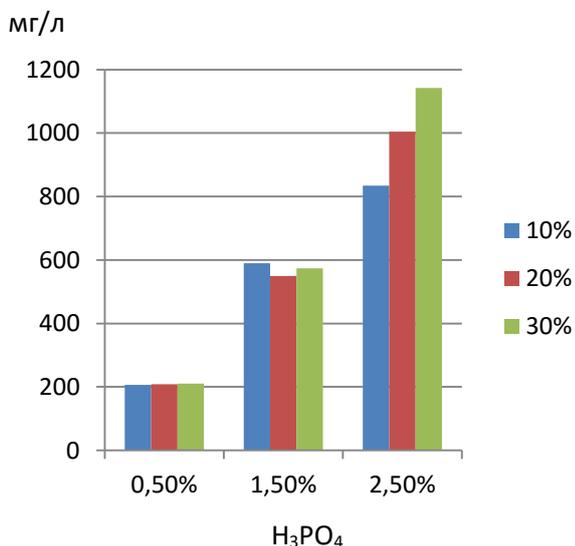
Масса осадка, полученного при выдерживании цементного камня в растворах ортофосфорной кислоты

$C(H_3PO_4)$, %	τ , сут.	ЦСП, %	$m_{осадка}$, Г	τ , сут.	ЦСП, %	$m_{осадка}$, Г	τ , сут.	ЦСП, %	$m_{осадка}$, Г
0,5	7 суток	0	-	14 суток	0	-	28 суток	0	0,0417
		10	-		10	0,0025		10	0,0074
		20	-		20	0,0080		20	0,0233
		30	-		30	0,0325		30	0,1143
1,5		0	0,0446		0	0,0964		0	0,4091
		10	0,0660		10	0,3171		10	0,4219
		20	0,0869		20	0,7042		20	0,7540
		30	0,0807		30	1,1969		30	1,5076
2,5		0	0,0663		0	0,1787		0	0,1149
		10	0,3496		10	0,7940		10	1,1124
		20	0,9851		20	1,4624		20	1,7158
		30	1,2935		30	2,8352		30	3,6967



Гистограмма 1: количество кальция (Ca)

Гистограмма 2: количество кислотного остатка (PO₄)



Гистограмма 3: количество кремния (SiO)

Гистограмма 4: количество алюминия (Al)

Рис. 4. Элементный анализ осадка экспонируемых образцов.

Полученные фильтраты анализировали на содержание ионов Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ и оксида кремния (рис. 4). Из анализа гистограмм элементного анализа установлено, что осадок состоит из оксидов кремния, фосфора, кальция; в меньшей мере в нем содержатся оксиды алюминия, железа. В незначительном количестве – оксиды калия, магния, натрия, титана [4]. Содержание перечисленных оксидов зависит от концентрации кислоты, степени наполнения ЦСП, продолжительности контакта цементного камня с кислотой. Количество оксида кальция в осадке увеличивается по мере увеличения времени контакта цементного камня с кислотой, что, вероятно, связано с увеличением фосфата кальция в осадке. Содержание SiO₂ в осадке уменьшается по мере увеличения продолжительности контакта камня с кислотой, что связано с увеличением растворимости SiO₂ в кислых средах [5].

Согласно полученным экспериментальным данным, в цементные композиции, которые подвергаются воздействию агрессивной среды, следует вводить не более 20% ЦСП, т.к. именно при этих условиях происходит минимальное вымывание. При воздействии кислот с большой концентрацией следует искать дополнительные методы защиты от агрессивной среды [6]. Анализ вышеизложенных данных позволяет сделать следующие выводы:

а) цеолитсодержащие породы Атяшевского месторождения можно использовать в качестве наполнителя для цементных композитов;

б) цементное вяжущее с добавлением цеолитсодержащих пород в количестве 10-20% имеет большую прочность относительно вяжущего, изготовленного без наполнителя;

в) цементные вяжущие, наполненные цеолитсодержащими породами, являются более долговечными по сравнению с ненаполненными;

г) добавление цеолитсодержащих пород в цементное вяжущее позволяет сократить расход цемента до 20% и уменьшить стоимость конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В. П., Осипов А. К., Куприяшкина Л. И., Волкова С. Н., Епифанова Е. А. Оптимизация составов цементных композиций, наполненных цеолитами // Изв. вузов. Строительство. – 1999. – № 4. – С. 36–39.
2. Селяев В. П., Куприяшкина Л. И. Воздействие растворов серной кислоты на разрушение наполненного цементного камня // Наука: 21 век. – 2015. – № 1 – С. 166–172.
3. Рахимбаев Ш. М. Процессы кольматации при химической коррозии цементных систем. Физическая модель // Бетон и железобетон. – 2013. – № 4. – С. 30–32.
4. Гришенков Д. И., Лаврентьев О.В., Камалян Р. С., Куприяшкина Л. И. Использование минерально сырьевой базы в строительной отрасли Мордовии // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы тринадцатой международной научно-технической конференции. В 2-х ч. Ч. 1. – Саранск, 2014. – С. 39–42.
5. Селяев В. П., Седова А. А., Куприяшкина Л. И., Осипов А. К. Изучение процессов повреждения цементного камня растворами серной кислоты различной концентрации. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2015. – № 3. – С. 35–41.
6. Гришенков Д. И., Камалян Р. С., Лаврентьев О. В. Исследование влияния органических кислот на наполненное цементное вяжущее [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2014. – Спецвыпуск. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/issledovanie-vliyaniya-organicheskikh-kislot-na-napolnennoe-cementnoe-vyazhushhee>.

ОШКИНА Л. М., СЕЛЯЕВ В. П., КОРОВКИН Д. И., АНДРОНЫЧЕВ Д. О.
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. Рассмотрено влияние структурных параметров и напряженного состояния на ползучесть цементных композитов при совместном действии сжимающих напряжений и агрессивных сред. Предложено уравнение ползучести образцов цементных композитов с учетом усредненных реологических параметров материала. Предложены выражения для определения деградационной функции жесткости, зависящей от скорости переноса жидкости в объем образца, находящегося под действием сжимающих напряжений и химического взаимодействия материала с агрессивной средой.

Ключевые слова: осевое сжатие и растяжение, агрессивная среда, деградационная функция, несущая способность, жесткость, ползучесть, деформации, модуль упругости, релаксация, композиционные материалы, строительные конструкции.

OSHKINA L. M., SELYAEV V. P., KOROVKIN D. I., ANDRONYCHEV D. O.
THE INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS AND STRESS
ON THE CREEP OF CEMENT COMPOSITES

Abstract. The influence of structural parameters and stress on the creep of cement composites with joint action of compressive stresses and aggressive conditions is studied. Considering the averaged rheological material parameters, an equation of the creep of cement composites is suggested. A formula of degradation stiffness function, depending on the speed of fluid transfer in the sample under the action of compressive stresses and chemical interaction with aggressive environment, is presented.

Keywords: axial compression and tension, aggressive conditions, degradation function, bearing capacity, stiffness, strain, creep, modulus of elasticity, relaxation, composite materials, building constructions.

В реальных условиях эксплуатации действием агрессивных сред подвержены конструкции, находящиеся под влиянием широкого диапазона нагрузок. При этом долговечность строительных конструкций во многом определяется не только их несущей способностью, но и деформативными характеристиками используемых материалов. Изменение параметров ползучести композитов в условиях воздействия агрессивных сред имеет крайне важное практическое значение при проектировании строительных конструкций, поэтому задача получения математических зависимостей для описания и прогнозирования происходящих деградационных процессов является крайне важной и актуальной.

Бетон представляет собой упругопластический материал, состоящий из трех фаз – жидкой, твердой и газообразной, количественное соотношение которых изменяется в процессе эксплуатации. Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением количества геля при твердении цементного камня. Под нагрузкой происходит перераспределение напряжений с испытывающей вязкое течение гелевой структурной составляющей на кристаллический сросток и зерна заполнителей. Одновременно развитию деформаций ползучести способствуют капиллярные явления, связанные с перемещением в микропорах и капиллярах избыточной воды под нагрузкой. С течением времени процесс перераспределения напряжений затухает и деформирование прекращается. Начиная с малых напряжений, при длительном действии нагрузки постоянного уровня в нем помимо упругих восстанавливающихся деформаций развиваются и нарастают неупругие остаточные или пластические деформации.

Центрально сжатые и растянутые элементы строительных конструкций из железобетона рассчитываются по несущей способности исходя из условия:

$$N \leq N(0)D(N) = \varepsilon_{\text{пр}} E(0)F(0)D(N),$$

где $N(0)$ – сила, воспринимаемая сечением в момент времени $t = 0$; $D(N)$ – деградиационная функция несущей способности.

Предельные деформации $\varepsilon_{\text{пр}}$ при осевом сжатии или растяжении можно определить из интегрального уравнения ползучести, предложенного В. М. Бондаренко [1; 2]:

$$\varepsilon_{\text{пр}}(t) = S_M(\sigma(t)) \frac{1}{E_M^0(t)} - \int_{t_0}^t S_n(\sigma(t)) \frac{\partial}{\partial t} c(t, t_0) dt, \quad (1)$$

где ε – полные деформации в момент наблюдения t ; t_0 – время приложения напряжения $\sigma(t)$; S_M , S_n – функции напряжений для мгновенных и запаздывающих деформаций; $E_M^0(t)$ – начальный модуль упругости; $c(t, t_0)$ – мера ползучести.

Рассмотрим ползучесть образца композита, контактирующего с агрессивной средой и находящегося под действием центрально сжимающей нагрузки P . Предполагаем, что реологические параметры $E_0(c)$, $E_d(c)$, $\tau(c)$ зависят от концентрации (c) агрессивной среды. Тогда, согласно [3], для случая переменных свойств материала уравнение ползучести в линейном приближении имеет вид:

$$E_0(c)\tau(c)\dot{\varepsilon} + E_d(c)\varepsilon = \sigma + \tau(c)\dot{\sigma}, \quad (2)$$

где E_0 – начальный модуль упругости; E_d – длительный модуль упругости; τ – время релаксации.

При неравномерном распределении концентрации жидкости по площади поперечного сечения образца для решения уравнения (2) воспользуемся методом усреднения реологических параметров (рис. 1).

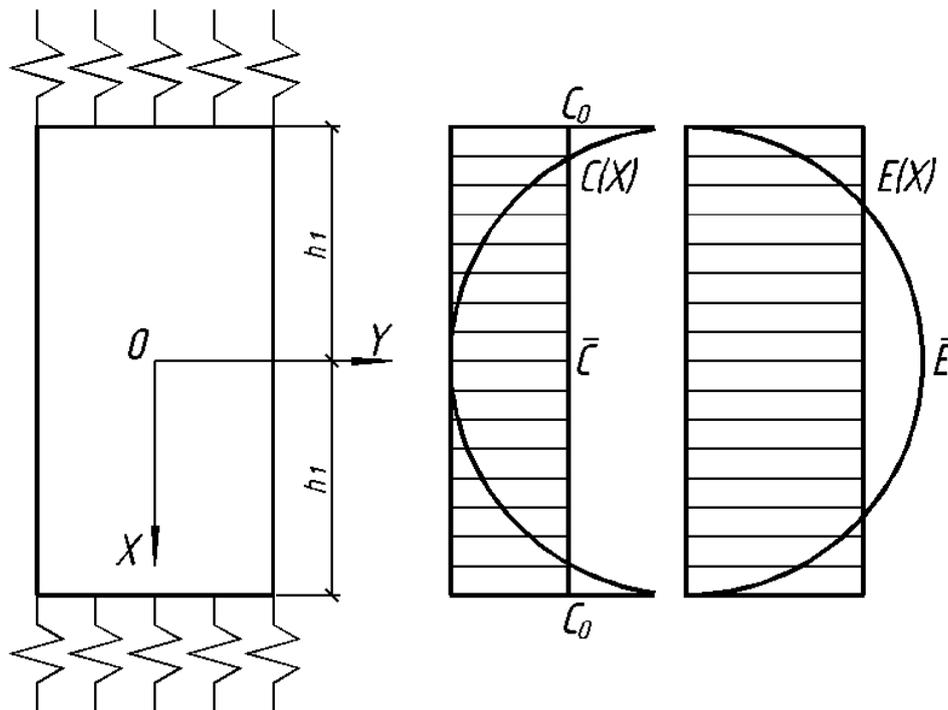


Рис. 1. К расчету ползучести методом усреднения в зависимости от концентрации по высоте сечения:
 $h_1 + h_2$ – высота поперечного сечения экспериментального образца;
 $C(X)$ – эпюра изменения концентрации агрессивной среды в объеме образца при двустороннем проникновении агрессивной среды;
 $E(X)$ – эпюра изменения прочностных свойств материала образца при двустороннем проникновении агрессивной среды.

Уравнение ползучести (2) после усреднения реологических параметров примет вид:

$$\overline{E_0} \tau \dot{\varepsilon} + \overline{E_D} \varepsilon = \overline{\sigma} + \tau \dot{\overline{\sigma}}. \quad (3)$$

Если в момент $t = 0$ концентрация агрессивной среды в материале равна нулю ($c = 0$), то решением уравнения (3) является функция

$$\varepsilon(t) = \frac{\overline{\sigma \tau}}{\overline{E_D} \tau} + \int_0^t K(t, t_0) dt_0. \quad (4)$$

Предполагая, что начальные значения $E_0(c_H)$ и $\tau(c_H)$ не зависят от концентрации среды, и выражая изменение E_D по площади поперечного сечения элемента линейной или экспоненциальной функциями, находим ядро уравнения

$$K(t, t_0) = \frac{\overline{\delta_0}}{E_0(c_H) \tau} \left(1 - \frac{\overline{E_D}}{E_0(c_H)} \exp \left(- \int_0^t \frac{\overline{E_D}}{E_0(c_H) \tau} dt_0 \right) \right). \quad (5)$$

В формуле (5) среднее значение длительного модуля деформации равно

$$\overline{E}_D = \int_0^t E(t, x) dx = \overline{E_0 c_H} D(W_c), \quad (6)$$

где $D(W_c)$ – деградационная функция жесткости, определяемая в общем случае из соотношения:

$$D(W_c) = \frac{\iint_{F(t)} E(t, x, y) dx dy}{\iint_{F(0)} E(t_0, x, y) dx dy} \quad (7)$$

С учетом выражения (6) и ядра уравнения (5) деформации ползучести будут определяться из соотношения:

$$\varepsilon(t) = \frac{\overline{\sigma}}{\overline{E_0(c_H)} D(W_c)} + \frac{\overline{\sigma}}{\overline{E_0(c_H)} \tau(c_H)} \int_0^t \left(1 - D(W_c) \exp\left(-\int_0^t \frac{D(W_c)}{\tau(c_H)} dt_0\right) \right) dt_0. \quad (8)$$

При действии сжимающих напряжений деградационная функция $D(W)$ зависит от скорости переноса жидкости в объем и химического взаимодействия материала с агрессивной средой. Основной характеристикой скорости переноса жидкости в пористой среде является обобщенный коэффициент диффузии D , определяемый формулой [4, 5]:

$$D = D_m + \frac{4 R^2 v_m^2}{192 D_m}. \quad (9)$$

Зависимость усредненного значения радиуса пор R от уровня сжимающих напряжений имеет вид уравнения:

$$R^2 = \frac{3V_{по}}{4\pi \Delta N} \exp\{-\alpha\sigma\} \approx R_0^2 \exp\{-\alpha\sigma\}. \quad (10)$$

Тогда выражение, определяющее деградационную функцию $D(W)$ при $k_2 = 1$; $k_m = 1$; $k_1 = E(t)/E(0)$, можно записать в виде:

$$D(W) = 1 - \frac{2k(\xi)\sqrt{(D_m + (4 R_0^2 v_m^2/192 D_m) \exp(-\alpha\sigma)) t}}{h} \left(1 - \frac{E(t)}{E(0)} \right). \quad (11)$$

По результатам проведенных исследований получены зависимости, позволяющие аналитически описать процессы ползучести, происходящие в материале конструкций на основе цементных вяжущих под действием сжимающих напряжений и агрессивных сред. Приведенные зависимости целесообразно использовать для описания процессов деградации цементных композитов, а также прогнозирования поведения и срока службы строительных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В. М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. – Харьков: Выща школа, 1968. – 323 с.
2. Бондаренко В. М. К построению общей теории железобетона (специфика, основы, метод) // Бетон и железобетон. – 1978. – № 9. – С. 20–22.
3. Соломатов В. И., Селяев В. П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.
4. Ошкина Л. М. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов при совместном действии сжимающих напряжений и жидких агрессивных сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1998. – 16 с.
5. Селяев В. П., Соломатов В. И., Ошкина Л. М. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 152 с.

ОШКИНА Л. М., НИЗИНА Т. А., ДУБИНИН Н. В., МИХЕЕВ Д. Н., КАНЕВ Д. Д.
ФОРМИРОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ
У СТУДЕНТОВ АРХИТЕКТУРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрены вопросы формирования конструктивно-технических компетенций у студентов архитектурных направлений обучения. Показано, что современный архитектор должен иметь конструктивно-техническую подготовку на уровне смысловых связей и инженерных концепций. Наилучшим способом осуществления такого подхода к проектированию является использование автоматизированных систем. Приведены примеры студенческих работ, выполненных в программе ArchiCAD, с разработкой конструктивной схемы зданий.

Ключевые слова: архитектор, обучение, компетенции, инженерные знания, конструкторско-технологические знания, современные САПР и BIM-программы, автоматизированное проектирование, конструктивные расчеты.

OSHKINA L. M., NIZINA T. A., DUBININ N. V., MIKHEYEV D. N., KANEV D. D.
DEVELOPING DESIGN AND TECHNOLOGICAL KNOWLEDGE
AMONG STUDENTS OF ARCHITECTURE

Abstract. The authors consider some issues of developing design and technological competences among students of architecture. At present an architect should be trained both in design and technology at the level of semantic relations and engineering concepts. The best way to implement such an approach to design is the use of automated systems. Some examples of student constructive schemes of buildings performed in the program ArchiCAD are presented.

Keywords: architect, training, competences, engineering knowledge, design and technological knowledge, modern CAD and BIM programs, computer-aided design, construction calculations.

Согласно определению, данному в словаре Брокгауза и Эфрона [1], «архитектор (от др. греч. *Αρχι* – *(главный, старший)* и др.-греч. *τέκτων* (*плотник, строитель*) – «главный строитель») – квалифицированный специалист, который на профессиональной основе осуществляет архитектурное проектирование (организацию архитектурной среды), включая проектирование зданий, в том числе разработку объемно-планировочных и интерьерных решений».

Современного архитектора в широком смысле этого понятия можно считать организатором архитектурной среды города. Его основной задачей на протяжении многих столетий остается выработка новых архитектурных идей, основанных на трех извечных принципах пользы, прочности и красоты, заложенных Витрувием [2]. А чтобы творение не

обрушилось, автор должен обеспечить его устойчивость и надежность, что достигается знаниями инженерных дисциплин и соблюдением действующих норм и стандартов.

Создание реальных проектов архитектурных объектов всегда является компромиссом между творческим замыслом и возможностями его осуществления. Из строительной практики известны случаи, когда ошибки в выборе конструкций приводили к трагическим последствиям. Поэтому конструкторская грамотность архитектора неразрывно связана с его профессиональной деятельностью, основанной на поиске конструкторского решения, отвечающего архитектурной идее [3].

Технология строительного производства постоянно усложняется. Профессия современного архитектора также видоизменяется. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования диктует определенные компетенции, владение которыми очень важно для будущих архитекторов. Выпускник бакалавриата по направлению «Архитектура» должен освоить, например, следующие профессиональные компетенции:

– способность разрабатывать архитектурные проекты согласно функциональным, эстетическим, конструктивно-техническим, экономическим и другим основополагающим требованиям, нормативам и законодательству на всех стадиях: от эскизного проекта – до детальной разработки и оценки завершеного проекта согласно критериям проектной программы (ПК-1);

– способность применять знания смежных и сопутствующих дисциплин при разработке проектов, действовать инновационно и технически грамотно при использовании строительных технологий, материалов, конструкций, систем жизнеобеспечения и информационно-компьютерных средств (ПК-5).

В соответствии с представленными компетенциями, очевидно, что кроме творческой направленности профессиональной подготовки, бакалавр-архитектор должен разбираться и в конструктивно-технических вопросах проектирования.

В настоящее время наиболее актуальными способами создания архитектурно-конструктивных образов зданий и сооружений являются системы автоматизированного проектирования и информационного моделирования. Развитие вычислительной техники в XX веке повлекло революцию в архитектурном проектировании. В настоящее время проектная документация разрабатывается главным образом с помощью средств двумерной (2D) и трехмерной (3D) графики. В этих целях отечественными архитекторами чаще всего используются программные продукты Allplan (компания Nemetschek), ArchiCAD (компания Graphisoft), AutoCAD Revit (компания Autodesk). Существенными преимуществами использования подобных систем архитекторами является их совместимость с программным обеспечением, выполняющим конструктивные расчеты (SCAD, ЛИРА и т.п.). Именно при таком

подходе к процессу проектирования архитекторам не обязательно профессионально выполнять расчеты, за них это сделают умные программные средства. Авторам проектов достаточно грамотно назначить конструктивные элементы будущего здания или сооружения.

На архитектурно-строительном факультете Мордовского государственного университета для формирования основ инженерно-конструкторских знаний у архитекторов в учебных планах предусмотрены дисциплины «Строительные конструкции», «Инженерные сети» и др. Воплощение полученных знаний и навыков в проектах может быть осуществлено с использованием современных информационных технологий и программ автоматизированного проектирования и моделирования. В качестве таких пакетов могут быть рассмотрены, например, Allplan и ArchiCAD, основные принципы работы которых рассматриваются в курсе дисциплины «Информационные (компьютерные) технологии в проектировании».

На рис. 1–4 представлены образцы студенческих работ, выполненные в программном комплексе Allplan на стыках учебных дисциплин «Информационные (компьютерные) технологии в проектировании» и «Строительные конструкции» [4; 5].

В процессе конструирования осуществляется пространственная организация объектов, направленная на определение формы, положения, протяженности объектов и размерных отношений между ними.



Рис. 1. Внешний вид общественного здания на стадии монтажа.
Авторы: Дубинин Н. В. и Канев Д. Д.



Рис. 2. 3D разрез общественного здания, представляющий основные конструктивные элементы.
Авторы: Дубинин Н. В. и Канев Д. Д.

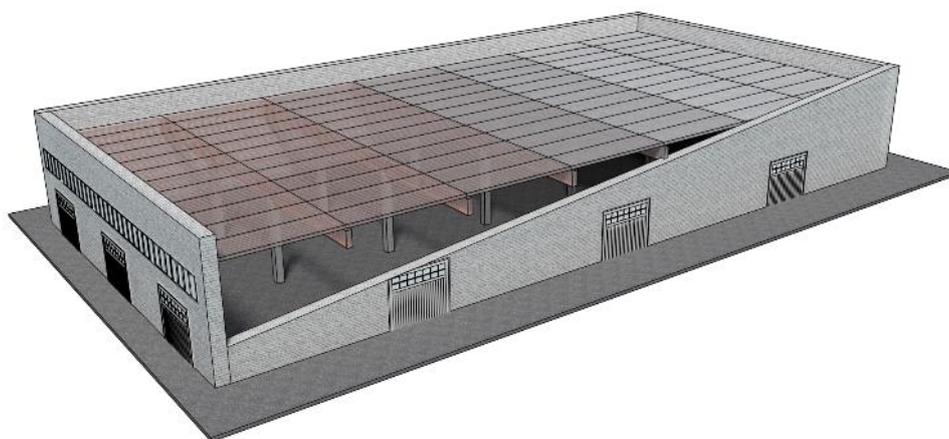


Рис. 3. Внешний вид с частичным разрезом производственного здания. Разрез представляет основные конструктивные элементы. Автор: Михеев Д. Н.

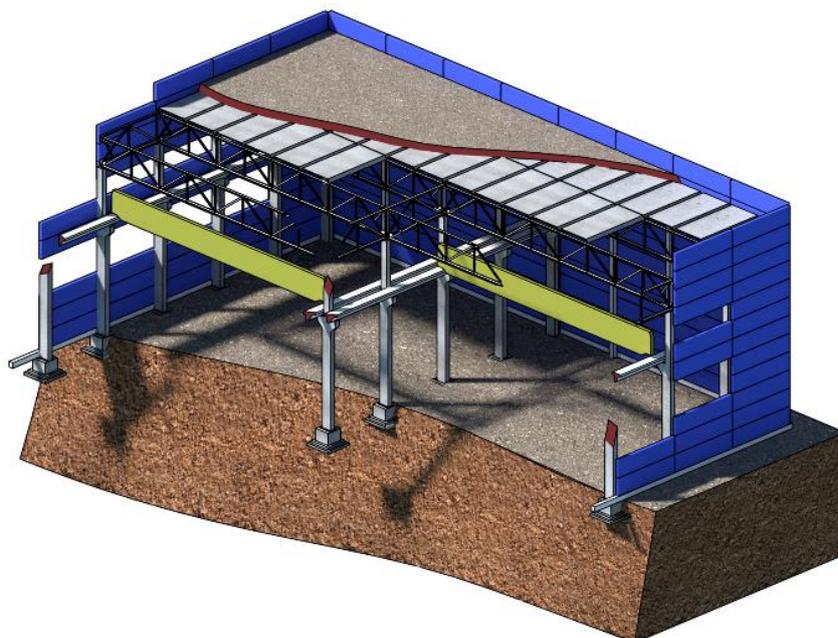


Рис. 4. 3D разрез производственного здания, представляющий основные конструктивные элементы.
Автор: Михеев Д. Н.

Модель здания, созданная архитектором в Allplan Архитектура, проходит дальнейшую проработку конструктивных решений в модуле Конструирование.

По рассчитанным арматурным полям, полученным либо из встроенного расчетного модуля Allplan, либо из внешних программ, например, SCAD, ЛИРА и т. п. Allplan Конструирование автоматически подбирает арматуру, удовлетворяющую прочностным условиям. На рис. 5 показан пример армирования железобетонных конструкций в модуле Конструирование системы Allplan.

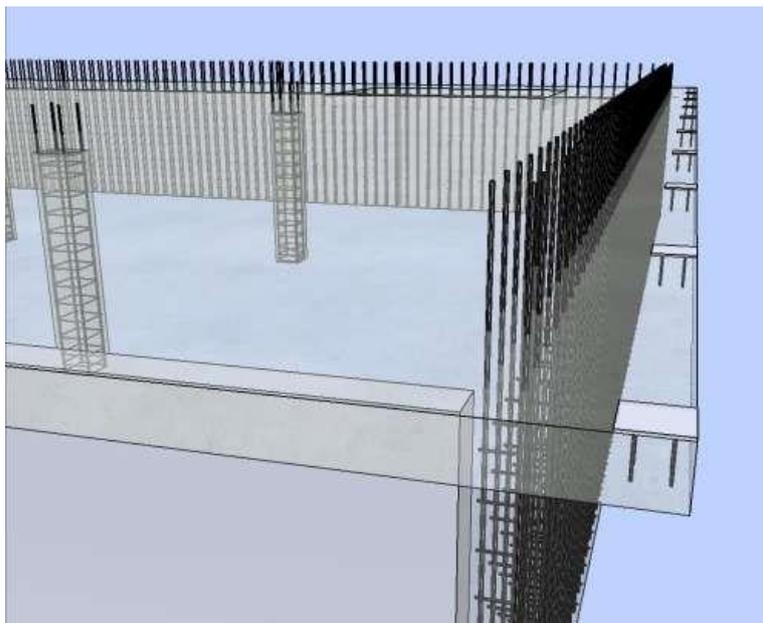


Рис. 5. Моделирование железобетонных конструкций.

Система общетеоретических и инженерно-строительных знаний, получаемых архитектором, должна органически входить в интегральный процесс творческого архитектурного проектирования. Архитектор должен понимать профессиональную и гражданскую ответственность. Архитектор обязан знать инженерные дисциплины, но это не обязывает его быть инженером. Инженерно-технические дисциплины должны создавать систему, которая характеризуется не столько количеством сведений, сколько смысловыми связями. Учитывая специфику образного архитектурного мышления, инженерные курсы должны содержать не столько освоение сложных расчетов, сколько изучение типов конструктивных систем, современных методов конструирования и инженерных концепций. Знания закономерностей в работе конструкций архитектору нужны, чтобы понимать работу сил в материалах. Инженерная подготовка должна развивать у студентов логическое мышление, конструктивное воображение и интуицию.

В архитектурной школе нет места противопоставлению искусства и техники. Конструктивно-техническая подготовка должна научить архитектора понимать, организовывать

и координировать работу представителей смежных профессий по разработке архитектурного замысла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иллюстрированный энциклопедический словарь Ф. Брокгауза и Е. Ефрона. Современная версия. – М.: Эксмо, 2015. – 960 с.
2. Витрувий. Десять книг об архитектуре. – Изд-во Архитектура-С, 2014. – 328 с.
3. Палаткина Г. В., Леонова Е. А. Сущность конструкторской грамотности архитекторов в профессиональной деятельности // Известия ВГПУ. – 2012. – Вып. 5 (Т. 69). – С. 60–64.
4. Ошкина Л. М., Низина Т. А. Использование системы Allplan в учебном процессе на архитектурно-строительном факультете национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва // САПР Allplan в архитектуре и строительстве: Материалы семинара Международного научно-практического фестиваля. – К.: НАУ, 2013. – С. 101–104.
5. Ошкина Л. М., Асташов А. М. Использование информационных технологий проектирования в процессе обучения студентов архитектурных профилей // Сборник научных трудов SWorld. Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития. – Вып. 3. Т. 6. Технические науки. – Одесса: Куприенко С. В., 2013. – С. 20–25.

КОНОВАЛОВ А. Г., АНТОШКИН В. Д
ЛИСТИНГ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЧАТОГО КУПОЛА С ПОМОЩЬЮ
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА AUTODESK AUTOCAD 2015

Аннотация. Рассмотрены вопросы конструктивно-технологического формообразования сферических оболочек на основе треугольной сети. Разработан конструктивно-технологический метод образования треугольных сетей на сфере, которые были названы «Транеран». В каждой из них критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможности укрупнительной сборки и предварительного напряжения.

Ключевые слова: сборная сферическая оболочка, конструктивно-технологическая форма, панель, правильный шестиугольник, разрезка, купол.

KONOVALOV A. G., ANTOSHKIN V. D.
LISTING OF NET DOME CONSTRUCTION
WITH SOFTWARE AUTODESK AUTOCAD 2015

Abstract. The design and technological forming of spherical shells based on triangular network are considered. The authors developed a design method of triangular network construction, which have been called "Traneran". The network optimal criteria are the minimum number of standard structural components and the minimum number of dome components as well as pre-assembly and pre-tension options.

Keywords: team spherical shell, design and technological form, panel, regular hexagon, cutting, dome.

В работе приведен алгоритм графического метода образования треугольной сети на сфере с шестиугольными монтажными панелями, которые названы системой «Транеран» [1 – 3]. Для геометрического построения сетчатого купола с помощью программного комплекса Autodesk AutoCad 2015 после запуска программы необходимо перейти в режим 3D-моделирования (рис. 1). Разобьем алгоритм построения на три основных этапа [4–7].

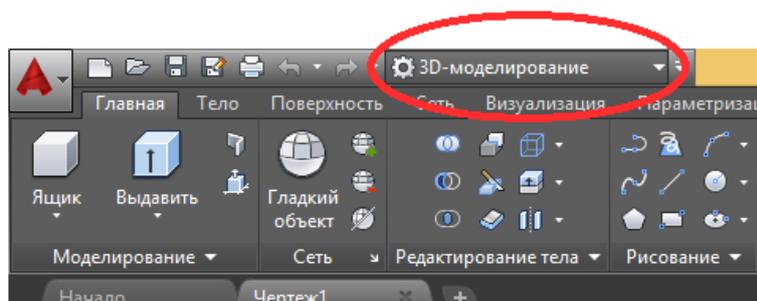


Рис. 1.

Этап 1. Определение осей-границ сектора сферы. Необходимо создать окружность единичного радиуса, проходящую через центр сферы (такие окружности создают «главные линии» на сфере), в плоскости XOY (выбрана по умолчанию). Для дальнейшего удобства обозначим ее «Окружность 1»; для этого, используя кнопку «Центр радиус» (рис. 2), создаем окружность, равную 1000 у.е., используя динамический ввод с центром в точке [0.0.0].

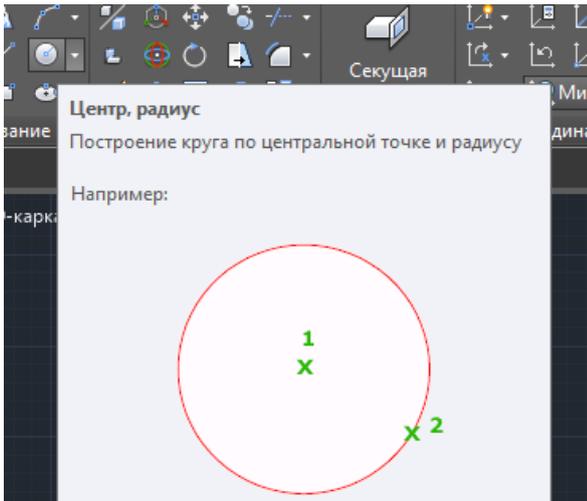


Рис. 2. Центр, радиус.

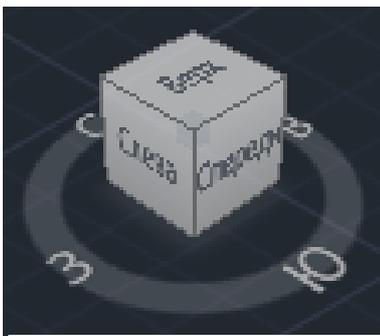


Рис. 3. Видовой куб.

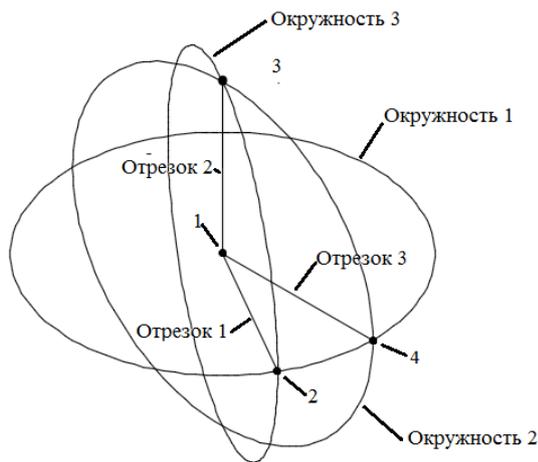


Рис. 4.

После этого ставим видовой куб в положение, как показано на рисунке 3, затем выделяем «Окружность 1» и, используя функцию 3D-поворот , в базовой точке [0,0,0] поворачиваем «окружность 1» с копированием относительно оси «Y», тем самым получая «Окружность 2». С помощью таких же действий создаем «Окружность 3», – копированием с поворотом на 30 градусов «окружности 2» относительно оси «Z», и командой «Отрезок» проводим отрезки, ограничивающие необходимый нам сектор на экваторе (окружность 1). После выполнения указанных действий мы обязательно получаем 3 окружности в разных плоскостях как показано на рисунке 4 (для удобства и наглядного восприятия окружности можно делать разных цветов).

Этап 2. Построение окружностей для вписания шестиугольной сети. Для формирования листинга с определенным шагом главных линий в данном случае 15 градусов, нам необходимо задать «Пользовательскую систему координат» (далее ПСК) плоскости окружности 3 с помощью кнопки  на панели задач и выбрать точки 1, 2, 3 (рис. 4). Затем скопировать «отрезок 1» с поворотом с базовой точкой в центре сферы с шагом 15 градусов (в общем случае – шаг главных линий).

Для этого необходимо нажать кнопку «Повернуть»  и в командной строке на запрос «базовая точка» указать центр сферы. Затем следует нажать «Копия», после чего указать «Шаг

базовой точкой в центре сферы с шагом 15 градусов (в общем случае – шаг главных линий). Для этого необходимо нажать кнопку «Повернуть»  и в командной строке на запрос «базовая точка» указать центр сферы. Затем следует нажать «Копия», после чего указать «Шаг

главных линий» (в нашем случае 15 градусов), после этого произвести те же самые действия со следующим отрезком и так далее, пока последующий отрезок не совпадет с отрезком 2. Необходимо также копировать отрезок 1 с поворотом на угол (15, 30, 45, 60, 75, 90); в конечном итоге должно получиться так, как показано на рисунке 5.

Для дальнейших построений необходимо построить «отрезок 4» – установить «Мировую систему координат», выделить «отрезок 1», нажать кнопку «Повернуть»  и в командной строке на запрос «базовая точка» указать центр сферы. Затем нажать «Копия» и

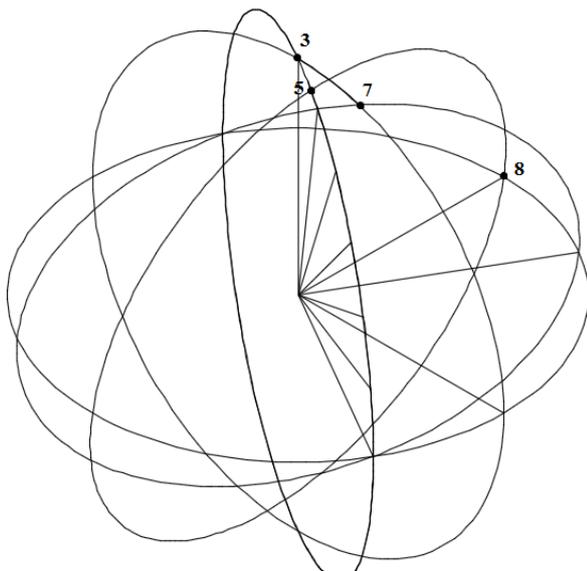


Рис. 5.

после этого указать угол поворота 90 градусов. Так мы получаем «отрезок 4». Следующим этапом построим отрезок 5 по тому же принципу, только поворотом на 90 градусов «отрезка 3». Тем самым получаем точку 8, как показано на рисунке 5.

После этого необходимо построить окружность 5; ее плоскость перпендикулярна плоскости окружности 3 и находится в плоскости, образованной точками [0,0,0]: точка 5, точка 6. Для построения окружности 5 необходимо задать ПСК, образованную точками

1, 5, 6, и провести окружность в этой плоскости с центром [0,0,0]. Следует радиусом указать точку 5 (рис. 5).

Затем необходимо провести «окружность 6» единичного радиуса перпендикулярно «окружности 2», проходящую через центр основной сферы и середину дуги, ограниченной точками 3 и 7 (рис. 5).

Для данного построения нам необходимо задать ПСК по точкам 3, 1, 4; используя объектную привязку «Ближайшая», командой «Дуга» начертить дугу с центром в точке 1, длину установить точками 3, 7 и выбрать одну произвольную точку на окружности, ограниченной точками 3 и 7. После этого мы зададимся новой ПСК, которая будет определяться точками: 1, 8, и точкой, которая будет являться серединой дуги 3-7 (середины дуги следует задавать при помощи объектной привязки «Середина»).

Таким образом, мы получили точки 3 и 7. Они являются центрами окружностей, в которые в дальнейшем будет вписаны шестиугольники сети. На основе вписанных шестиугольников мы построим треугольные сети на сфере. Отрезки 3-5 и 5-7 являются радиусами 1-ой и 2-ой окружности сети соответственно.

Вначале удаляем все ненужные для дальнейших построений линии и приступаем к построению первой окружности сети. Для этого проведем отрезок 1-5 и отразим его зеркально относительно отрезка 1-3 в плоскости 3, 1, 2 и в плоскости 3, 1, 8 или в двух любых других плоскостях которым принадлежит отрезок 1-3. Таким образом, мы получаем три точки окружности, которая лежит на поверхности сферы. Затем необходимо задать новую ПСК, которая определяется тремя полученными точками, после этого командой «Окружность, три точки» построить первую окружность сети (рис. 6).

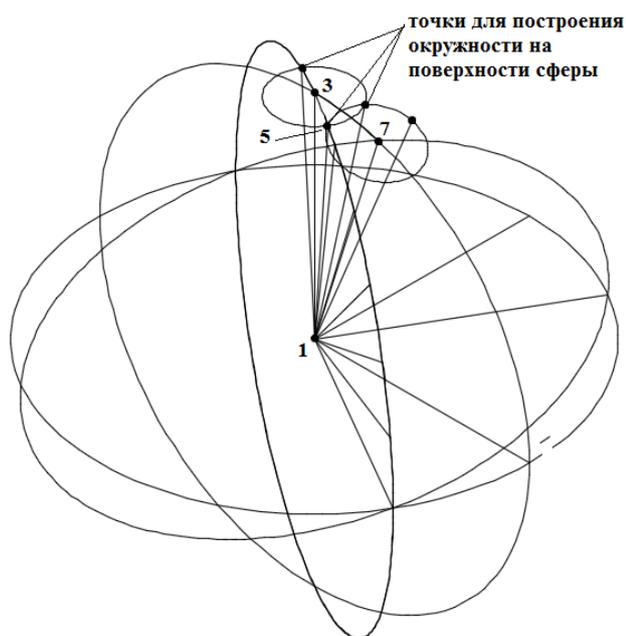


Рис. 6.

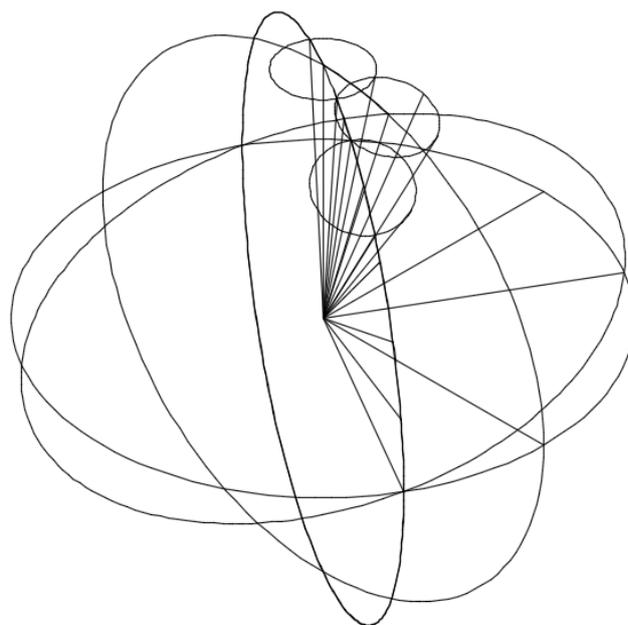


Рис. 7.

Следующим шагом мы приступаем к построению окружности 2, лежащей на поверхности сферы, ее центр будет располагаться на пересечении окружности 2 (рис. 4) и второй главной линии сферы, т.е. в точке 7. Для построения данной окружности нам необходимо задать новую ПСК, определяемую точками 1, 7, 8 и сделать зеркальное копирование отрезка 1-5 относительно отрезка 1-7. Так мы получим отрезок 1-8, где точка 8 является второй точкой окружности. Для построения окружности на поверхности сферы нам необходимо три точки, и мы задаемся новой произвольной ПСК так, чтобы отрезок 1-7 лежал в ее плоскости, и делаем зеркальное копирование отрезка 1-5 или 1-8. Таким образом мы получаем три точки для построения второй окружности. Далее мы определяем новую ПСК получившимися точками и командой «Окружность, три точки» строим вторую окружность.

Аналогично строим третью окружность с центром в точке пересечения «окружности 3» (рис. 4) и третьей главной линии (точка 10) (рис. 7). Для этого проведем отрезок 1-11, который находится на пересечении второй окружности, находящейся на окружности сферы и

«окружности 3» точка 11 (рис. 7). Далее задаемся новой ПСК, определенной точками 1, 10 и 8, и зеркально копируем отрезок 1-11, чтобы получить вторую точку окружности. Далее, по подобию предыдущих построений, задаемся новой произвольной ПСК, которой принадлежит отрезок 1-10, и копируем зеркально один из полученных отрезков, чтобы получить третью точку для построения окружности. Затем задаемся новой ПСК, определяемой тремя полученными точками, и по ним строим также окружность. Таким образом мы получаем третью окружность, которая лежит на поверхности сферы.

Центр четвертой окружности, лежащей на поверхности сферы, находится в точке пересечения окружности 2 и следующей главной линии (рис. 8). Построение производится аналогично построению второй окружности, лежащей на поверхности сферы.

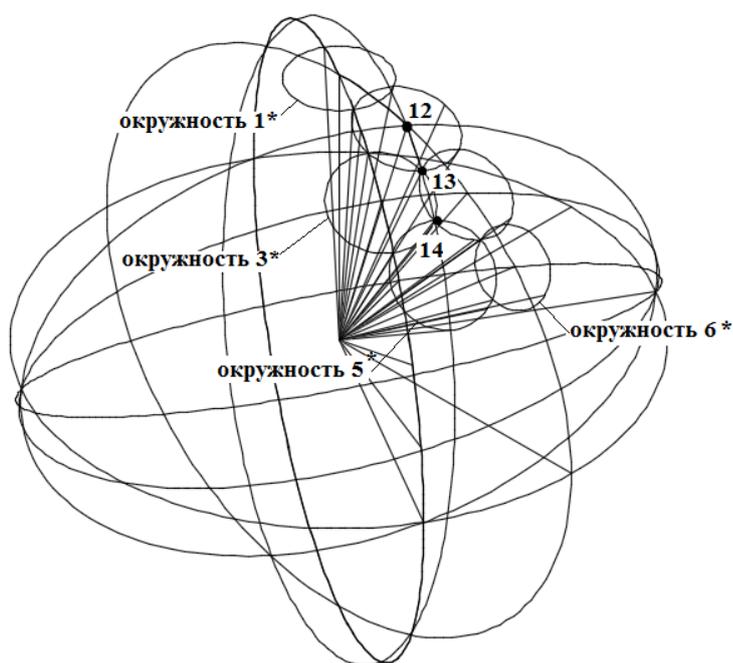


Рис. 8.

Точка центра следующей окружности лежит на пересечении следующей главной линии, перпендикулярной дуге-оси сектора сферы и окружности, проходящей через центр второй окружности, лежащей на поверхности сферы, и двух точках пересечения третьей и четвертой окружностей поверхности сферы. Для этого зададимся плоскостью, определяемой точками 12, 13, 14, и через них проведем искомую окружность. Таким образом мы получили центр окружности 5 в

точке пересечения получившейся окружности и главной линии (рис. 8). После этого строим шестую окружность аналогично окружности 4.

Далее для построения сектора из треугольной сети на сфере нам необходимо отразить зеркально получившиеся окружности таким образом, чтобы окружность 5 и окружность 6 остались на своем месте. Для этого зададимся новой ПСК и командой «Отразить зеркально»



получим окружности (рис. 9). Затем точно также отображаем все окружности относительно плоскости окружности 3. Таким образом, мы формируем сектор – лепесток оболочки на сфере (рис. 10).

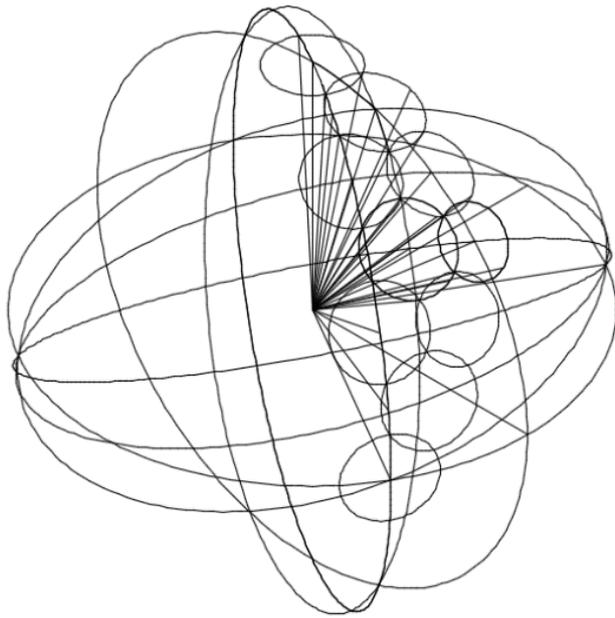


Рис. 9.

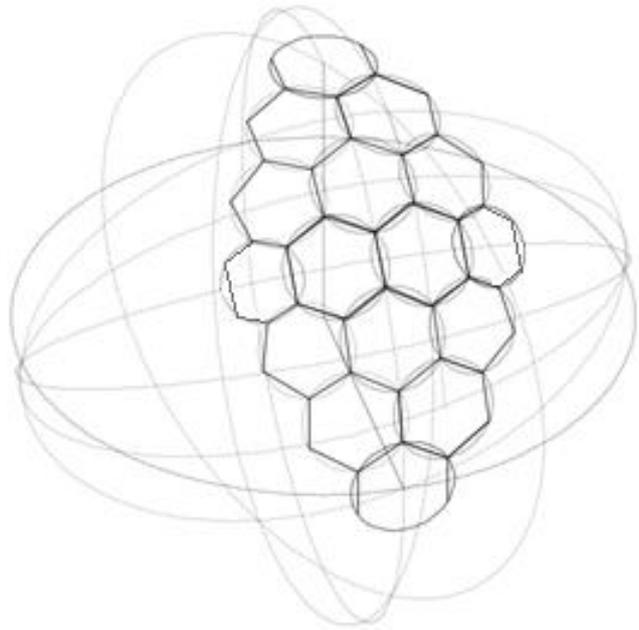


Рис. 10.

По точкам пересечений окружностей строим вписанные в окружность правильные и неправильные шестиугольники, тем самым получая структуру сектора сетчатого купола.

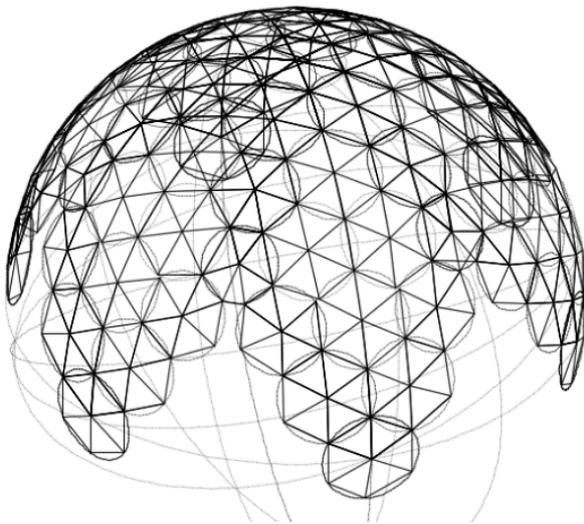


Рис. 11.

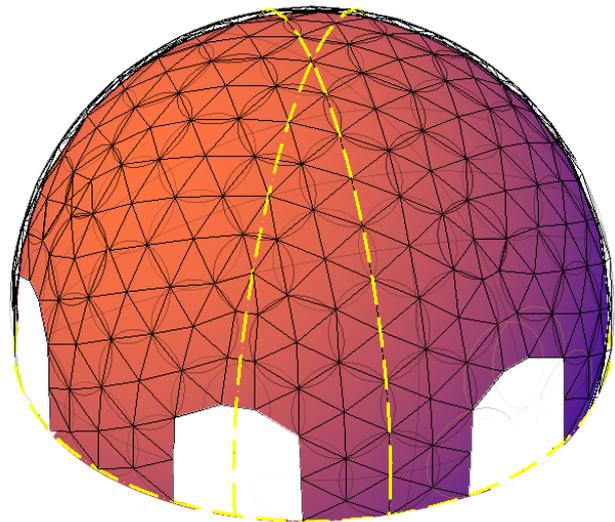


Рис. 12.

Этап 3. Формирование треугольной сети оболочки. Командой  «Поворот» с копированием на 60 градусов получаем полную сферу. Удаляем все вспомогательные линии построения (рис. 11) и добавляем шестиугольники или фрагменты их для образования проемов в покрытии купола (рис. 12).

Выводы. Разработанный графический метод построения сети системы «Транеран» значительно упрощает задачу проектирования реальных купольных покрытий. Сборные сферические оболочки могут применяться для покрытий зданий различного назначения, а также для устройства сферических отражателей в зеркальных антеннах и концентраторах энергии. По сравнению с аналогами, эти оболочки имеют максимум однотипных монтажных

элементов, возможности укрупнительной сборки и максимум эстетического качества при минимуме сборных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов Г. Н. Композиционное формообразование кристаллических куполов и оболочек // Архитектура СССР. – 1977. – № 7. – С. 32.

2. Антошкин В. Д., Юркин Ю. В., Нежданов С. М., Комков Е. А., Нежданов Р. С. Комплексные инновационные технологии в процессе преподавания архитектурных дисциплин // Инновационные процессы в высшей школе: Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции. – Краснодар: Изд-во ФГБОУ ВПО Куб. ГТУ, 2011. – С. 167–168.

3. Антошкин В. Д. Архитектурно-строительное проектирование крупнопанельных общественных зданий: учебное пособие – электронное издание с грифом Мин. обр. науки рег. № 659 от 15.12.2009. – Саранск: ГОУВПО «МГУ имени Н.П. Огарёва», 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

4. Антошкин В. Д., Никонов В. И. К вопросу оптимизации треугольной геометрической сети на сфере // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-8. – С. 1669–1673.

5. Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеев В. Т. Сборная сферическая оболочка. Патент на полезную модель №129534 от 27.06.13 г.

6. Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеев В. Т. Сборная сферическая оболочка. Патент на изобретение RU №2012116363 от 20.02.14 г.

7. Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеева И. В., Антошкин Д. В. Сборная сферическая оболочка. Патент на изобретение RU № 2564545 от 07.09.2015 г.

ДОЛГОВ И. П., КУПРИЯШКИНА Е. И., КУПРИЯШКИНА Л. И., НУРЛЫБАЕВ Р. Е.

НОВЫЕ СТЕНОВЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация. Проведен анализ теплоизоляционных ограждающих конструкций. Указаны преимущества и недостатки известных полезных моделей. Рассмотрены преимущества вакуумированных теплоизоляционных панелей и их использование. Приведена технология изготовления новой ограждающей стеновой панели.

Ключевые слова: теплопроводность, микрокремнезем, вакуумированная плита, наполнитель, оболочка, конструкция, панель, теплоизоляционный материал.

DOLGOV I. P., KUPRIYASHKINA E. I., KUPRIYASHKINA L. I., NURLYBAEV R. E.

NEW WALL THERMAL INSULATION CONSTRUCTION

Abstract. The article presents an analysis of heat-insulating walling. The advantages and disadvantages of the known utility models are considered. The advantages of evacuated insulation panels and their use are demonstrated. The technology of new enclosing wall panel manufacturing is presented.

Keywords: thermal conductivity, microsilica, vacuum plate, filler, sheath, design, panel, heat-insulating material.

Энергоэффективный дом – это здание, в котором минимальны потери энергии и энергопотребление. Главный принцип строительства такого дома – достижение наибольшей герметичности здания, устранение мостиков холода и применение энергосберегающих технологий. Возведение энергоэффективного дома дороже примерно на 15% нежели обычного, но в эксплуатации он обходится гораздо дешевле (ориентировочно на 60-70%), что делает эти дома гораздо более интересными для потребителей. Главный показатель комфортности внутренней среды — это результирующая температура жилых помещений, уровень которой в российском стандарте составляет 19-20°C. Этот фактор обязует проектировщика выбирать более высокие теплоизоляционные требования, т.к. условия комфорта зависят от температуры внутреннего воздуха и температуры внутренних поверхностей ограждений помещения.

Теплоизоляционные материалы характеризуются по нескольким признакам: по структуре, жесткости, виду исходного сырья, теплопроводности, горючести и средней плотности.

По виду исходного сырья теплоизоляционные материалы делятся на три основные группы: органические (на основе деревообрабатывающих отходов, торфа, соломы, камыша);

неорганические (материалы, основой которых являются минералы); композиционные (смеси из органических и неорганических материалов).

По форме теплоизоляционные материалы подразделяются на рулонные и шнуровые (шнуры, жгуты, маты), штучные (плиты, кирпичи, цилиндры, блоки), сыпучие и рыхлые (молотый диатомит, стеклянная вата). По структуре бывают волокнистые (минераловатные и др.), ячеистые (пенопласт, пеностекло), зернистые (вспученный перлит и вермикулит), поризованные (бетоны, растворы). Теплоизоляционные материалы по средней плотности делят на группы и марки. К первой группе относятся материалы особо низкой плотности марок 15, 25, 35, 50 и 70. Вторая группа включает марки 100, 125, 150 и 175. В третью группу входят материалы под марками 200, 225, 250, 300 и 350. Четвертую группу составляют материалы, имеющие марки: 400, 450, 500, 600. По жесткости их подразделяют на твердые, повышенной жесткости, жесткие, полужесткие и мягкие.

По теплопроводности материалы разделяют на три класса. Изделия с низкой теплопроводностью относятся к классу А, со средней теплопроводностью – к классу Б; класс В – это материалы с повышенной теплопроводностью. В соответствии со СНИП 21-01-97* теплоизоляционные материалы делятся на горючие (Г) и негорючие (НГ). Горючие образуют четыре группы: сильногорючие (Г4), нормальногорючие (Г3), умеренногорючие (Г2) и слабогорючие (Г1).

К новым эффективным теплоизоляционным материалам нового поколения относятся вакуумированные плиты. Теплоизолирующие свойства и продолжительность жизни вакуумной изоляционной панели определяются технологическими и конструктивными факторами: свойствами наполнителя; начальным уровнем вакуума в панели; проницаемостью оболочки; количеством и эффективностью поглотителя остатков газа; размером и толщиной панели; условиями ее работы; способом крепления; методами защиты.

Вакуумированная теплоизоляционная панель состоит из пористого материала-наполнителя [1], помещенного в непроницаемую оболочку. Воздух из панели откачивается до давления от 0,1 до 100 Па, после чего оболочка герметизируется.

Как и к другим материалам, к вакуумированным теплоизоляционным панелям предъявляются особые требования. Для такого типа панелей обязательным является условие сохранения герметичности. Оболочки для панелей рекомендуется выполнять из нескольких слоев, один из них содержит очень тонкую металлическую пленку (алюминий), на которую для придания механической прочности с обеих сторон нанесен слой пластика.

Чтобы сформировать оболочку (пакет) для наполнителя, пленка заваривается по краям. Тонкий слой пластика с низкой температурой плавления обычно наносится на внутреннюю поверхность пленки, после чего она может быть заварена под воздействием температуры и

давления. Проницаемость сварных соединений пластика для газа и влаги гораздо выше, чем проницаемость остальной поверхности оболочки. Для минимизации этого отрицательного эффекта предлагается уменьшить толщину сварного соединения и увеличить его ширину.

Для продления жизни вакуумных панелей используют поглотители влаги и газов, которые содержатся внутри панели и должны соответствовать количеству и типу наполнителя. Важно, чтобы количество и тип поглотителя соответствовали типу оболочки панели, а также времени ее эксплуатации. Наполнитель на основе пенопластиков не может адсорбировать ни газов, ни влаги, поэтому его предлагается вводить в состав оболочки панели. Мелкопористые наполнители на основе кремнезема сами по себе являются естественными адсорбентами или поглотителями. Следовательно, поглотитель в панелях на основе этих материалов не требуется даже при эксплуатационном периоде 10–20 лет, если используется соответствующий материал оболочки. Поглотители могут значительно увеличить стоимость панели и, как правило, включают соли тяжелых металлов, небезопасные для окружающей среды [2].

Данный теплоизоляционный материал позволяет значительно уменьшить толщину слоя утеплителя, повышая при этом сопротивление ограждающей конструкции теплопередаче. Для создания новых качественных теплоизоляционных материалов и конструкций был проведен патентный обзор с целью установления наиболее перспективных видов теплоизоляционных стеновых панелей.

В патенте №2398078 представлена трехслойная железобетонная панель, состоящая из теплоизоляционного слоя, внутреннего и наружного железобетонного слоя, которые связаны между собой армированными бетонными шпонками, проходящими через теплоизоляционный слой. Армированные бетонные ребра имеют площадь, которая определяется из соотношения толщины среднего слоя, площади панели, коэффициентов теплопроводности, материалов арматуры, утеплителя, слоев панели и требуемого сопротивления теплопередачи.

Известен патент №2156340, в котором представлена строительная сэндвич-панель, предназначенная для возведения стен и кровли сооружений. Она представляет собой каркас, выполненный из алюминиевых и стальных профилированных листов и слоев утеплителя из минеральной ваты или пенопласта на основе полистирола, расположенного между ними. Эта конструкция позволяет исключить вредные (токсичные) выделения из компонентов утеплителя и повысить огнестойкость панели.

В патенте №2372454 предлагается создать надежную конструкцию стены с повышенной газо- и теплостойкостью, не применяя дополнительные конструктивные элементы. Теплоизоляционная панель состоит из двух поверхностных слоев, представленных металлическими листами, между которыми расположены теплоизоляционные материалы,

состоящие из блоков пеностекла, уложенных с перевязкой швов и соединенных между собой клеящим композитом. Торцевые поверхности зеркально смещены относительно друг друга и образуют замковый вид «шип-паз», позволяющий соединять панели одного типа между собой.

Патент № 106715 представляет вакуумированную теплоизоляционную панель с гибкой оболочкой и с размещенным внутри наполнителем из многослойного теплоизоляционного материала: алюминиевой фольги, бумаги и пластика, нарезанного на куски размером до 10 мм. Панель изготовлена путем горячего прессования под давлением.

В вакуумированной теплоизоляционной панели (патент № 120437) наполнителем является наноструктурированный порошок из частиц диатомита, содержащий диоксид титана в соотношении от 5 до 20% от веса наполнителя. Диатомит находится внутри защитного слоя; в качестве барьера используется металлизированный полимерный композит. Между наполнителем и барьерным слоем находится мембранный полимерный слой. Она обладает меньшей теплопроводностью, повышенными теплозащитными свойствами, долговечностью и стабильностью характеристик в процессе эксплуатации. Снижается вес панели, а также упрощается технология изготовления.

Данная панель состоит из внутреннего слоя, выполненного из керамзитобетона, наружного высокопрочного бетона, теплоизоляционного слоя и каркаса. Каркас представляет собой замкнутую раму, выполненную в форме швеллера. Перемычки продлены до боковых поверхностей, выполнены, как и каркас, из композитного материала. Во внутреннем бетонном слое находится дополнительная армирующая сетка, которая соединена гибкими связями из композитных анкерных креплений с контуром каркаса. Теплоизоляционный промежуточный слой содержит панель, выполненную из вакуумированного наноструктурированного порошка частиц диатомита и упакованную в термостойкую полимерную пленку.

На рис. 1 изображен вид в разрезе трехслойной стеновой панели, на рис. 2 – вид в плане, причем в левой части панели изображена оголенная армирующая сетка.

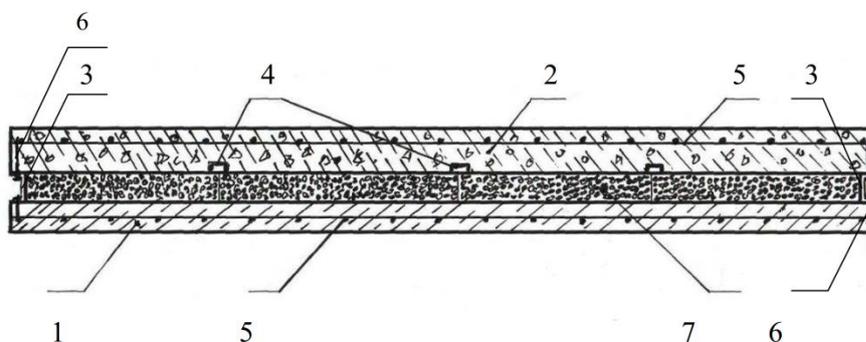


Рис. 1. Трехслойная стеновая панель в разрезе: 1 – наружный бетонный слой; 2 – внутренний бетонный слой; 3 – каркас; 4 – перемычки; 5 – армирующие сетки; 6 – анкерные крепления; 7 – вакуумированная теплоизоляционная панель.

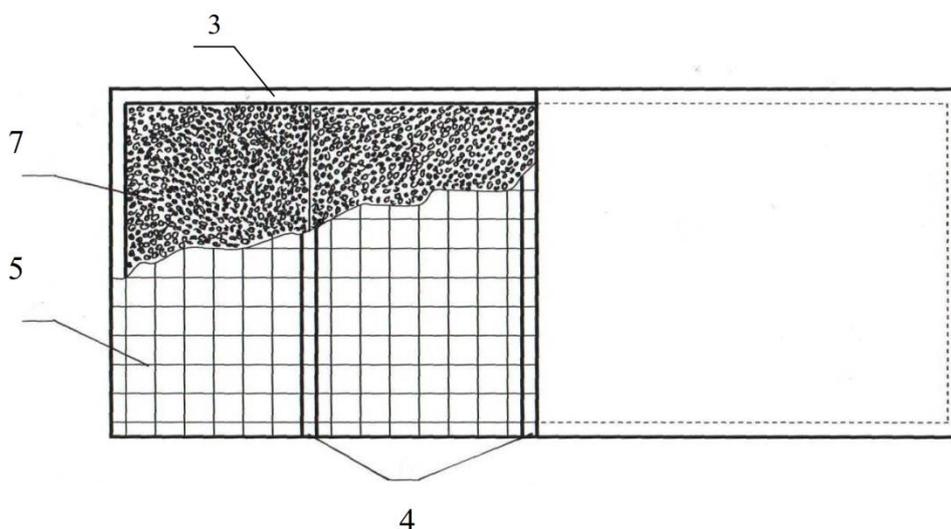


Рис. 2. Трехслойная стеновая панель.

Трехслойная стеновая панель (рис. 1, 2) включает соединенные между собой наружный бетонный слой, выполненный из мелкозернистого высокопрочного бетона марки \geq В40, внутренний бетонный слой из плотного керамзитобетона из композитного профиля (швеллер по ТУ 2296-16647653-004-2014) в виде замкнутой прямоугольной рамы с перемычками. Противоположные концы перемычек продлены до боковых поверхностей панели и выполнены открытыми в виде монтажных проемов. Армирующие сетки, расположенные в наружном и внутреннем бетонных слоях, выполнены из композитной арматуры и соединены с каркасом по его контуру композитными анкерными креплениями. Толщина защитного наружного и внутреннего бетонных слоев составляет 15 – 25 мм. Размер ячеек армирующих сеток находится в пределах от 40 до 200 мм; диаметр проволоки – от 3 до 6 мм. Промежуточный теплоизоляционный слой содержит теплоизоляционную панель, выполненную из вакуумированного наноструктурированного порошка частиц диатомита, упакованного в термостойкую полимерную пленку [3].

Способ изготовления трехслойной стеновой панели заключается в следующем. На дно формы на фиксаторах укладывают армирующую сетку наружного бетонного слоя и по периметру формы размещают каркас. После установки каркаса производят последовательную укладку наружного бетонного слоя, промежуточного теплоизоляционного слоя, который укладывают в один или два слоя с перевязкой швов. Устанавливают армирующую сетку, которую крепят к каркасу композитными анкерными креплениями, с заливкой внутреннего бетонного слоя с одновременной вибрацией всех слоев панели. После укладки последнего внутреннего бетонного слоя производят заглаживание его поверхности.

Трехслойная стеновая панель по сравнению с известными решениями позволяет повысить теплозащитные свойства, долговечность, так как отсутствует коррозия металла,

снизить вес панели, уменьшить теплопроводность в два раза, обеспечить стабильность свойств в процессе эксплуатации за счет использования теплоизоляционной панели, а также упростить технологию изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2526454 Российская Федерация, МПК С01В 33/18, С09С 1/28 Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема / Селяев В.П., Осипов А.К., Седова А.А., Куприяшкина Л.И.; заявитель Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарёва. – №2013104054; заявл. 30.12.13; опубл. 30.06.14, Бюл. № 23.

2. Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Неверов В.А., Селяев П.В., Окин М.А. Прогнозирование теплопроводности наполнителей вакуумных изоляционных панелей // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 4. – С. 30–37.

3. Пат. 152710 Российская Федерация, МПК Е 04 С 2/00 Трехслойная стеновая панель / Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Селяев П.В., Куприяшкина Е.И., Долгов И.П.; заявитель Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарёва. – № 2014144642; заявл. 05.11.14; опубл. 22.05.14, Бюл. № 21.

ПАНЧИНА А. А., КИЛЬДЕЕВ И. Р., ТЕРЕШКИН И. П.
ЭФФЕКТИВНАЯ ДОБАВКА ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ
НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ЦЕОЛИТОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД
РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

Аннотация. Представлены результаты исследований по разработке эффективной добавки для цементных сырьевых смесей на основе природных цеолитосодержащих пород Республики Мордовия. Показана возможность получения на основе цеолитосодержащей породы Атышевского месторождения Республики Мордовия добавки, позволяющей значительно интенсифицировать гидратацию цемента при ее введении в сырьевые смеси, сокращать время тепловлажностной обработки композиций на их основе, существенно повышать прочность композитов в поздние сроки твердения.

Ключевые слова: цеолит, клиноптилолит, цеолитосодержащая порода, цемент, бетоны, модификация, строительные материалы.

PANCHINA A.A., KILDEEV I.R., TERESHKIN I.P.
EFFECTIVE ADDITIVES FOR RAW CEMENT MIXTURES BASED ON NATURAL
ZEOLITE-CONTAINING ROCKS OF MORDOVIA REPUBLIC

Abstract. The article presents the results of studies of the effective additives for raw cement mixtures based on natural zeolite-containing rocks of the Republic of Mordovia. The authors have proved the possibility of obtaining an additive, based on Atyashevsky field of Mordovia, which will significantly intensify the hydration of cement during its introduction into raw mixtures, reduce the time of heat and humidity treatment of compositions based on them, significantly increase the strength of the composites in the later stages of hardening.

Keywords: zeolite, clinoptilolite, zeolite-containing rock, cement, concrete, modification, construction materials.

На сегодняшний день и на ближайшую перспективу цементные сырьевые смеси являются одними из ключевых строительных материалов, применяемых в строительстве. А снижение их материалоемкости с одновременным улучшением потребительских качеств является приоритетной задачей строительного материаловедения.

В настоящее время существует реальная возможность снижения материалоемкости цементных композиций за счет целенаправленного введения различных наполнителей, состав и содержание которых влияет на физико-механические свойства цементного камня. Применение в технологии цементных композитов добавок-наполнителей позволяет: снижать расход клинкерной составляющей в материалах без ухудшения их качества; управлять

кинетикой и степенью гидратации минералов цемента; в результате химического взаимодействия наполнителей с продуктами гидратации получать качественно новые соединения и структуры; уменьшать объемные деформации в твердеющих цементных композитах и их тепловыделение; повышать трещиностойкость цементного камня и его долговечность в агрессивных условиях эксплуатации. С этих позиций представляется перспективным использование в технологии цементных вяжущих и бетонов на их основе цеолитов различного происхождения [1–3].

Цеолиты являются водными алюмосиликатами, состоящими, в основном, из четырех-, пяти- и шестичленных или более сложных колец, образованных кремнийкислородными тетраэдрами. Общая формула цеолитов может быть представлена в следующем виде: $M_x [(AlO_2)_x (SiO_2)_y]_z \cdot nH_2O$, где M – катион с валентностью n ; z – число молекул воды. Во внутрикристаллическом пространстве цеолитов имеется система соединенных между собой микрополостей, в которых располагаются обменные катионы и молекулы воды. Из сорока известных цеолитовых минералов большими запасами и необходимым комплексом свойств для практического использования обладают только некоторые из них. Это промышленные цеолиты: клиноптилолит, эрионит, шабазит, филлипсит. Среди промышленных цеолитов наибольшее значение имеет клиноптилолит ($Na_3[Al_6Si_{30}O_{70}] \cdot 24H_2O$), запасы которого превышают запасы всех промышленных цеолитов вместе взятых [1; 3].

Клиноптилолит принадлежит к группе гейландита; биологический возраст вмещающих пород относится к четвертичному – каменноугольному периоду. Основные катионы, содержащиеся в клиноптилолите – это Na, K, Ca. Клиноптилолит Мордовского месторождения отличается по химическому составу повышенным содержанием оксидов кальция и железа, а по физико-механическим свойствам – повышенным значением пористости. Идеализированный состав элементарной ячейки для клиноптилолита Мордовского месторождения имеет вид: $Na_3Al_6Si_{31}O_{94}Ca_9Fe_6K_3Ti_{0.5}Mg \cdot 13H_2O$. Согласно данным [1–3], клиноптилолиты Мордовского месторождения относятся к группе наполнителей с основными свойствами, электрохимический потенциал которых находится в пределах 4,8÷5,2 эВ. Средний их химический состав, полученный химическим и рентгеноструктурным анализом, содержит следующие оксиды: SiO_2 – 49,21; Al_2O_3 – 8,52; Fe_2O_3 – 12,94; TiO_2 – 1,08; CaO – 12,71; MgO – 1,27; $(Na_2O + K_2O)$ – 6,64; H_2O – 6,06; прочие – 1,57 [2; 3].

Цеолитсодержащие породы – сравнительно новый вид минерального сырья, широкого внедрения которого в производство еще не произошло, так как промышленные испытания стали проводиться только в последние десятилетия. Цеолитсодержащие породы являются сырьем многоцелевого использования. Наибольшее количество их используется в

строительстве как активные минеральные добавки при производстве цемента и керамзита. Перспективно их применение при производстве бесцементных шлакощелочных вяжущих бетонов, кирпича, строительной керамики. В Республике Мордовия выделяются по разведанным запасам цеолитсодержащих пород пять наиболее перспективных территорий, расположенных вблизи следующих населенных пунктов: с. Дубенки, с. Кочкурово, Мачказеровские Выселки, с. Енгальчево, п. Атяшево.

Исследования по применению цеолитсодержащих пород Атяшевского месторождения Республики Мордовия в качестве наполнителя для цементных вяжущих показывают перспективность введения клиноптилолита различной дисперсности – повышение прочности цементного камня при одновременной экономии цемента может достигать до 20% (данные по прочности цеолитоцементных составов приведены в таблице 1 и представлены на рисунке 1) [2].

Таблица 1

Составы и прочность наполненных цеолитсодержащей породой Атяшевского месторождения Республики Мордовия цементных сырьевых композиций

№ п/п	Размер частиц наполнителя, мм	Состав вяжущего, %		Водоцементное отношение	Прочность при сжатии, МПа
		портландцемент	наполнитель		
1	менее 0,08	95	5	0,3	54,16
2	0,08 – 0,14	95	5	0,3	46,96
3	0,14 – 0,315	95	5	0,3	31,53
4	0,315 – 0,63	95	5	0,3	28,74
5	менее 0,08	90	10	0,3	39,77
6	0,08 – 0,14	90	10	0,3	44,51
7	0,14 – 0,315	90	10	0,3	30,75
8	0,315 – 0,63	90	10	0,3	26,99
9	менее 0,08	85	15	0,3	41,11
10	0,08 – 0,14	85	15	0,3	49,95
11	0,14 – 0,315	85	15	0,3	35,25
12	0,315 – 0,63	85	15	0,3	24,24
13	менее 0,08	80	20	0,3	28,71
14	0,08 – 0,14	80	20	0,3	51,36
15	0,14 – 0,315	80	20	0,3	45,26
16	0,315 – 0,63	80	20	0,3	25,31

* Предел прочности при сжатии ненаполненных цементных композитов – 44,87 МПа.

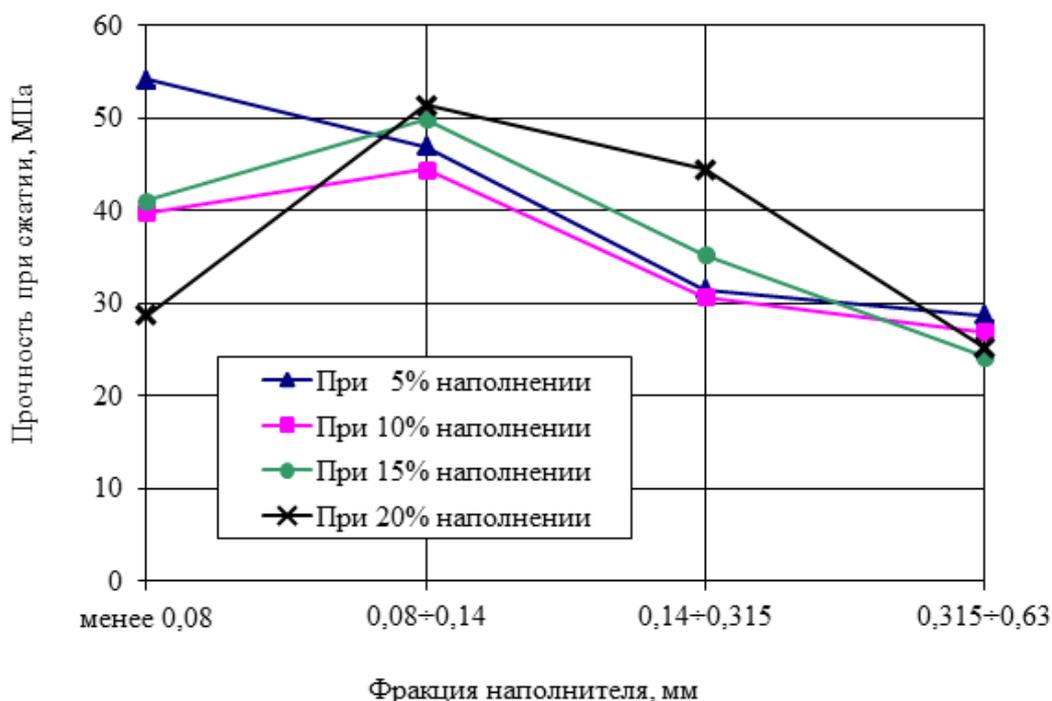


Рис. 1. Изменение прочности наполненных цеолитсодержащей породой Атяшевского месторождения Республики Мордовия цементных композиций в зависимости от дисперсности наполнителя.

В тонкодисперсном состоянии цеолитсодержащие породы в присутствии влаги способны реагировать с гидроксидом кальция, выделяющегося при твердении портландцемента, образуя практически нерастворимые продукты реакции. Аморфный кремнезем, содержащий в клиноптилолите, вступая в реакцию с гидроксидом кальция, образует гидросиликат кальция, который способствует повышению прочности.

Еще более значимых результатов от применения цеолитсодержащих пород в цементных сырьевых смесях достигают за счет их предварительной химической модификации. Так, полученная по разработанной технологии [2] на основе клиноптилолита Мордовского месторождения добавка позволяет интенсифицировать процесс гидратации цемента, сократить время тепловлажностной обработки композитов на его основе, существенно повысить их прочность в поздние сроки твердения.

Влияние разработанной добавки на процессы, происходящие в композициях при твердении, аналогично действию кристаллизационной затравки в цементных системах. Составляющее такой добавки способно в цементных вяжущих при затворении водой образовывать соединения в виде микро- или субмикрочастиц, которые служат центрами кристаллизации. В результате выкристаллизация гидратных новообразований из перенасыщенных растворов ускоряется, что, в итоге, и приводит к росту прочности цементного камня. Особенно явно это проявляется при тепловлажностной обработке композиций. На рисунке 2 представлены графики зависимости набора прочности цементных композитов от

времени их изотермического выдерживания с добавкой и без неё. Наполнение композиций кристаллизационной затравкой составляло 5% от массы цементного вяжущего. Температура тепловлажностной обработки составляла $+45^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5^{\circ}\text{C}$).

Исследования прочности наполненных добавкой композиций в поздние сроки твердения показали, что их прочность повышалась по сравнению с бездобавочными на 20÷50% в зависимости от количества введенной высокоэффективной добавки.

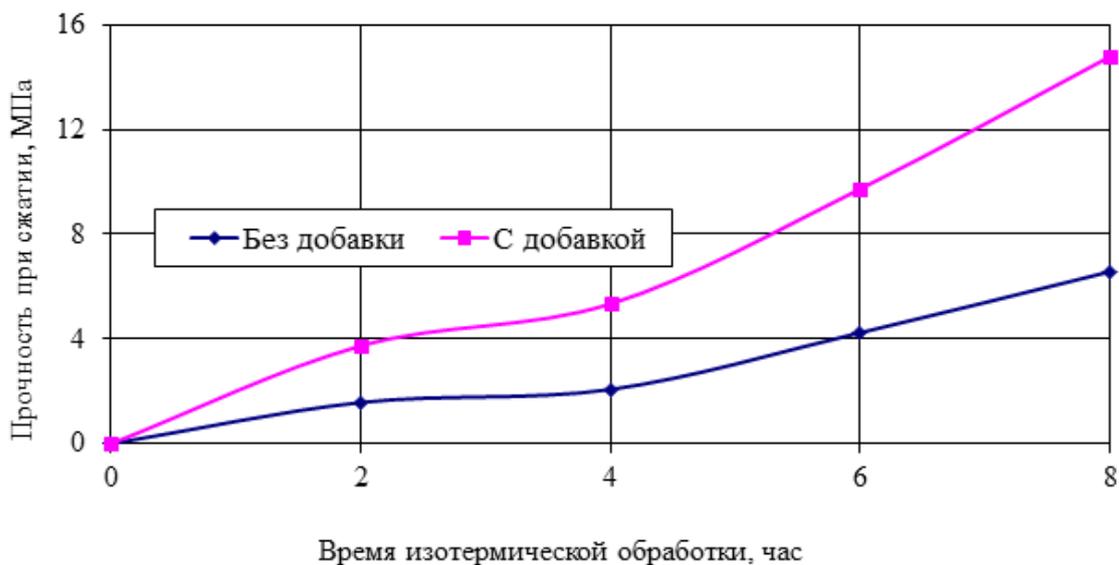


Рис. 2. Влияние продолжительности тепловлажностной обработки цементных композитов на рост их прочности.

По результатам проведенных научно-практических исследований можно сделать вывод о том, что использование цеолитосодержащих пород Мордовии и продуктов их модификации в производстве минеральных вяжущих открывает новые направления получения высокоэффективных многокомпонентных сырьевых смесей для производства конкурентоспособных и востребованных рынком цементных бетонов нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров Ю. А., Терешкин И. П. Применение цеолитосодержащих пород для изготовления растворов на минеральных вяжущих // Альманах современной науки и образования. – Тамбов: Грамота, 2013. – № 11. – С. 102–105.
2. Терешкин И. П. Разработка вяжущих низкой водопотребности для стендовых технологий: дисс. ... канд. тех. наук. – Саранск, 2001. – 244 с.
3. Соломатов В. И., Селяев В. П., Куприяшкина Л. И., Терешкин И. П. Применение цеолитосодержащих пород Мордовии в строительстве // Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы седьмых академических чтений РААСН. – Белгород: Белгородская ГАСМ, 2001. – С. 536–541.

БАЛЫКОВ А. С., НИЗИНА Т. А., САРАЙКИН А. С., ВОЛОДИН В. В., ПОТЕКАЕВ А.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОПОТРЕБНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ
ФИБРОБЕТОННОЙ СМЕСИ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ

Аннотация. Исследовано влияние водопотребности фибробетонных смесей на физико-механические характеристики модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов. Графическая интерпретация результатов осуществлялась по треугольным диаграммам Гиббса-Розебома, построенным с применением программы Statistica 10.0.1011. Проведен анализ оптимальных комплексов добавок и дисперсных волокон с целью повышения исследуемых характеристик цементных композитов.

Ключевые слова: дисперсно-армированный мелкозернистый бетон, модифицирующая добавка, дисперсное волокно, водопотребность, плотность в нормальных влажностных условиях, предел прочности на растяжение при изгибе, предел прочности при сжатии, треугольная диаграмма Гиббса-Розебома.

BALYKOV A. S., NIZINA T. A., SARAYKIN A. S., VOLODIN V. V., POTEKAEV A. V.
STUDY OF WATER DEMAND OF MODIFIED
FIBER-REINFORCED CONCRETE MIXTURE AND ITS EFFECT ON PHYSICAL AND
MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FINE-GRAINED CONCRETES

Abstract. The effect of water demand of fiber concrete mixtures on the physical and mechanical properties of modified disperse-reinforced fine-grained concretes is studied. A graphical interpretation of the study results was carried out on Gibbs-Roseboom triangular diagrams constructed with the use of Statistica 10.0.1011. The optimal additive complexes and dispersed fibers are analyzed in order to improve the cement composites characteristics.

Keywords: disperse-reinforced fine-grained concrete, polyfunctional modifying additive, dispersed fiber, water demand, density at normal humidity conditions, limit of tensile strength in bending, limit of compressive strength, Gibbs-Roseboom triangular diagram.

Мировой опыт свидетельствует, что перспективным направлением современного строительного материаловедения является дисперсное армирование композиционных материалов. На сегодняшний день достигнуты значительные успехи в области повышения активности цементных минеральных вяжущих веществ, что позволяет разрабатывать составы бетонов с пределом прочности на сжатие 100-150 МПа и выше [1; 2]. Однако прочность растворов и бетонов при растяжении остается во много раз ниже прочности на сжатие. В связи с этим, использование дисперсных волокон для армирования с целью повышения прочности

при растяжении цементных композитов может послужить толчком к получению бетонов нового типа, с более широкими возможностями их применения в строительстве [1–4].

Несмотря на значительное количество научных исследований, применение дисперсного армирования в строительных изделиях сдерживается рядом причин: отсутствует достаточная нормативная база по проектированию и оптимальным методам распределения волокон в матрице вяжущего, расчету сырьевых составов, технологиям производства строительных изделий с использованием дисперсных волокон [5].

Наряду с дисперсным армированием, широкие перспективы открывает и использование в составах бетонов и растворов тонкодисперсных кремнийсодержащих минеральных добавок, таких как микрокремнезем и метакаолин, позволяющих увеличивать плотность цементного камня за счет микронаполнения и связывания (пуццоланический эффект) гидратной извести (портландита); стабилизировать бетонные смеси с высоким водосодержанием; усиливать эффективность работы поверхностно-активных веществ, вводимых в состав материала; а также получать повышенные физико-механические и эксплуатационные свойства цементных композитов при пониженных расходах цемента [6–8]. Другими востребованными модификаторами являются добавки гидроизоляционного типа, в частности система материалов «Пенетрон», позволяющая значительно повысить стойкость бетона к воздействию агрессивных сред [9].

Исследование водопотребности модифицированных дисперсно-армированных бетонных смесей и ее влияния на основные физико-механические характеристики цементных композитов является важным и актуальным. Фиброармирование композиций на основе цемента приводит к ухудшению удобоукладываемости смесей, вызывая кластеризацию и комкование [10; 11], а тем самым снижает эксплуатационные характеристики цементных композитов. Вместе с этим, введение в рецептуру бетонных смесей активных минеральных добавок с высокой удельной поверхностью еще в большей степени приводит к необходимости решения вопроса их водоредуцирования. Применение высокоэффективных суперпластификаторов на поликарбоксилатной основе не в полной мере позволяет решить данную проблему, что требует проведения дополнительных исследований по поиску наиболее оптимальных комплексов добавок и дисперсных волокон для получения цементных композитов с повышенными эксплуатационными требованиями.

В качестве вяжущего был использован портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовцемент», мелкозернистого заполнителя – речной песок с размером зерна менее 5 мм, добываемый в поселке Смольный Ичалковского района Республики Мордовия. Для дисперсного армирования бетонов применялись волокна следующих видов: низко модульное полипропиленовое волокно (ППН), высоко модульное

полиакрилонитрильное волокно (ПАН), модифицированная астраленами базальтовая микрофибра под фирменным названием «Астрофлекс-МБМ» (МБМ). С целью полифункциональной модификации мелкозернистых бетонов использовались: микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ), высокоактивный метакаолин (ВМК), гидроизоляционная добавка в бетонную смесь «Пенетрон Адмикс» (Адмикс). Для достижения требуемых реологических свойств в состав бетонных смесей вводился суперпластификатор Melflux 1641 F (MF 1641 F).

В исследовании варьировалось две группы факторов – вид и содержание используемых добавок (v_1 (МКУ), v_2 (ВМК), v_3 (Адмикс)), а также вид и содержание применяемой фибры (w_1 (ППН), w_2 (ПАН); w_3 (МБМ)). Для исследуемой системы «состав – свойства» контролировалось выполнение следующих условий:

$$0 \leq v_i \leq 1; \sum v_i = 1; i=1, 2, 3; \quad 0 \leq w_i \leq 1; \sum w_i = 1; i=1, 2, 3. \quad (1)$$

Численные значения уровней варьирования исследуемых факторов представлены в таблице 1. Неизменными составляющими фибробетонной смеси оставались: доля речного песка – 65% от массы твердой фазы и содержание суперпластификатора Melflux 1641 F – 0,5% от массы вяжущего.

Таблица 1

Уровни варьирования исследуемых факторов экспериментального исследования

Факторы			Уровни варьирования			
			0	0,333	0,5	1
Вид добавки	v_1	МКУ, % от массы цемента	0	6,667	10	20
	v_2	ВМК, % от массы цемента	0	2	3	6
	v_3	Адмикс, % от массы цемента	0	0,5	0,75	1,5
Вид фибры	w_1	ППН, % от массы цемента	0	0,333	0,5	1
	w_2	ПАН, % от массы цемента	0	0,5	0,75	1,5
	w_3	МБМ, % от массы цемента	0	1,667	2,5	5

В ходе эксперимента были исследованы: водопотребность, предел прочности при сжатии (ГОСТ 310.4) и на растяжение при изгибе (ГОСТ 310.4), плотность в нормальных влажностных условиях (ГОСТ 12730.1-78) в возрасте 28 суток. Прочностные характеристики мелкозернистых бетонов определялись на установке WilleGeotechnik® (модель 13-PD/401) для испытания строительных материалов [12]. Настройка основных параметров и фиксирование полученных экспериментальных результатов осуществлялось с применением программного обеспечения GEOSYS 8.7.8.

Для обработки результатов экспериментальных исследований применялись методы математической статистики, а для их графической интерпретации - треугольные диаграммы Гиббса-Розебома в виде двумерных карт линий уровня (изолиний) (рис. 1), построенные с применением программы Statistica 10.0.1011.

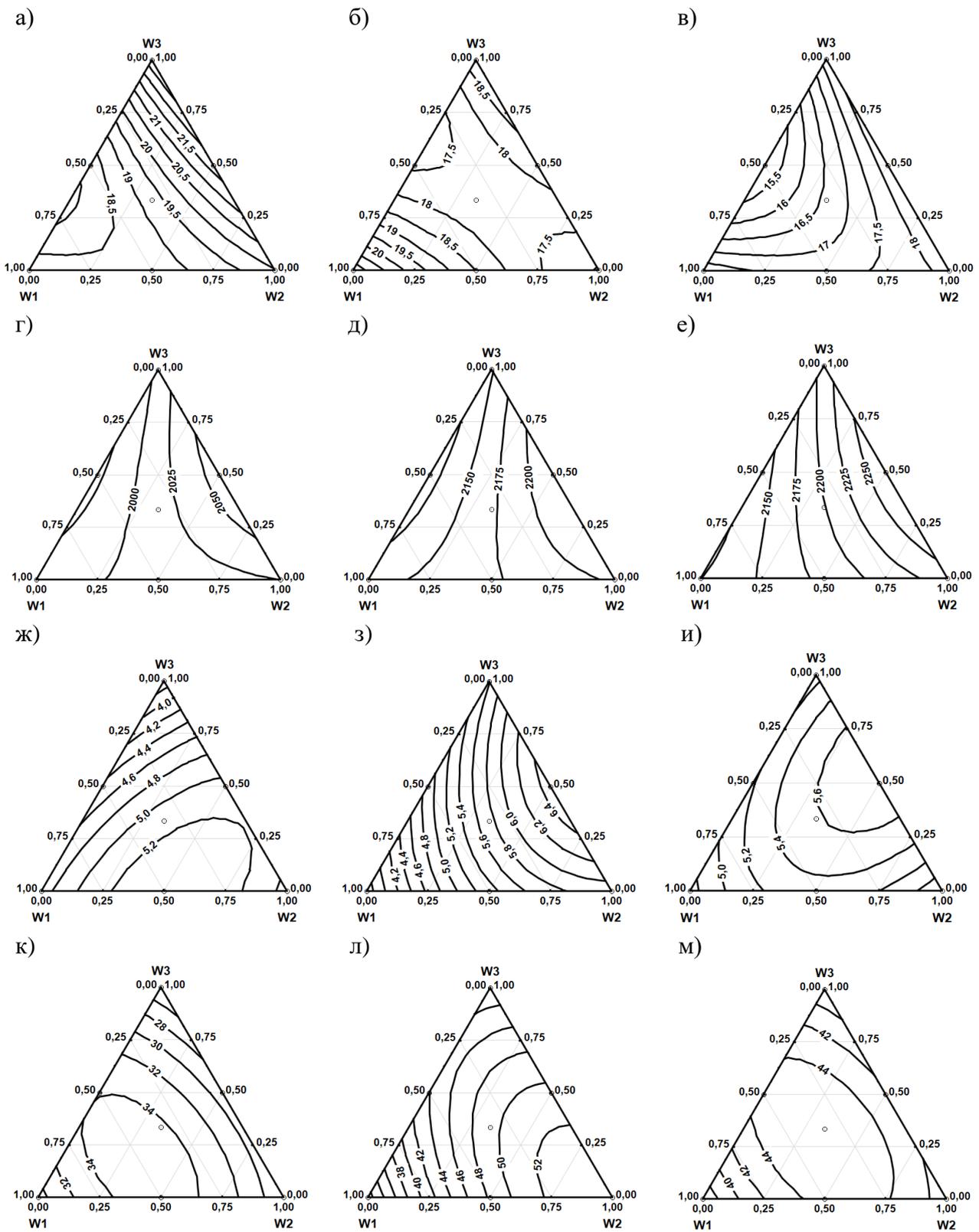


Рис. 1. Треугольные диаграммы Гиббса-Розебма изменения водопотребности (а, б, в) (% от массы сухих компонентов); плотности в нормальных влажностных условиях (г, д, е) ($\text{кг}/\text{м}^3$); предела прочности на растяжение при изгибе (ж, з, и) (МПа) и при сжатии (к, л, м) (МПа) дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов в зависимости от содержания добавок (v_1, v_2, v_3) и фибры (w_1, w_2, w_3) (см. таблицу 1): а), г), ж), к) $v_1 = 1, v_2 = 0, v_3 = 0$; б), д), з), л) $v_1 = 0, v_2 = 1, v_3 = 0$ в), е), и), м) $v_1 = 0, v_2 = 0, v_3 = 1$.

Проведенный графический анализ изолиний показал, что увеличение содержания в составах высокоактивного метаксаолина позволило получить цементные композиты с высокой плотностью (рис. 1, д). ВМК оказал наилучшее влияние и на исследуемые прочностные характеристики мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов. Наибольшие результаты были зафиксированы при максимальном количестве метаксаолина ($v_2 = 1$) и следующем содержании данных дисперсных волокон:

- для предела прочности на растяжение при изгибе – при равном соотношении полипропиленовой и полиакрилонитрильной фибр ($w_2 = w_3 = 0,5$) (рис. 1, з);

- для предела прочности при сжатии – при максимальном использовании ПАН-фибры ($w_2 = 1$) (рис. 1, л).

Напротив, повышение доли микрокремнезема приводит к снижению физико-механических характеристик фибробетонов. Наиболее низкая плотность зафиксирована у цементных композитов, модифицированных добавкой микрокремнезема ($v_1 = 1$) и дисперсно-армированных комплексом волокон «ППН+МБМ» при долях фибр близких к равным ($w_1 = w_3 = 0,5$) (рис. 1, г). Самые низкие показатели исследуемых упруго-прочностных характеристик имеют составы с МКУ и МБМ ($v_1 = 1, w_3 = 1$) (рис. 1, ж, к).

Высокие физико-механические показатели цементных композитов с метаксаолином, армированных полиакрилонитрильным волокном и/или модифицированной базальтовой микрофиброй, обусловлены, в том числе и их сниженной водопотребностью по сравнению с составами с микрокремнеземом (рис. 1, а, б). Наиболее высокая водопотребность при применении микрокремнезема и метаксаолина зафиксирована у бетонных смесей дисперсно-армированных модифицированной базальтовой микрофиброй и полипропиленовым волокном соответственно (рис. 1, а, б), а при использовании добавки Адмикс – у смесей с полиакрилонитрильной синтетической фиброй.

По результатам анализа линий равного влияния (рис. 1) можно сделать вывод о взаимозависимости исследуемых показателей модифицированных дисперсно-армированных бетонов. Наиболее высокие физико-механические характеристики были зафиксированы для составов с метаксаолином, армированных полиакрилонитрильным волокном; данные составы обладают и пониженной водопотребностью. Замена в смесях, армированных ПАН-фиброй и МБМ, ВМК на МКУ приводило к повышению водопотребности смесей, снижению плотности и прочности цементных композитов на их основе. Данные факты свидетельствует о негативном влиянии МКУ на процессы структурообразования модифицированных мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов по сравнению с другими видами применяемых добавок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
2. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. – М.: АСВ, 2004. – 560 с.
3. Низина Т. А., Балыков А. С., Сарайкин А. С. Экспериментальные исследования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов с полифункциональными модификаторами // УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. – 2015. – № 4. – С. 91–96.
4. Низина Т. А., Балыков А. С. Сравнительный анализ влияния вариантов дисперсного армирования и полифункционального модифицирования на изменение физико-механических характеристик мелкозернистых бетонов // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – Вып. 16. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2016 (в печати).
5. Сарайкина К. А., Голубев В. А., Семкова Е. Н. Щелочестойкость базальтового волокна и способы ее повышения // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура.– 2012. – № 1. – С. 185–192.
6. Низина Т. А., Балбалин А. В. Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 2. – С. 148–153.
7. Низина Т. А., Балбалин А. В. Механическая активация цементных смесей с полифункциональными добавками // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2. – С. 36–42.
8. Селяев В. П., Низина Т. А., Балбалин А. В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – Ч. 2, Вып. 31 (50). – 2013. – С. 156–163.
9. Технологический регламент на проектирование и выполнение работ по гидроизоляции и антикоррозионной защите монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: СРО «РСПППГ», 2008. – 64 с.
10. Kuder K., Ozyurt N., Mu E., Shah S. Rheology of fiber-reinforced cement systems using a custom built rheometer. – Brittle Matrix Composites 8 : Proc. 8th Int. Symp. BMC8. – Warsaw: Woodhead Publ. Ltd., ZTUREK, 2006. – P. 431–439.
11. Ponikiewski T. Investigation on random distribution of fibres in cement composites. – Brittle Matrix Composites 9 : Proc. 9th Int. Symp. BMC9. – Warsaw: Woodhead Publ. Ltd., IFTR, 2009. – P. 131–138.
12. Низина Т. А., Селяев В. П. Материальная база вуза как инновационный ресурс развития национального исследовательского университета // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций факторов: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 115–121.

**НИЗИН Д. Р., МОРОЗОВ М. А., ЧЕРНОВ А. Н., СИТНИКОВА О. Н., КАРПОВ Д. С.
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЯ ПО СЛОЯМ**

Аннотация. Изложены результаты моделирования стесненной седиментации частиц наполнителя в функционально-градиентных покрытиях различной толщины. В работе использован программный комплекс, позволяющий моделировать процесс стесненной седиментации полидисперсной суспензии в процессе твердения полимерных систем в зависимости от размера и плотности частиц наполнителя, степени наполнения и изменения вязкости связующего. Выявлено изменение толщины слоев с учетом степени наполнения, варьирования соотношения наполнителей и толщины формируемого покрытия. Показано, что процесс пофракционной сепарации наблюдается как в высоконаполненных, так и в малонаполненных композитах.

Ключевые слова: функционально-градиентные покрытия, программный комплекс, механика многоскоростных континуумов, моделирование, стесненная седиментация, наполнитель.

**NIZIN D. R., MOROZOV M. A., CHERNOV A. N., SITNIKOVA O. N., KARPOV D. S.
ANALYSIS OF INFLUENCE OF FUNCTIONALLY GRADED POLYMER COATINGS
THICKNESS ON THE DISTRIBUTION OF FILLER PARTICLES**

Abstract. The article presents the results of modeling of constrained sedimentation of the filler particles in the functionally graded coatings of varying thickness. We used software package that allows to simulate the process of constrained sedimentation of polydisperse suspension in the process of polymer systems curing depending on the size and density of the filler particles, the degree of filling and changing of binder viscosity. The authors have revealed changes in the thickness of layers according to the degree of filling, filler ratio varying and thickness of formed coating. It is shown that the process of fractional separation is observed both in highly and lightly filled composites.

Keywords: functionally graded coating, software package, mechanics of multirate continua, modeling, constrained sedimentation, filler.

Разработка современных эффективных систем защиты материалов от старения и коррозии невозможна без создания нетрадиционных покрытий, обладающих особым набором свойств. Опыт эксплуатации строительных конструкций с полимерными покрытиями показывает, что функциональная нагрузка на различные части защитных покрытий

неодинакова. Так, например, наружные слои покрытия должны защищать материал от агрессивных воздействий окружающих факторов, а внутренние слои обеспечивать высокую прочность композита и его хорошую адгезию к бетону. К такому классу материалов относятся функционально-градиентные композиты, изменение физико-механических характеристик которых по высоте поперечного сечения происходит по определенному закону [1–3].

В последние годы защитные покрытия на основе полимерных связующих претерпевают второе рождение [4; 5]. Значительно расширился ассортимент выпускаемых покрытий; к разрабатываемым составам предъявляются повышенные требования. При этом необходимо отметить, что разработка современных эффективных систем защиты материалов от старения и коррозии невозможна без создания нетрадиционных покрытий, обладающих особым набором свойств. Задача создания функционально-градиентных материалов (ФГМ), свойства которых меняются по объему или высоте поперечного сечения в соответствии с функциональными требованиями, несомненно, является перспективным направлением строительного материаловедения. Технология ФГМ позволяет получать материалы с заданными, различными по объему свойствами без перерасхода дорогостоящих материалов [1; 6]. Среди множества методов и способов создания функционально-градиентных материалов наиболее технологически простым и эффективным является получение ФГМ путем варьирования вязкости полимерного связующего, а также плотности и крупности наполнителей [2; 7; 8].

Известно, что неотвержденные полимерные системы представляют собой суспензии частиц наполнителя в связующем. Подобные системы принято описывать, используя теорию седиментации, основанную на формуле Стокса. Однако необходимо отметить, что это справедливо лишь для монодисперсных малонаполненных систем. При этом практически все наполненные композиции полидисперсны, что влияет на скорость осаждения частиц в зависимости от размера их фракции. Реальные скорости осаждения могут значительно отличаться от стоксовской скорости, особенно для высоконаполненных полидисперсных суспензий. Это связано с тем, что частицы, движущиеся с разными скоростями и на небольшом расстоянии друг от друга, могут взаимодействовать между собой. Поэтому при исследовании высоконаполненных полидисперсных полимерных систем целесообразно рассматривать процессы стесненной седиментации частиц наполнителя.

Исследование процессов стесненной седиментации является, несомненно, сложной задачей. Знание условий осаждения частиц наполнителей для высоконаполненных систем является необходимым для многих отраслей промышленности. Наиболее полно вопросы исследования стесненной седиментации полидисперсной суспензии на примере наполненного эпоксидного клея рассмотрены в работе [9]. Однако в данном случае исследовалось осаждение

частиц наполнителей в процессе хранения, т.е. в неотвержденной системе с постоянными вязкостью и температурой. В ходе отверждения наполненных полимерных систем процессы стесненной седиментации еще более усложняются [2; 7; 8].

Наиболее мощным инструментом анализа процесса седиментации в полидисперсной суспензии является механика многоскоростных континуумов. Многоскоростной континуум представляет собой совокупность n континуумов, каждый из которых относится к своей составляющей смеси и заполняет один и тот же объем, занятый смесью [10]. Для каждого из этих составляющих континуумов в каждой точке определяются плотность ρ_i , скорость v_i , и другие параметры, относящиеся к своему континууму и своей составляющей смеси.

При рассмотрении процесса седиментации полидисперсной системы, содержащей неброуновские частицы, необходимо учитывать следующие допущения:

- частицы каждой фракции движутся с установившейся в данном слое скоростью (силы инерции равны нулю);
- в начальный момент времени частицы всех фракций равномерно распределены по высоте;
- прямыми столкновениями частиц пренебрегают, и учитывают лишь межфазное взаимодействие частиц всех фракций со сплошной средой.

При определенном диапазоне частиц наполнителя происходит так называемая пофракционная сепарация, когда каждый слой осадка состоит практически только из частиц одной фракции, что обуславливает неравномерное распределение свойств по высоте поперечного сечения [9]. Крупные частицы, осаждаясь с очень большой скоростью, интенсивно вытесняют жидкость вверх, которая увлекает за собой мелкие частицы и приводит к их всплыванию [10–12].

Как известно, в процессе отверждения вязкость системы повышается, что оказывает существенное влияние на седиментацию наполненных полимерных структур. Кинетику нарастания динамической вязкости в процессе отверждения предлагается задавать с помощью уравнения, коэффициенты которого могут быть определены по результатам экспериментальных исследований:

$$\eta = \eta_0 + v_1 \cdot T + A \cdot \exp\left(\frac{T-T_k}{T_3}\right), \quad (1)$$

где η_0 – начальная динамическая вязкость; v_1 – скорость на первоначальном этапе отверждения; T – текущее время отверждения; A , T_k , T_3 – параметры уравнения, характеризующие скорость набора вязкости на втором этапе отверждения.

Для наглядной реализации моделирования стесненной седиментации частиц наполнителей в процессе отверждения полимерной системы был использован программный продукт, интерфейс которого приведен на рис. 1. Перечень основных функций, реализуемых

в программном комплексе, получаемые результаты и их анализ изложен в работах [11–13]. Сопоставление результатов, полученных с помощью расчетных методов и разработанного программного продукта, показало их высокую сходимость.

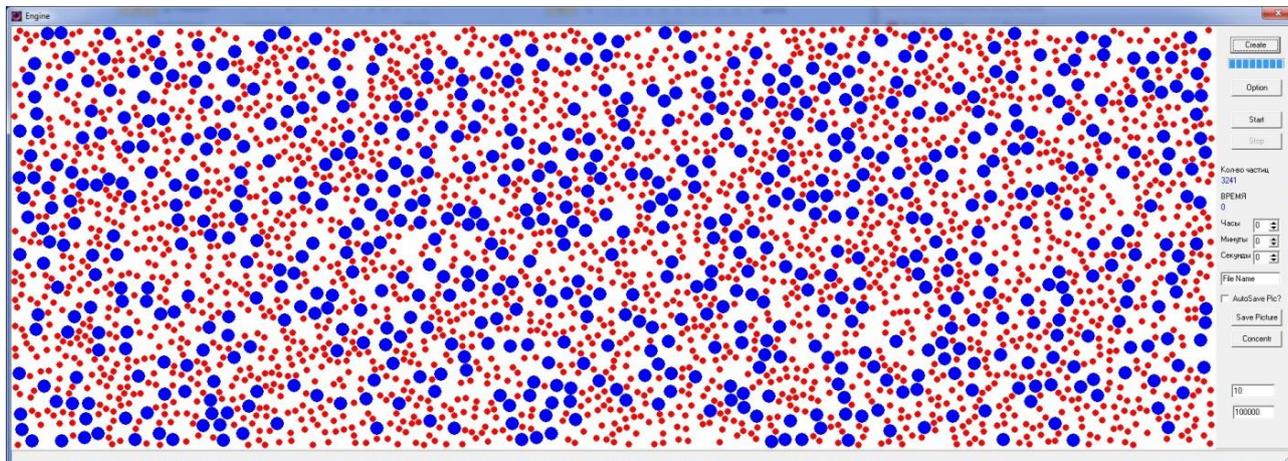


Рис. 1. Интерфейс программного комплекса для моделирования стесненной седиментации частиц наполнителя в процессе отверждения полимерной системы.

Используемый программный комплекс позволяет оценить влияние процессов стесненной седиментации в зависимости от радиуса частиц наполнителя, степени наполнения каждой из фракций и изменения вязкости связующего в процессе отверждения. В качестве модельных были выбраны наполнители с радиусом частиц $r_1 = 0.1$ мм и $r_2 = 0.05$ мм; параметры уравнения (1), используемые при моделировании: $\eta_0 = 0,4$; $v_1 = 0,5$; $A = 3$; $T_k = 0,8$; $T_3 = 0,3$. Динамика распределения частиц наполнителя в процессе седиментации с учетом времени представлена на рисунке 2.

Проведенный анализ результатов моделирования показал, что при увеличении доли мелкого наполнителя ($r_2 = 0.05$ мм) с 10 до 40% при фиксированном (10%) содержании крупного наполнителя ($r_1 = 0.1$ мм) наблюдается (рис. 3, а – в) увеличение толщины переходного слоя. Толщина слоя осадка, содержащего как крупные, так и мелкие частицы наполнителя, для этих составов практически не меняется. Повышение в составе наполнителей крупных частиц ($r_1 = 0.1$ мм) с 10 до 30% при постоянном содержании мелких частиц ($r_2 = 0.05$ мм; $V_2 = 10\%$) приводит к значительному увеличению максимально-наполненного слоя осадка (рис. 3, а, г) с последующим снижением его толщины в интервале от 30 до 50% (рис. 3, г – е). Толщина слоя, содержащего частицы наполнителя во взвешенном состоянии, для этих же соотношений наполнителей существенно возрастает. Изменение соотношения крупного и мелкого наполнителей, особенно для высоконаполненных систем (например, при $V_1 + V_2 = 50\%$), позволяет значительно варьировать распределение частиц наполнителей, а, следовательно, и свойств по высоте поперечного сечения (рис. 3, д, ж – и). Проведенное

моделирование показало, что процесс пофракционной сепарации наблюдается как в высоконаполненных, так и в малонаполненных композитах.

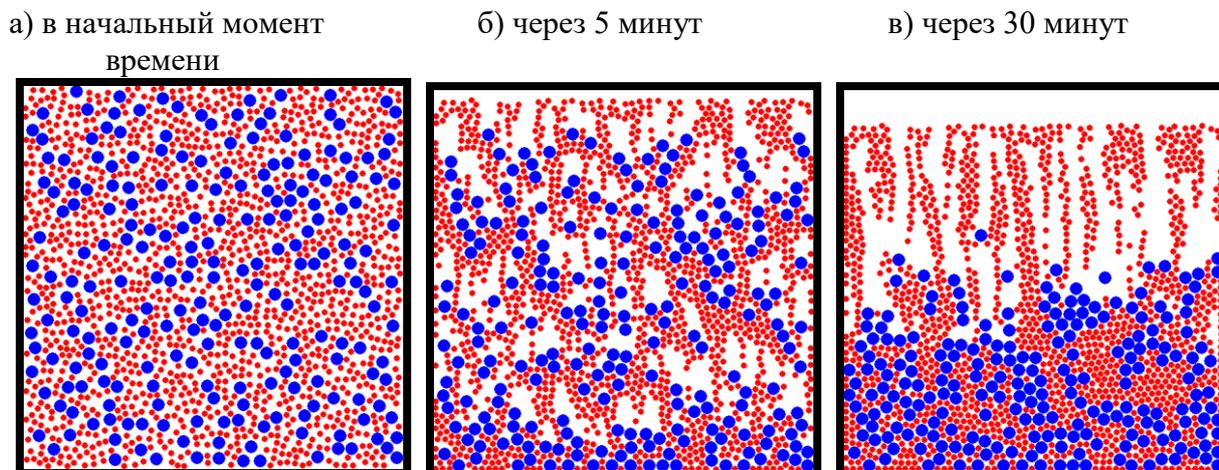


Рис. 2. Результаты моделирования распределения частиц наполнителей по высоте поперечного сечения полимерного композита в процессе отверждения ($r_1 = 0.1$ мм, $r_2 = 0.05$ мм; $V_1 = 20\%$ и $V_3 = 30\%$).

Моделирование процесса стесненной седиментации было также проведено на основе реальных экспериментальных данных. В качестве полимерного связующего использовалась композиция на основе эпоксидной смолы ЭД-20, отвержденной полиэтиленполиамином; в качестве наполнителя – комплексный наполнитель, содержащий (по массе) 70% мела и 30% маршалита. Объемная доля наполнителя составляла 75% от общего объема композита; толщина покрытий варьировалась от 1 до 4 мм. Используемые для моделирования размеры частиц наполнителей (соответственно, 0,04 и 0,14 мм для мела и маршалита) были выбраны на основе анализа кривых плотности распределения эквивалентных радиусов, определенных с помощью программного комплекса «Анализатор распределения частиц наполнителя по размерам» [14]. Для описания процесса нарастания динамической вязкости эпоксидного связующего в процессе твердения использовались следующие значения параметров уравнения (1): $\eta_0 = 13,72$; $v_1 = 0,001$; $A = 4,285$; $T_k = 0,79$; $T_3 = 1,095$, определенные по экспериментальным кривым. Результаты проведенного моделирования приведены на рис. 4.

На основе проведенного анализа полученных результатов моделирования выявлено, что высота слоя 1 практически не зависит от толщины покрытия (рис. 5). Наибольшее увеличение в зависимости от толщины покрытия наблюдается для формируемого в процессе седиментации слоя 2 (как в абсолютных, так и в относительных величинах), содержащего как крупные, так и мелкие частицы наполнителя. Абсолютная толщина слоя осадка (слой 3) и монодисперсного слоя 4, содержащего только частицы мелкого наполнителя, повышаются с увеличением толщины полимерного покрытия (рис. 5, а).

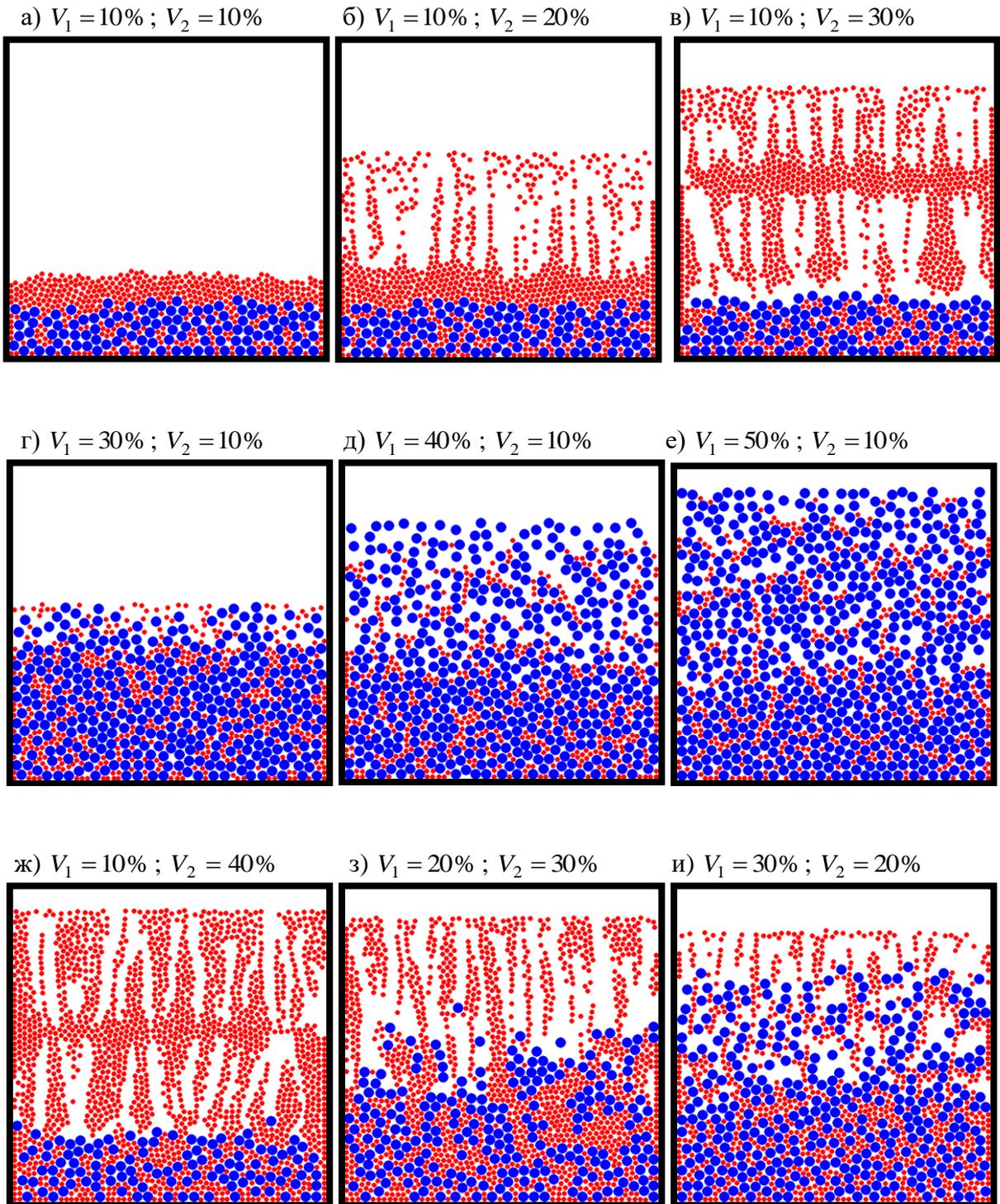
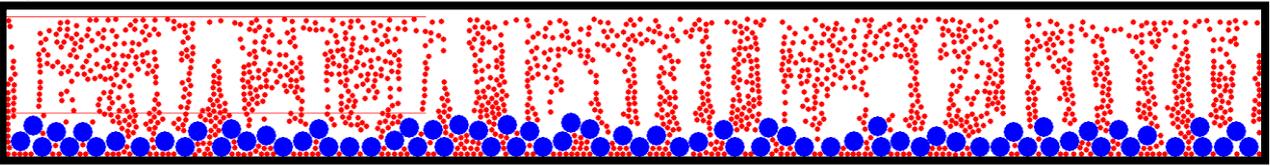
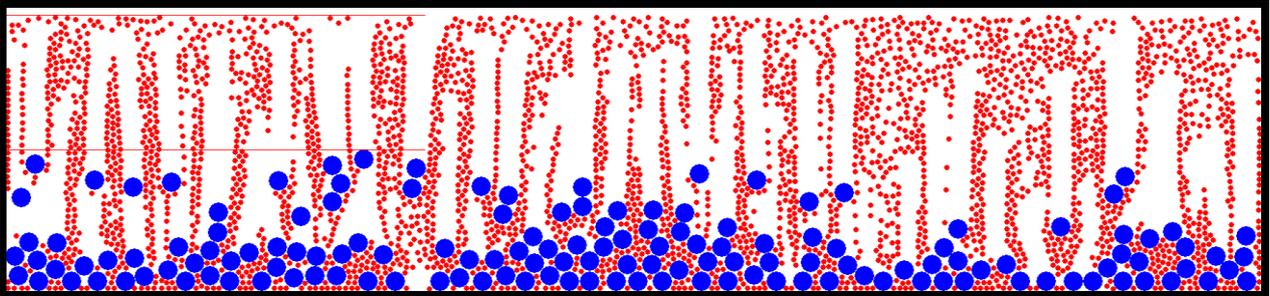


Рис. 3. Результаты моделирования распределения частиц наполнителей по высоте поперечного сечения отвержденных полимерных композитов (размеры частиц наполнителя – $r_1 = 0.1$ мм, $r_2 = 0.05$ мм).

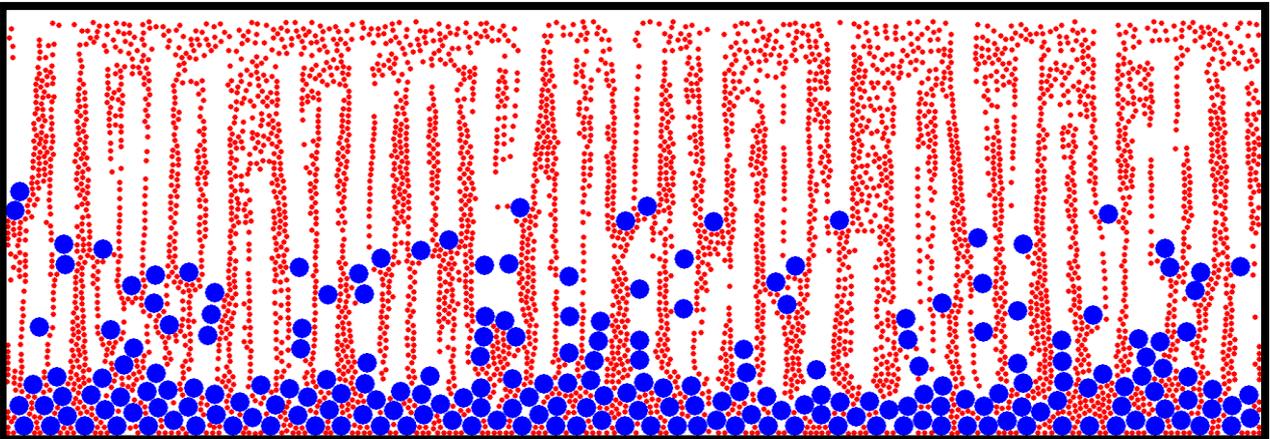
а)



б)



в)



г)

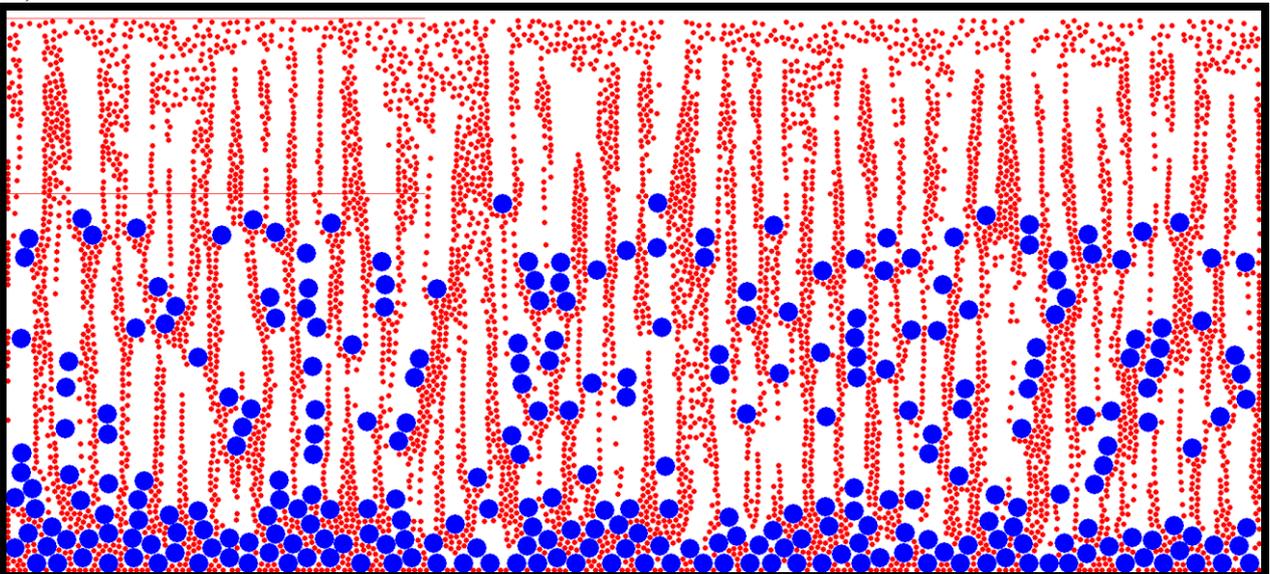


Рис. 4. Результаты моделирования распределения частиц наполнителей по высоте поперечного сечения эпоксидного композита (степень наполнения 75%; вид наполнителя – 70% мела + 30% маршалита) через 1 час отверждения в зависимости от толщины покрытия: а – 1 мм; б – 2 мм; в – 3 мм; д – 4 мм.

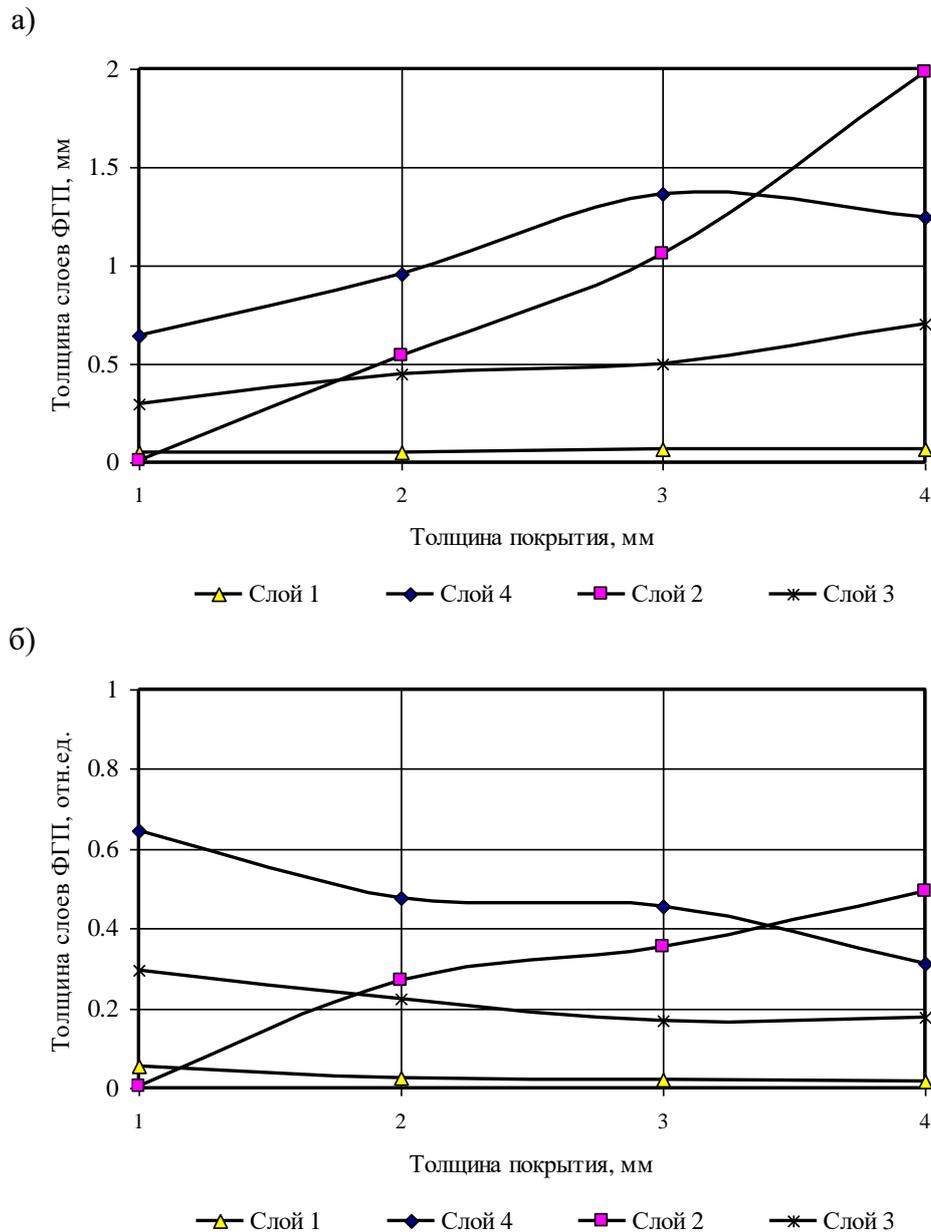


Рис. 5. Изменение высоты слоев в эпоксидных композитах в зависимости от толщины покрытия в абсолютных (а) и относительных (б) величинах: слой 1 – ненаполненное связующее; слой 2 – слой со взвешенным расположением наполнителя обоих видов; слой 3 – слой осадка; слой 4 – монодисперсный слой, содержащий только мелкий наполнитель.

Используемый программный продукт позволяет оценить распределение частиц наполнителя в процессе стесненной седиментации с учетом реальных параметров изменения динамической вязкости связующего в процессе отверждения, распределения частиц наполнителей по размерам, а также толщины наносимого покрытия. Предложенный подход позволяет подобрать оптимальные составы функционально-градиентных композитов с учетом необходимого распределения частиц, а, следовательно, и свойств по высоте поперечного сечения без проведения натурального эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В. П., Карташов В. А., Клементьев В. А., Лазарев А. Л. Функционально-градиентные композиционные строительные материалы и конструкции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 160 с.
2. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 258 с.
3. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Функционально-градиентный материал для защитных покрытий // Известия ТулГУ. Серия: Строительные материалы, конструкции и сооружения. – Вып. 7. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – С. 222–227.
4. Селяев В. П., Баженов Ю. М., Соколова Ю. А., Цыганов В. В., Низина Т. А. Полимерные покрытия для бетонных и железобетонных конструкций. – Саранск: Изд-во СВМО, 2010. – 224 с.
5. Селяев В. П., Иващенко Ю. Г., Низина Т. А. Полимербетоны: монография. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – 284 с.
6. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Моделирование распределения свойств полимерных композитов по сечению // Известия ТулГУ. Серия: Строительные материалы, конструкции и сооружения. – Вып. 8. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. – С. 141–145.
7. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А. Теоретические основы создания функционально-градиентных материалов на основе полимерных связующих // Региональная архитектура и строительство. – 2007. – № 2. – С. 20–25.
8. Селяев В. П., Низина Т. А., Лазарев А. Л., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Функционально-градиентные покрытия на основе полимерных связующих // Известия ВУЗов. Строительство. – 2007. – № 7. – С. 36–40.
9. Абиев Р. Ш. Исследование стесненной седиментации полидисперсной суспензии и влияния дисперсного состава наполнителя на качество наполненного эпоксидного клея // Пластические массы. – 2002. – № 4. – С. 31–36.
10. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч.1. – М.: Наука, 1987. – 134 с.
11. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Зимин А. Н., Низин Д. Р. Моделирование процесса стесненной седиментации частиц наполнителя в твердеющей полимерной системе // Вестник отделения строительных наук. – Вып. 16. Т. 2. – Москва, 2012. – С. 126–134.
12. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Зимин А. Н., Низин Д. Р. Программный комплекс для моделирования стесненной седиментации частиц наполнителей в процессе отверждения полимерных систем // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2012. – № 8. – С. 34–37.
13. Селяев В. П., Низина Т. А., Низин Д. Р., Зимин А. Н. Анализ процесса стесненной

седиментации частиц наполнителя в твердеющей полимерной системе // Сборник научных трудов по материалам II Всероссийской научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона». – Саратов, 2012. – С. 9–12.

14. Селяев В. П., Низина Т. А., Минеев В. А. Анализатор распределения частиц наполнителя по размерам // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007611001 от 6.03.2007 г. в Роспатенте по заявке №2007610002 от 11.01.2007 г.

ЩЕРЕДИН А. С., БАЛЫКОВ А. С.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ИДЕНТИФИКАЦИЯ
И АНАЛИЗ ПОРИСТОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»
ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ
ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ**

Аннотация. Изложены основные методы фрактального анализа строительных материалов. Предложено использование метода островов среза для оценки поровой структуры мелкозернистых бетонов. Показано, что использование программного комплекса «Идентификация и анализ пористости строительных материалов» позволяет автоматизировать количественное определение фрактальной размерности поровой структуры, существенно снижая временные затраты на его получение.

Ключевые слова: фрактальная размерность, поровая структура, мелкозернистые бетоны, метод островов среза, программный комплекс.

SCHEREDIN A. S., BALYKOV A. S.

**QUANTITATIVE ASSESSMENT OF FRACTAL DIMENSION OF PORE STRUCTURE
OF FINE-GRAINED CONCRETES WITH SOFTWARE "IDENTIFICATION AND
ANALYSIS OF POROSITY OF CONSTRUCTION MATERIALS"**

Abstract. Basic methods of fractal analysis of construction materials are considered. It is suggested to use the method of isles cut to assess the pore structure of fine-grained concretes. It is demonstrated that the use of software "Identification and analysis of porosity of construction materials" automates quantitative measuring of the fractal dimension of the pore structure and significantly reduces the time required to receive it.

Keywords: fractal dimension, pore structure, fine-grained concretes, method of isles cut, software.

Пористые материалы представляют собой своеобразный класс неупорядоченных сред, особенности которых затрудняют применение традиционных методов описания их структуры. Для исследования таких материалов оказалось эффективным привлечение аппарата фрактальной геометрии, позволяющего адекватно описать параметры строения и связать их с физико-механическими характеристиками [1–4].

До недавнего времени структуру пористых материалов связывали, в основном, с плотностью и размером пор. Однако устойчивых закономерностей связи структуры со свойствами установить не удалось [5]. Согласно концепции фракталов, в качестве параметра

структуры пористого материала следует принять фрактальную размерность, определяемую распределением пор по размерам.

В последнее время идеи фрактальной геометрии находят все большее применение при количественной оценке параметров реальных объектов [2–10]. К настоящему времени известно множество экспериментальных методов определения фрактальной размерности, в том числе метод покрытия квадратами, метод Херста (метод нормированного размаха), метод вертикальных сечений, метод островов среза, Фурье-анализ профилей и т. д. [3; 4; 6]. Методы фрактального исчисления находят свое применение для анализа кривых деформирования мелкозернистых бетонов [11; 12], позволяя количественно определять положение параметрических точек, что является важной информативной характеристикой при изучении процессов разрушения композиционных материалов различной природы.

Классическим для определения фрактальной размерности является пример, где в качестве фрактальной системы рассматривают непрерывную линию, являющуюся берегом реки, озера или моря [6]. Данный метод заключается в измерении длины линии различными по размерам звеньев ломаными. По мере уменьшения звеньев длина ломаной, которая аппроксимирует рассматриваемую линию, будет возрастать. Измеренная длина описывается приближенной формулой

$$L(\delta) = a \cdot \delta^{1-D}, \quad (1)$$

где δ – размер звена ломаной линии; a – постоянный коэффициент; D – фрактальная размерность.

Достаточно широкое развитие при определении фрактальной размерности получил метод покрытия квадратами. В общем случае при использовании данного метода требуется покрыть фрактальное множество d -мерными блоками с длиной ребра δ , произвести подсчет их числа $N(\delta)$, построить график в двойных логарифмических координатах $\log(N(\delta)) - \log(\delta)$ и определить по углу наклона величину фрактальной размерности:

$$D = -\Delta \log(N(\delta)) / \Delta \log(\delta). \quad (2)$$

Общая идея метода островов среза основывается на изучении соотношения площади и периметра островов, образующихся при пересечении исследуемой поверхности горизонтальными плоскостями. Известно [6], что для каждого семейства плоских евклидовых фигур одинаковой формы отношение периметра к квадратному корню из охватываемой площади $\rho = P/\sqrt{A}$ не зависит от размера фигуры. Так, для окружностей, квадратов и равносторонних треугольников указанное отношение соответственно равно $2 \cdot \sqrt{\pi}$, 4 и

$6/\sqrt[4]{3}$. Для фрактальных фигур данное выражение имеет вид

$$\rho_D = \frac{P(\delta)^{1/D'}}{A(\delta)^{1/2}}, \quad (3)$$

где D' – фрактальная размерность очертаний островов среза; δ – длина используемого для подсчета площади и периметра эталона.

При использовании метода островов среза соотношение периметра и площади описывается уравнением [6]

$$P(\delta) = C \cdot \delta^{(1-D')} \cdot A(\delta)^{D'/2}, \quad (4)$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Это соотношение выполняется для любого эталона длины δ , достаточного, чтобы удовлетворительно обмерять самый малый из островов.

Необходимо также отметить, что свойство точного самоподобия характерно лишь для регулярных фракталов. В случае исследования случайных фракталов, что характерно для реальных структур, увеличенная часть фрактала не точно идентична исходному фрагменту, однако их статистические характеристики совпадают.

Опыт применения методов фрактального исчисления показал [3; 4; 6], что разработка алгоритмов и путей их программной реализации очень важна для получения корректных результатов при минимальных временных затратах. Установлено [3; 4], что для оценки поровой структуры цементных композитов наиболее приемлемым является метод островов среза. Предлагается для реализации данного метода использовать программный комплекс (ПК) «Идентификация и анализ пористости строительных материалов [13]», позволяющий определять суммарную площадь пор исследуемого композита, а также распределение пор по размерам. При использовании данной методики с помощью ПК подсчитывается число пикселей, занятых каждой порой. Размер ячейки (пикселя), отождествляемый с размером клетки при использовании метода покрытия квадратами, определяется по формуле

$$\delta(K_{dpi}) = 2.54 \cdot 10^4 / K_{dpi}, \quad (5)$$

где K_{dpi} – величина разрешения при сканировании;

Величину фрактальной размерности определяют по углу наклона графика изменения площадей пор от их периметров (рис. 1), построенного в двойных логарифмических координатах $\log(A(\delta)) - \log(P(\delta))$. Для определения периметра пор была разработана дополнительная надстройка к указанному выше ПК.

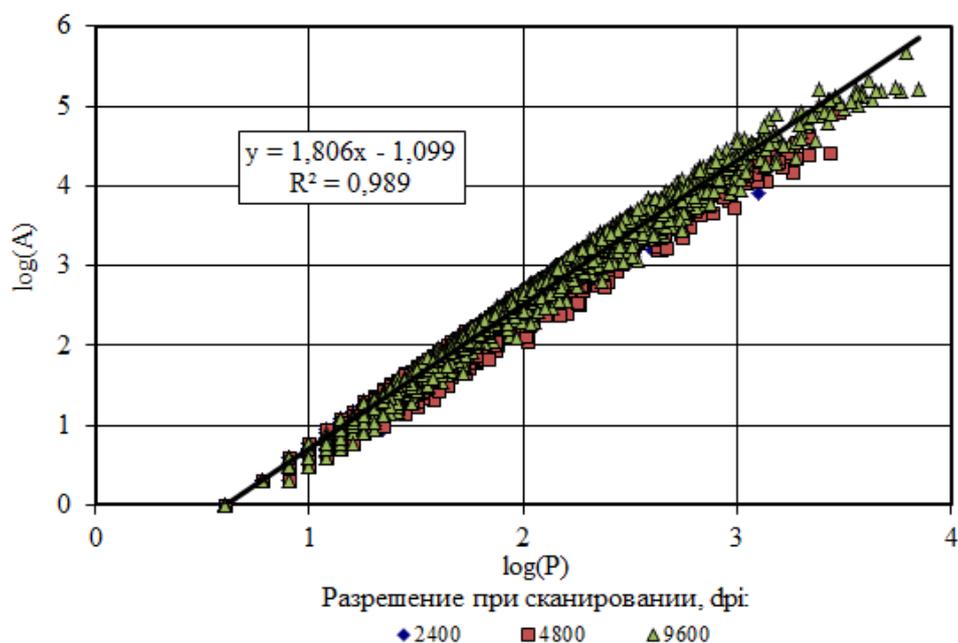


Рис. 1. Связь между периметром и площадью пор состава дисперсно-наполненного мелкозернистого бетона.

Из анализа полученных данных видно (рис. 1), что связь между периметром и площадью пор, полученных при сканировании исследуемых поверхностей с различным разрешением (2400, 4800 и 9600 dpi) описывается линейной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.989$. Полученные результаты подтверждают перспективность использования предлагаемого подхода для определения фрактальной размерности поровой структуры, в том числе дисперсно-наполненных мелкозернистых бетонов [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявский С. В. Применение методов фрактального анализа для исследования структуры пористых металлических материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2001. – 223 с.
2. Фролкин О. А. Компьютерное моделирование и анализ структуры композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Саранск, 2000. – 223 с.
3. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 258 с.
4. Низина Т. А. Экспериментально-теоретические основы прогнозирования и повышения долговечности защитно-декоративных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук. – Саранск, 2007. – 408 с.
5. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.

6. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

7. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Определение фрактальной размерности как структурного параметра при анализе полимерных композитов // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения: Десятые Академические чтения РААСН. – Казань: Изд-во КГАСУ, 2006. – С. 73–76.

8. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Фрактальный анализ структуры наполненных эпоксидных композитов // Известия ТулГУ. Серия: Строительные материалы, конструкции и сооружения. – 2006. – Вып. 10. – С. 123–128.

9. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А. Фрактальный анализ структуры наполненных полимерных композитов // Известия ВУЗов. Строительство. – 2007. – № 4. – С. 43–48.

10. Селяев В. П., Баженов Ю. М., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Фрактальные методы анализа структуры композиционных строительных материалов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 158–175.

11. Низина Т. А., Балбалин А. В., Балыков А. С. Фрактальный анализ кривых деформирования композиционных строительных материалов при сжатии // Огарёв-online. Раздел «Технические науки». 2015. – Выпуск 13. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/fraktalnyj-analiz-krivyx-deformirovaniya-kompozicionnyx-stroitelnyx-materialov-pri-szhatii>.

12. 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.

13. В. П. Селяев, Т. А. Низина, О. А. Фролкин, В. В. Цыганов, Ю. А. Ланкина 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.

14. Низина Т. А., Щередин А. С., Балыков А. С. Фрактальный анализ поровой структуры дисперсно-наполненных мелкозернистых бетонов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2016. – № 1(16). – Режим доступа: trts.esrae.ru/28-153.

АРТАМОНОВ Д. А., КОРОВКИН Д. И., АНДРОНЫЧЕВ Д. О., МОЛОКОВ М. В.

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПОНИРОВАНИЯ
НА КЛИМАТИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ**

Аннотация. Приведены результаты натуральных испытаний составов мелкозернистых бетонов. Определено действие климатических факторов на изменение температуры поверхности образцов. Изучено влияние длительности экспонирования в натуральных условиях на изменение упруго-прочностных характеристик мелкозернистых бетонов.

Ключевые слова: климатические факторы, мелкозернистый бетон, температура, длительность экспонирования, предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе.

ARTAMONOV D. A, KOROVKIN D. I., ANDRONYCHEV D. O., MOLOKOV M. V.

**ANALYSIS OF EFFECTS OF EXPOSURE DURATION
ON CLIMATIC RESISTANCE OF FINE-GRAINED CONCRETES**

Abstract. The results of fine-grained concretes composition testing are presented. The effects of climatic factors on the change in temperature of the sample surfaces are defined. The effects of exposure duration in testing conditions on the change in the elastic-strength properties of fine-grained concretes are studied.

Keywords: climatic factors, fine-grained concrete, temperature, exposure duration, compressive strength and flexural strength.

Оценка долговечности изделий и конструкций из бетона и железобетона, которые подвержены воздействию климатических факторов, крайне затруднена из-за многообразия взаимодействующих с материалами в естественных условиях агрессивных факторов. Расчет сроков службы изделий и конструкций в настоящее время проводится на основании степени агрессивности внешней среды согласно принятым нормативным документам. Существующие методы защиты от агрессивного воздействия внешних сред нормируются СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии».

Для определения изменения свойств строительных композитов в условиях действия агрессивных факторов, как правило, проводят экспонирование образцов в лабораторных условиях путем создания модельных сред и т.д. В реальных климатических условиях на строительные изделия и конструкции оказывается непрерывное воздействие множества агрессивных факторов (перепада температур, солнечного света, проникающей радиации, влаги, кислорода) и их комбинаций [1–10]. Именно поэтому проведение исследований изменения свойств строительных материалов, изделий и конструкций в условиях действия натуральных климатических факторов имеет особое значение.

Для установления изменений, происходящих в структуре мелкозернистого бетона в процессе натурального экспонирования, были изготовлены образцы-балочки размером 40×40×160 мм. План экспериментального исследования и уровни варьируемых факторов приведены, соответственно, в таблицах 1 – 2. При проведении экспериментальных исследований использовались следующие материалы: портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовцемент»; высокоактивный метаксаолин – ВМК; речной песок (Республика Мордовия, Ичалковский район, посёлок Смольный); поликарбоксилатный пластификатор Melflux 1641 F [1; 2]. Для ряда составов (4–9) проводилась механоактивация смесей в шаровой барабанной мельнице (скорость вращения составляла 73 об/мин.) по режиму: цемент + MF 1641 + ВМК (15 мин.); + песок (15 мин.).

Таблица 1

План экспериментального исследования составов мелкозернистого бетона, экспонируемых в условиях натуральных климатических воздействий

Номер состава	Варьируемые факторы			
	ВМК (X_1)	песок (X_2)	Melflux 1641 F (X_3)	режим помола (X_4)
1	-1	0	-1	-1
2	-1	+1	-1	-1
3	-1	-1	-1	-1
4	0	0	0	+1
5	0	+1	0	+1
6	0	-1	0	+1
7	+1	0	+1	+1
8	+1	+1	+1	+1
9	+1	-1	+1	+1

Таблица 2

Уровни варьирования переменных факторов

Факторы		Уровни варьирования		
		-1	0	+1
X_1	высокоактивный метаксаолин (ВМК), % от массы цемента	0	5	10
X_2	песок, % от массы твердой фазы	55	65	75
X_3	суперпластификатор Melflux 1641 F, % от массы вяжущего	0	0,4	0,8
X_4	режим помола	без помола	-	с помолом

Для экспонирования образцов в климатических условиях были изготовлены испытательные стенды, размещенные на базе эколого-метеорологической лаборатории Национального Исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва [11]. Фиксирование метеорологических (температура, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, осадки) и

экологических (концентрации загрязняющих веществ) параметров осуществлялось с помощью автоматической станции контроля загрязнения атмосферного воздуха с актинометрическим комплексом в состав с частотой 20 минут в круглосуточном режиме.

Для контроля температуры и влажности поверхности исследуемых образцов использовалась система мониторинга на основе датчиков DS 1923-F5, состоящая из: комплекса iButton Data Logger Revisor (модель iBDLR-U), адаптера 1w-2/3-iButton_1923, считывателя данных с регистраторов iB-Flash и портативного транспортера данных iButton Data Logger Transporter (iBDLT).

В работах [12; 13] показано, что в процессе натурального экспонирования бетонных образцов происходит разогрев поверхности, зависящий от температуры окружающего воздуха и интенсивности солнечного излучения. Для месяцев с низкой среднесуточной температурой (менее 5 °С) разность между температурами воздуха и поверхности образца минимальна. По мере повышения температуры воздуха разброс показателей возрастает (рис. 1); в летние месяцы данный параметр может достигать 20÷30 °С; наибольший разогрев поверхности образцов, как правило, происходит с 10:00 до 16:00, т.е. в момент наибольшего воздействия солнечной радиации (рис. 2).

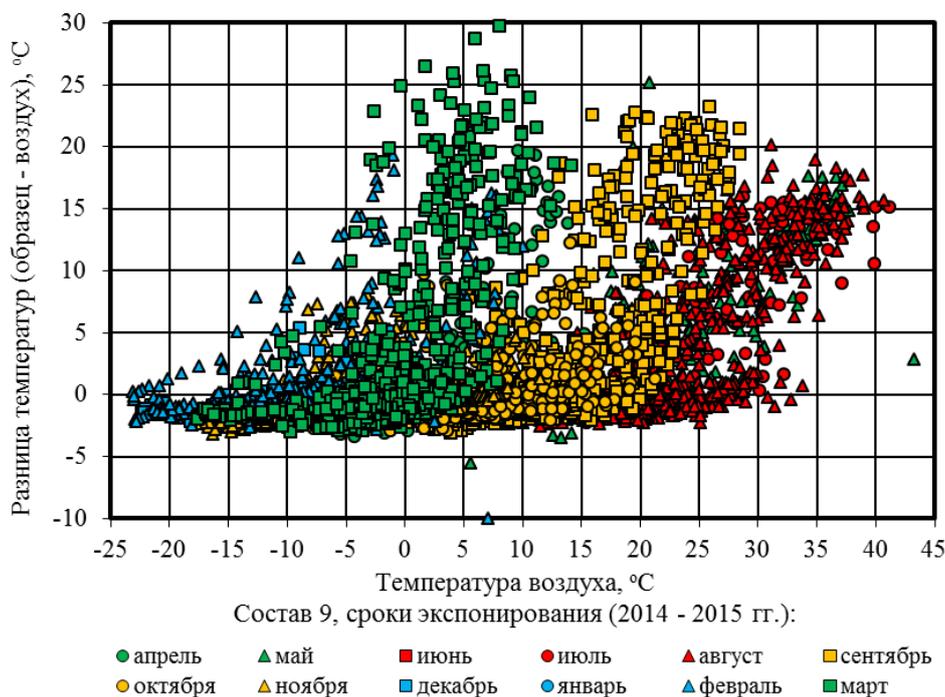


Рис. 1. Изменение прироста температур поверхности образца в зависимости от температуры окружающего воздуха.

Для контрольных составов, а также через 60 и 210 суток экспонирования бетонных образцов на натурной площадке фиксировались следующие упруго-прочностные показатели: плотность, предел прочности при сжатии и растяжение при изгибе, модуль упругости и максимальная деформативность при сжатии. Экспериментально установлено, что в процессе

экспонирования в течение 210 суток наблюдалось, в целом, повышение предела прочности при сжатии (рис. 3), связанное, прежде всего, с продолжением процессов гидратации. Наибольший прирост характеристики, достигающий, соответственно, 73 и 100% к 210 суткам, наблюдается для составов 2 и 8 с максимальным содержанием песка (75% от твердой фазы смеси). Для контрольных образцов этих же составов зафиксированы наименьшие прочностные показатели при сжатии – 30 и 22 МПа.

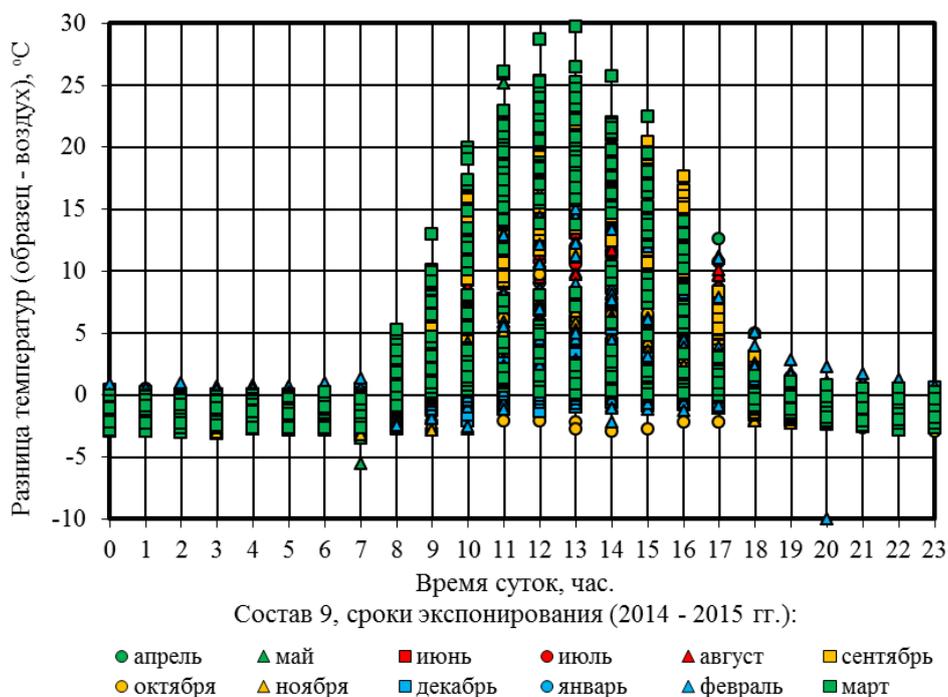


Рис. 2. Изменение прироста температур поверхности образца в зависимости от времени суток.

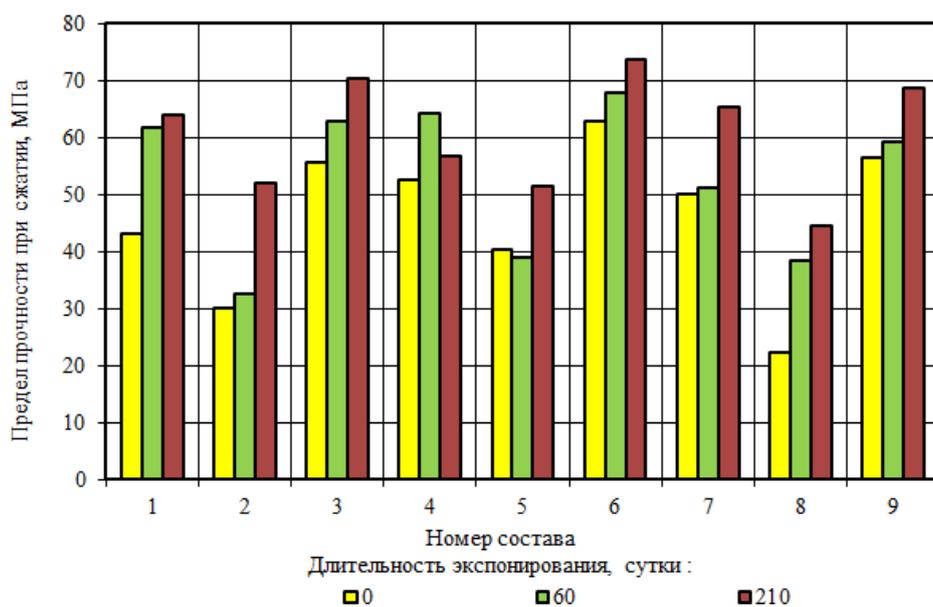


Рис. 3. Гистограммы изменения предела прочности при сжатии образцов мелкозернистого бетона в процессе экспонирования в натуральных климатических условиях.

Предел прочности на растяжение при изгибе является количественным критерием, по которому можно судить об изменении характеристик поверхностных слоев исследуемых композитов [14]. Из анализа данных, представленных на рис. 1, установлено, что к 60 суткам для всех исследуемых составов наблюдается повышение от 14 до 54% от первоначальной прочности. Однако последующее экспонирование образцов до 210 суток приводит к снижению предела прочности на растяжение при изгибе от 3 до 23% по сравнению с контрольными составами, что свидетельствует о начале накопления повреждений в поверхностных слоях образцов.

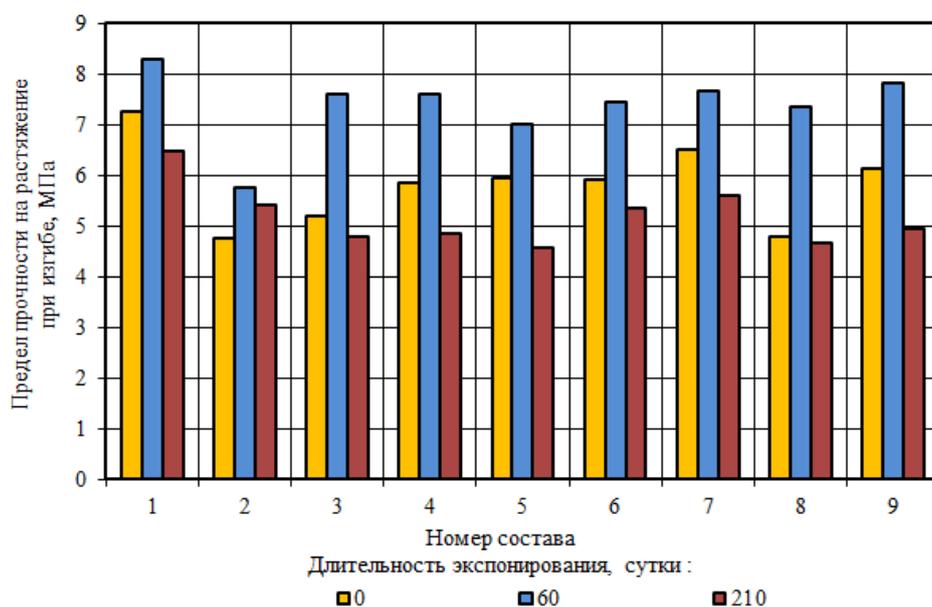


Рис. 4. Гистограммы изменения предела прочности на растяжение при изгибе образцов мелкозернистого бетона в процессе экспонирования в природных климатических условиях.

Сбор данных о климатическом воздействии природных факторов поможет в решении проблемы оценки степени влияния отдельно взятых агрессивных факторов на конструкции из мелкозернистых бетонов. Дальнейший анализ параметров агрессивного воздействия, влияющих на строительные материалы в природных условиях эксплуатации, поможет подобрать оптимальные составы для защиты конструкций и изделий, находящихся во взаимодействии с естественной средой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов И. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. – М.: Химия, 1982. – 220 с.
2. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 258 с.

3. Мелкумов А. Н., Татевосьян Г. О. Старение изделий из пластмасс в климатических условиях Узбекистана. – Т.: Узбекистан, 1975. – 177 с.
4. 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.
5. 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.
6. Низин Д. Р., Артамонов Д. А., Чернов А. Н., Низина Т. А. Результаты натуральных 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>.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Низина Т. А., Селяев В. П., Низин Д. Р., Артамонов Д. А. Климатическая стойкость композиционных строительных материалов в натуральных условиях эксплуатации // Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы: сборник докладов II Всероссийской научно-технической конференции. – ФГУП ВИАМ, 2015. – С. 1.
11. 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.

12. Селяев В. П., Низина Т. А., Артамонов Д. А., Коровкин Д. И., Андронычев Д. О. Результаты испытания составов мелкозернистых бетонов, экспонированных в условиях воздействия климатических факторов // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 3. – С. 158–165.

13. Низина Т. А., Артамонов Д. А., Коровкин Д. И., Андронычев Д. О. Результаты натуральных испытаний составов мелкозернистых бетонов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2015. – № 6(14). – Режим доступа: trts.esrae.ru/25-134.

14. Селяев В. П., Низина Т. А., Уткина В. Н. Химическое сопротивление и долговечность строительных материалов, изделий, конструкций: учеб. пособие. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2003. – 48 с.