Влияние химической добавки и пониженной начальной температуры структурообразования и твердения на параметры конструкционной прочности цементных композитов

И.Н. Максимова

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС),
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28*

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведены сравнительные экспериментальные исследования по изучению закономерностей совместного влияния пониженных температур и концентрации ускоряющей противоморозной добавки (УПМД) на процессы раннего и позднего структурообразования и твердения цементных композитов. С позиций структурной механики разрушения для материалов конструкционного назначения оценивали силовые и энергетические характеристики трещиностойкости.

Материалы и методы. Для изготовления опытных образцов использовали портландцемент активностью 41,8 МПа, известняковый щебень фракции 5–10 мм, речной сурский песок с модулем крупности 1,57, УПМД на основе смеси трех солевых отходов завода «Акрихин», водоцементное отношение во всех составах было равно 0,53, концентрация добавки в сравниваемых сериях образцов № 1–5 составляла, соответственно, 0; 0,75; 1,5; 3,0 и 6,0 % от массы цемента. Опытные образцы-призмы типа I с искусственной трещиной, получаемой в процессе формования образцов, испытывали на трехточечный изгиб при неравновесных механических испытаниях по методике ГОСТ 29167-91, предусматривающей использование метода акустической эмиссии для изучения в реальном масштабе времени процесса разрушения образцов сравниваемых серий.

Результаты. Получены параметры качества конструкционной прочности структур цементных композитов сравниваемых серий в возрасте 40 и 575 суток, отражающие процессы раннего и позднего этапов структурообразования и твердения после начального 28-суточного воздействия окружающей среды с температурой +2 °С.

Выводы. Результаты исследований свидетельствуют о том, что для модифицированных и немодифицированных структур цементных композитов в рассматриваемом диапазоне времени происходит нарастание не только величины долговременной прочности на осевое сжатие и растяжение при изгибе, но и механико-акустических критериев трещиностойкости. Это является четким следствием положительного влияния концентрации УПМД на механическое поведение опытных образцов с позиций структурной механики разрушения материалов, что играет важную роль при проектировании конструкционной прочности цементных дисперсных гетерогенных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементный композит, химическая добавка, температура, структура, длительная конструкционная прочность, механическое поведение, акустическая эмиссия, параметры конструкционной прочности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Максимова И.Н. Влияние химической добавки и пониженной начальной температуры структурообразования и твердения на параметры конструкционной прочности цементных композитов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 442–449. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.442-449

Influence of chemical additive and reduced initial temperature of structure formation and hardening on parameters of structural strength of cement composites

Irina N. Maksimova

*Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC),
28 German Titov st., Penza, 440028, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Comparative experimental studies have been conducted to study the regularities of the combined effect of low temperatures and concentration of accelerating antifreeze additives on the processes of early and late structure formation and hardening of cement composites. At the same time, the power and energy characteristics of crack resistance are evaluated from the standpoint of structural fracture mechanics for structural materials.

Materials and methods. The following components are used to fabricate experimental samples: Portland cement with the activity of 41.8 MPa, limestone crushed stone of the fraction of 5 to 10 mm, Sura river sand with the fineness modulus of 1.57, an accelerating antifreeze additive based on a mixture of three Akrikhin plant salt wastes. Water-cement ratio in all compositions is 0.53. Concentration of the additive in the compared sample series Nos. 1 to 5 is respectively 0, 0.75 %, 1.5 %, 3.0% and 6.0 % by weight of cement. Type I prism samples with an artificial crack obtained in the process of sample

molding are tested for three-point bending with non-equilibrium mechanical tests according to GOST 29167-91 which involves the use of an acoustic emission method to study the real-time fracture process of compared series samples.

Results. Quality parameters of the structural strength are obtained for the compared series cement composites at the ages of 40 days and 575 days. The parameters reflect the processes of the early and late stage of structure formation and hardening after the initial 28-day environmental exposure with the temperature of +2 °C.

Conclusions. Results of the research indicate that not only increase of magnitude of the long-term axial compression and tension-in-bending strength, but also increase of the mechanical-acoustic crack resistance criteria occurs for the modified and unmodified structures of cement composites in the considered time interval. This is a clear consequence of the positive effect of concentration of the accelerating antifreeze additives on the mechanical behavior of the samples from the standpoint of structural mechanics of materials destruction, which plays an important role in the design of the structural strength of dispersed cement heterogeneous systems.

KEYWORDS: cement composite, chemical additive, temperature, structure, long-term structural strength, mechanical behavior, acoustic emission, structural strength parameters

FOR CITATION: Maksimova I.N. Influence of chemical additive and reduced initial temperature of structure formation and hardening on parameters of structural strength of cement composites. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:4:442-449. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.442-449 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Изучению общих закономерностей совместного влияния пониженных температур и ускоряющих противоморозных химических добавок на процессы структурообразования и твердения цементных систем посвящены труды многих исследователей. Так, в работах [1–8] отмечается, что температура, при которой начинается процесс гидратации портландцемента, оказывает большее влияние на его микроструктуру, чем дальнейшее ее изменение. При этом понижение температуры окружающей среды вплоть до отрицательной обуславливает увеличение количества метамиктных соединений в цементном камне, а процесс кратковременной автоклавной обработки в корне меняет микроструктуру камня, способствуя кристаллизации зародышей, т.е. превращает метамиктные соединения в кристаллические.

Вместе с тем вопросы влияния пониженных температур и ускоряющих противоморозных добавок (УПМД) на формирование дисперсно-кристаллитной микроструктуры матричной фазы цементных композитов и их механическое поведение с позиций структурной механики разрушения материалов (СМРМ) по ГОСТ 29167-91¹ с оценкой параметров конструкционной прочности во времени в специальной литературе практически не освещены.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель данной работы — сравнительное сопоставление влияния количественной дозировки

УПМД на процессы раннего и позднего структурообразования и твердения цементного композита конструкционного назначения в условиях среды с пониженной начальной температурой путем сравнения механического поведения макроструктур опытных образцов-призм типа I по ГОСТ 29167-91 размером 40 × 40 × 160 мм. При этом с использованием метода акустической эмиссии (АЭ) были оценены силовые и энергетические характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) цементного композита при статическом нагружении с целью изучения самого процесса разрушения опытных образцов сравниваемых серий в реальном масштабе времени [9–12].

На основе вольского бездобавочного сульфатостойкого портландцемента активностью 41,8 МПа изготовлено две партии из пяти серий опытных образцов-призм типа I. Для получения начальной клиновидной трещины на образцах типа I в процессе их формования на одной из боковых граней формы наклеивали металлическую клиновидную вставку на всю высоту грани глубиной 13 мм и шириной основания 4 мм, что соответствовало углу вершины клиновидной вставки порядка 8 град.

Образцы серии № 1 были контрольными, т.е. изготовленными без добавки УПМД. Образцы серий № 2–4 изготовлены с добавкой УПМД в количестве, соответственно, 0,75; 1,5; 3,0 и 6,0 % от массы цемента. Химический состав добавки УПМД [13] на основе смеси трех солевых отходов при производстве ацетоуксусного эфира, ацетилацетона и нитрохлоракиридина московского завода «Акрихин» представлен в табл. 1.

Расчетный состав композитов обеих партий сравниваемых серий был одинаков и составлял на 1 м³: цемента — 400 кг; известнякового щебня фракции 5–10 мм — 1075 кг; сурского речного песка

¹ ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

Табл. 1. Химический состав добавки

Table 1. Additive chemical composition

Показатель / Indicator	Единица измерения / Unit of measurement	Значения показателей / Indicator values
Плотность / Density	г/см ³ / g/cm ³	1,15–1,20
pH	—	7,0–8,5
ХПК _{оиср} / COD _{bichr}	г/л / g/l	80–120
Сухой остаток / Dry residue	г/л / g/l	250–350
Прокаленный остаток / Calcined residue	г/л / g/l	200–300
Хлориды / Chlorides	г/л / g/l	140–80
Нитриты, нитраты / Nitrites, nitrates	г/л / g/l	6–8
АУЭ / Acetoacetic ether	г/л / g/l	10–25
Ацетилацетон / Acetyl acetone	г/л / g/l	20–30
Этилацетат / Ethyl acetate	г/л / g/l	10–20
CH ₃ COONa	г/л / g/l	15–40
Этиловый спирт / Ethanol	г/л / g/l	15–25

с $M_{кр} = 1,57 — 750$ кг; и имел В/Ц отношение, равное 0,53, во всех сериях опытных образцов.

После формования опытных образцов-призм формы с образцами помещали в холодильник, где они находились в течение 28 сут при температуре +2 °С. В возрасте 28 сут образцы расплубливали и хранили на стеллажах в обычных лабораторных условиях.

Первую партию опытных образцов-призм из пяти сравниваемых серий испытывали в возрасте 40 сут, т.е. в возрасте раннего структурообразования и твердения, с оценкой силовых и энергетических параметров конструкционной прочности при трехточечном изгибе по методике ГОСТ 29167-91 с одновременной оценкой энергии АЭ самого процесса разрушения на диаграмме нагружения образцов.

Вторую партию опытных образцов тех же сравниваемых серий испытывали на поздней стадии процессов структурообразования и твердения в возрасте 575 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты обработки данных экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

Параметры прочности на растяжение при изгибе $R_{рн}$, критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} и энергии акустической эмиссии $\mathcal{E}_{АЭ}$ опытных образцов определяли на разрывной испытательной машине FM-1000 (рис. 1) с использованием акустико-эмиссионного устройства (АЭУ) [9–12]. Разрывная машина обладает тремя диапазонами силоизмерения для достижения предельно возможной степени точности как при наименьшей, так и наибольшей нагрузке машины. Все экспериментальные результаты получены с использованием диапазона силоизмерения на шкале от 0 до 500 кгс.

В наших исследованиях мы использовали ручной приводной механизм, с помощью которого нижнее зажимное устройство медленно передвигается вниз специальным маховичком, что, во-первых, позволяет значительно уменьшить скорость движения зажимного устройства при статическом приложении нагрузки, а во-вторых, дополнительно исключить помехи в работе АЭУ от работающего электродвигателя.

АЭ опытных образцов изучали с помощью АЭУ на основе стандартного прибора АФ-15, что позволяло регистрировать важнейшие параметры сигналов АЭ: амплитуду сигнала, его длительность, интенсивность, общее количество отдельных событий АЭ, суммарную энергию по ГОСТ Р 55045-2012 «Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения».

Чувствительным элементом преобразователя сигналов АЭ являлась пьезокерамика типа цирконат-титонат свинца марки ЦТС-19. Для получения хорошего акустического контакта преобразователь АЭ был прижат с помощью банджа из специальной резины с постоянным усилием к торцевой поверхности образца-призмы через тонкий слой петролатумной смазки. Параметры АЭ регистрировали в полосе частотного диапазона 50–150 кГц. Данный метод исследования отличает высокие чувствительность и разрешающая способность.

Измерение параметров волн АЭ позволяет обнаружить зарождение, развитие и рост различных дефектов, а также осуществлять контроль за ходом разрушения в исследуемом образце в реальном масштабе времени. При этом возможно выявить наиболее общие закономерности процесса разрушения материала, а также критерии перехода от устойчивой стадии разрушения к стадии неустойчивой, приводящей к окончательному разрушению [14–16].

Табл. 2. Технологические свойства цементных дисперсных систем и параметры конструкционной прочности композитов

Table 2. Technological properties of cement disperse systems and parameters of composite structural strength

Параметры качества цементного композита / Cement composite quality parameters	Показатели качества сравниваемых серий образцов / Quality ratings of compared sample series				
	Серия 1 / Series 1	Серия 2 / Series 2	Серия 3 / Series 3	Серия 4 / Series 4	Серия 5 / Series 5
Технологические свойства цементных композиций / Cement composite technological properties					
Масса химической добавки, % / Chemical additive weight, %	—	0,75	1,5	3,0	6,0
$\rho_{\text{к.см}^3}$, кг/м ³ / $\rho_{\text{с.м.к.с.}}$, kg/m ³	2377	2383	2369	2371	2409
$K_{\text{упл}} / K_{\text{сomp}}$	0,975	0,977	0,972	0,973	0,988
Пористость по испарившейся воде, % / Porosity by evaporated water, %	11,3	10,0	9,8	8,4	14,9
В/Ц / Water-cement ratio	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
Показатели качества образцов в возрасте 40 сут / Quality ratings of 40-day samples					
$R_{\text{сж}}$, МПа / $R_{\text{сomp}}$, МПа	24,1 / 1	24,6 / 1,02	25,9 / 1,07	34,5 / 1,43	40,0 / 1,66
$R_{\text{пр}}$, МПа / $R_{\text{тб}}$, МПа	2,75 / 1	3,14 / 1,14	3,26 / 1,18	3,96 / 1,44	4,48 / 1,63
K_{IC} , МПа·м ^{0,5} / K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	0,273 / 1	0,308 / 1,13	0,318 / 1,16	0,389 / 1,42	0,438 / 1,60
$\Theta_{\text{АЭ}}$, В ² ·см ⁻² / $E_{\text{АЭ}}$, В ² ·см ⁻²	0,108 / 1	0,118 / 1,09	0,230 / 2,13	0,212 / 1,96	0,219 / 2,03
Показатели качества образцов в возрасте 575 сут / Quality ratings of 575-day samples					
$R_{\text{сж}}$, МПа / $R_{\text{сomp}}$, МПа	54,2 / 1	54,2 / 1	55,2 / 1,02	57,5 / 1,06	55,6 / 1,03
$R_{\text{пр}}$, МПа / $R_{\text{тб}}$, МПа	6,02 / 1	6,7 / 1,11	6,94 / 1,15	8,28 / 1,37	7,97 / 1,32
K_{IC} , МПа·м ^{0,5} / K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	0,606 / 1	0,668 / 1,10	0,682 / 1,12	0,717 / 1,18	0,782 / 1,29
$\Theta_{\text{АЭ}}$, В ² ·см ⁻² / $E_{\text{АЭ}}$, В ² ·см ⁻²	0,39 / 1	0,409 / 1,05	0,454 / 1,16	0,489 / 1,25	0,523 / 1,34
Изменения численных значений изучаемых свойств во времени 40–575 сут / Variations of property numerical values depending on time within 40 to 575 days					
$R_{\text{сж}}^{575}/R_{\text{сж}}^{40} / R_{\text{сomp}}^{575}/R_{\text{сomp}}^{40}$	2,25	2,20	2,13	1,67	1,39
$R_{\text{пр}}^{575}/R_{\text{пр}}^{40} / R_{\text{тб}}^{575}/R_{\text{тб}}^{40}$	2,19	2,13	2,13	2,09	1,78
$K_{\text{IC}}^{575} / K_{\text{IC}}^{40}$	2,22	2,19	2,14	1,84	1,78
$\Theta_{\text{АЭ}}^{575} / \Theta_{\text{АЭ}}^{40} / E_{\text{АЭ}}^{575}/E_{\text{АЭ}}^{40}$	3,61	3,47	1,97	2,31	2,39

Примечание: перед слэшем указаны численные значения свойств; после слэша приведен коэффициент нарастания свойства относительно контрольного состава серии 1.

Note: property numerical value is given before slash, property growth factor relative to series 1 check composition is given after slash.

Для оценки K_{IC} использовали рекомендуемые ГОСТ 29167–91 подходы механики разрушения на основе сформулированных требований по определению силовых и энергетических характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом кратковременном нагружении бетонов.

По данным результатов неравновесных испытаний образцов критический коэффициент интен-

сивности напряжений K_{IC} определяли по зависимости (9) ГОСТ 29167-91

$$K_{\text{IC}} = \frac{3F_c^* L_0}{2b^{1/2} t} \sqrt{a_0/b} (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4),$$

где F_c^* — нагрузка начала движения трещины; L_0 — расстояние между опорами; t — ширина об-

Рис. 1. Фрагмент подвижного захвата испытательного образца, крепления преобразователя сигналов АЭ и шкалы силоизмерения разрывной машины типа FM-1000

Fig. 1. A fragment of movable sample tension grip, attachments of acoustic emission signal transducer and load measuring scale of FM-1000 tensile testing machine

разца; a_0 — глубина надреза; b — высота образца; $\lambda = a_0/b$.

Предел прочности сравниваемых образцов определяли на половинках призм после испытания последних на изгиб на прессе УММ-50 в соответствии с ГОСТ 310.4–81. Для образцов типа I при трехточечном изгибе силовую характеристику трещиностойкости $R_{\text{пр}}$, МПа, определяли по формуле

$$R_{\text{пр}} = \frac{3P_c^* L}{2tb^2(1-\lambda)^2},$$

где P_c^* — максимальная (разрушающая) нагрузка, Н; L — расстояние между опорами, м; t и b — соответственно, ширина и высота сечения, м; $\lambda = a_0/b$ — относительная длина надреза.

Из анализа экспериментальных данных, приведенных в табл. 2, следует отметить, что одной из важнейших характеристик прочности цементного камня является трещиностойкость (вязкость разрушения), под которой принято понимать комплекс

параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины. Современная механика материалов в качестве меры этого свойства предложила величину энергии разрушения [17, 18].

Энергия разрушения как параметр прочности привлекает внимание исследователей фундаментальностью, практической важностью, дает возможность разработать в рамках механики разрушения подходы, позволяющие технологам указать оптимальные пути создания конструкционных бетонов нового поколения и реализовать основную идею разработки композиционных строительных материалов, которая заключается в соединении высокой прочности материала с хорошей трещиностойкостью (вязкостью разрушения) [19–21].

Анализируя численные значения показателей качества образцов в ранние сроки структурообразования и твердения, т.е. в возрасте 40 сут, следует отметить, что относительно контрольного состава об-

разцов серии 1 использование УПМД в количестве 0,75–6 % от массы цемента в сериях образцов 2–5 позволяет значительно увеличить численные значения контролируемых качественных характеристик образцов, особенно следует отметить составы 4 и 5, где характеристики трещиностойкости увеличены на 42–66 %. На более поздних стадиях процесса структурообразования и твердения это увеличение находилось в пределах 18–37 %, а для $R_{сж}$ — всего на 3–6 %.

Что касается характера изменения численных значений изучаемых свойств во времени 40–575 сут, то, как отмечено в работе [22], на формирование структур и численных значений параметров конструкционной прочности оказывают влияние и взаимовлияние как конструктивные, так и деструктивные временные процессы структурообразования и твердения, скорости которых в сравниваемых сериях цементных композитов имеют существенное как качественное, так и количественное, различие, в результате преобладает или конструктивное, или деструктивное начало, обуславливающее изменение механических свойств этих систем.

С другой стороны, рост численных значений параметров K_{IC} и $\mathcal{E}_{A3}$ с увеличением возраста це-

ментного композита коррелирует с положением [23] о том, что упрочнение структуры цементного композита во времени рассматривается как переход части адгезионных контактов электромагнитной и электростатической природы в кристаллизационные связи валентной природы, разрушение которых, естественно, характеризуется высвобождением большей упругой энергии, генерируемой в акустические сигналы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что для модифицированных и немодифицированных структур цементного композита в рассматриваемом диапазоне времени происходит специфическое нарастание параметров долговременной конструкционной прочности и механико-акустических критериев трещиностойкости. Это подтверждает четкую зависимость влияния концентрации ускоряющей противоморозной добавки на механическое поведение сравниваемых серий образцов с позиций структурной механики разрушения материалов и имеет большое практическое значение при проектировании конструкционной прочности цементных дисперсных гетерогенных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М. : Стройиздат, 1981. 464 с.
2. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1975. 700 с.
3. Мчедлов-Петросян О.П., Чернявский В.Л. Структурообразование и твердение цементных паст и бетонов при пониженных температурах. Киев : Будивельник, 1974. 112 с.
4. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / под ред. Л.Г. Шпыновой. Львов : Изд-во при Львовском ун-те, 1981. 160 с.
5. Тараканов О.В. Бетоны с модифицирующими добавками на основе вторичного сырья. Пенза : ПГУАС, 2004. 564 с.
6. Stonis R., Antonovich V., Pundene I., Skripkyunas G., Demidova-Buizine I. Effect of temperature on the curing of medium-cement refractory concrete with a composite deflocculant // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2012. Vol. 52. No. 6. Pp. 414–418. DOI: 10.1007/s11148-012-9445-y
7. Rashad A.M., Zeedan S.R. A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 29. Pp. 672–681. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.006
8. Watanabe Kazuo, Bangi Mugume Rodgers, Horiguchi Takashi. The effect of testing conditions (hot and residual) on fracture toughness of fiber reinforced high-strength concrete subjected to high temperatures // *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 51. Pp. 6–13. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.04.003
9. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2007. № 3. С. 25–27.
10. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов. М. : МГСУ, 2013. 152 с.
11. Makridin N.I., Maksimova I.N., Polubarova J.V. Influence of initial hydration conditions of cement on the process and fracture parameters of hardened cement paste structure of different age // *Proceedings of the International Symposium on Mechanical Engineering and Material Science*. 2016. Vol. 93. Pp. 175–179. DOI: 10.2991/ismems-16.2016.31
12. Makridin N.I., Kalachnikov V.I., Maksimova I.N., Tarakanov O.V., Polubarova Ju.V. Inner friction and dynamic modulus of elasticity of structural concrete // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11. Issue 7. Pp. 1545–1548. DOI: 10.3923/jeasci.2016.1545.1548

13. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Прочность и параметры разрушения цементных композитов. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2015. 360 с.

14. Грешиников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М. : Изд-во стандартов, 1976. 276 с.

15. Муравин Г.Б., Павловская Г.С., Лиходько А.Д. Акустическая эмиссия при деформировании бетона // Дефектоскопия. 1982. № 12. С. 3–13.

16. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика / пер. с англ. Л.П. Карпиловского, Б.И. Поляка. М. : Металлургия, 1980. 256 с.

17. Ленг Ф.Ф. Разрушение композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице // Композиционные материалы. Т. 5: Разрушение и усталость / ред. Л. Браутман; пер. под ред. Г.П. Черепанова. М. : Мир, 1978. С. 11–57.

18. Smirnov V.A., Korolev E.V., Evstigneev A.V., Poddaeva O.I. Modeling the building materials: applications of particle dynamics // ПООАВ Journal. 2016. Vol. 7. No. 1. Pp. 496–503.

19. Yan Z., Pantelides C.P. Concrete column shape modification with FRP shells and expansive

cement concrete // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. No. 1. Pp. 396–405. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.013

20. Tarasov A.S., Kearsley E.P., Kolomatskiy A.S., Mostert H.F. Heat evolution due to cement hydration in foamed concrete // Magazine of Concrete Research. 2010. Vol. 62. No. 12. Pp. 895–906. DOI: 10.1680/macr.2010.62.12.895

21. Kataoka L.T., Machado M.A.S., Bittencourt T.N. Short-term experimental data of drying shrinkage of ground granulated blast-furnace slag cement concrete // Materials and Structures. 2011. Vol. 44. No. 3. Pp. 671–679. DOI: 10.1617/s11527-010-9657-x

22. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Королев Е.В. Взаимосвязь кинетических зависимостей внутреннего трения, модуля упругости и параметров разрушения конструкционной прочности модифицированных суперпластификатором С-3 структур цементных композитов // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 4 (33). С. 36–46.

23. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. Л. : Стройиздат, 1974. 80 с.

Поступила в редакцию 5 января 2019 г.

Принята в доработанном виде 3 февраля 2019 г.

Одобрена для публикации 27 марта 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: **Максимова Ирина Николаевна** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления качеством и технологии строительного производства, **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, maksimovain@mail.ru.

REFERENCES

1. Akhverdov I.N. *Basics of Concrete Physics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981; 464. (rus.).

2. Mironov S.A. *Theory and methods of winter concreting*. 3rd ed., revised and add. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975; 700. (rus.).

3. Mchedlov-Petrosyan O.P., Chernyavskiy V.L. *Structure formation and hardening of cement pastes and concretes at low temperatures*. Kiev, Budivelnik Publ., 1974; 112. (rus.).

4. *Physical and chemical bases of formation of the structure of cement stone* / under the ed. L.G. Shpynovoy. Lviv, Publishing house at Lviv University, 1981; 160. (rus.).

5. Tarakanov O.V. *Concretes with modifying additives based on secondary raw materials*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction Publ., 2004; 564. (rus.).

6. Stonis R., Antonovich V., Pundene I., Skripkyunas G., Demidova-Buizine I. Effect of temperature on

the curing of medium-cement refractory concrete with a composite deflocculant. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2012; 52(6):414-418. DOI: 10.1007/s11148-012-9445-y

7. Rashad A.M., Zeedan S.R. A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature. *Construction and Building Materials*. 2012; 29:672-681. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.006

8. Watanabe Kazuo, Bangi Mugume Rodgers, Horiguchi Takashi. The effect of testing conditions (hot and residual) on fracture toughness of fiber reinforced high-strength concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research*. 2013; 51:6-13. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.04.003

9. Makridin N.I., Korolev E.V., Maksimova I.N. Acoustic emission method in construction materials. *Construction Materials*. 2007; 3:25-27. (rus.).

10. Makridin N.I., Korolev Ye.V., Maksimova I.N. *Structure formation and structural strength of cement composites*. Moscow, MGSU Publ., 2013; 152. (rus.).
11. Makridin N.I., Maksimova I.N., Polubaro-va J.V. Influence of initial hydration conditions of cement on the process and fracture parameters of hardened cement paste structure of different age. *Proceedings of the International Symposium on Mechanical Engineering and Material Science*. 2016; 93:175-179. DOI: 10.2991/ismems-16.2016.31
12. Makridin N.I., Kalachnikov V.I., Maksimova I.N., Tarakanov O.V., Polubarova Ju.V. Inner friction and dynamic modulus of elasticity of structural concrete. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016; 11(7):1545-1548. DOI: 10.3923/jeasci.2016.1545.1548
13. Maksimova I.N., Makridin N.I., Yero-feyev V.T., Skachkov Yu.P. *Strength and destruction parameters of cement composites*. Saransk, Publishing house of the Mordovian University, 2015; 360. (rus.).
14. Greshnikov V.A., Drobot Yu.B. *Acoustic emission*. Moscow, Publishing house of standards, 1976; 272. (rus.).
15. Muravin G.B., Pavlovskaya G.S., Likhod'ko A.D. Acoustic emission during the deformation of concrete. *Defectoscopy*. 1982; 12:3-13. (rus.).
16. Evans A.G., Langdon T.G. *Structural ceramics*. Oxford, Pergamon P., 1976.
17. Leng F.F. *Destruction of composites with dispersed particles in a brittle matrix*. *Composite materials*. Vol. 5: Destruction and fatigue / ed. L. Brautman; transl. from engl. G.P. Cherepanova. Moscow, World Publ., 1978; 11-57. (rus.).
18. Smirnov V.A., Korolev E.V., Evstigneev A.V., Poddaeva O.I. Modeling the building materials: applications of particle dynamics. *IIOAB Journal*. 2016; 7(1):496-503.
19. Yan Z., Pantelides C.P. Concrete column shape modification with FRP shells and expansive cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(1):396-405. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.013
20. Tarasov A.S., Kearsley E.P., Kolomatskiy A.S., Mostert H.F. Heat evolution due to cement hydration in foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2010; 62(12):895-906. DOI: 10.1680/macrc.2010.62.12.895
21. Kataoka L.T., Machado M.A.S., Bittencourt T.N. Short-term experimental data of drying shrinkage of ground granulated blast-furnace slag cement concrete. *Materials and Structures*. 2011; 44(3):671-679. DOI: 10.1617/s11527-010-9657-x
22. Maksimova I.N., Makridin N.I., Korolev Y.V. Interrelation of kinetic dependencies of internal friction, the module of elasticity, and parameters of destruction of structural durability of cement composites modified by superplastificator C-3. *Regional architecture and engineering*. 2017; 4(33):36-46. (rus.).
23. Sychev M.M. *Hardening of binders*. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1974; 80. (rus.).

Received January 5, 2019.

Adopted in a modified form February 3, 2019.

Approved for publication March 27, 2019.

ABOUT THE AUTHOR: **Irina N. Maksimova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Quality Management and Technology of Construction Production, **Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC)**, 28 German Titov st., Penza, 440028, Russian Federation, maksimovain@mail.ru.