УДК 691.3

СИНТЕЗ РАСШИРЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ УСАДКИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

А.А. Еленова, Ю.Р. Кривобородов*Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева),
125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, стр. 4*

Аннотация. Повышение трещиностойкости цементных растворов и бетонов является темой многих исследований из-за важности этой проблемы. Одним из методов ее решения, по мнению многих исследователей, может стать использование расширяющих добавок. Статья посвящена исследованию влияния искусственно синтезированной расширяющей добавки на свойства цементного камня и бетона. Расширяющая добавка получена путем гидродинамической активации сульфоалюминатного клинкера в роторно-пульсационном аппарате. Изучены морфология кристаллогидратов и структура полученной добавки. Описано влияние добавки кристаллогидратов на структуру портландцементного камня, на прочностные и деформационные характеристики цементного камня. Установлена оптимальная дозировка расширяющей добавки к портландцементу для получения плотного, прочного и безусадочного мелкозернистого бетона.

Ключевые слова: портландцемент, кристаллические затравки, расширяющаяся добавка, безусадочный цемент, линейное расширение

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.326-333

SYNTHESIS OF EXPANDER TO PREVENT CONTRACTION OF CEMENT STONE

A.A. Elenova, Yu.R. Krivoborodov*Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
20 bldg 4 Geroev Panfilovtsev str., Moscow, 125480, Russian Federation*

Abstract. This article contains the results of studies of the use of additives containing crystallization components significantly affecting the curing of cement, improving the structure of cement stone and concrete. The crystalline component is obtained using the rotary-pulse unit, which provides not only the grinding of agents, but their interaction with each other as well in order to accelerate the hydration and structure formation in cement stone. The degree, and kinetics of hydration, the composition of hydrated phases, the structure of the additives and cement stone was studied using the following methods: x-ray diffraction (XRD), differential thermal analysis (DTA), scanning electron microscope (SEM). Mechanical properties of cement were determined by standard methods and techniques.

The expander produced by means of hydrodynamic activation of the sulfoaluminate clinker (SAC) consists of ettringite and hydrated calcium silicates, which are characterized by high dispersion rate (less than 10 μm) and reactivity as the seed for the crystallization of hydrated compounds. The introduction of the ultrafine additives of the crystalline SAC (within 1...5 %) was discovered to cause expansion of the cement stone.

Implementation of the additives increases cement hydration and contributes to the formation of active centers of crystallization that lead to the fast formation of ettringite, hydrated calcium aluminates and calcium silicates. The activated crystalline additive provides for significant reduction of porosity, initial curing, and high strength of cement stone. In addition, the additive is an expansive component, forming needle-like crystals of ettringite during hydration. These microcrystals grow in the capillaries of cement stone, filling them, and create conditions for improving the crack resistance of cement concrete.

Key words: portland cement, crystalline seed, expander, expander additive, shrinkage-compensated cement, linear expansion

Несмотря на наличие многочисленных работ, посвященных методам повышения трещиностойкости цементных растворов и бетонов, эта проблема остается актуальной.

Многие исследователи указывают, что при использовании расширяющих добавок можно добиться снижения потенциального трещинообразования в бетоне [1–4].

В качестве основных факторов в многочисленных теориях расширения фигурируют два показателя — кристаллизационное и осмотическое давления [5–9]. Утверждается, что расширение цементного камня является следствием интенсивного роста кристаллов этtringита в определенный период развития кристаллизационной структуры твердеющего цементного камня [1]. Рост кристаллов расширяю-

щего компонента, гидросульфоалюмината кальция (ГСАК), должен достичь максимального значения в определенный отрезок времени, именно тогда, когда закристаллизовавшихся участков в цементном камне недостаточно для того, чтобы растущие кристаллы могли их раздвигать и вызывать расширение [9–12]. При быстром образовании ГСАК (при тонком измельчении расширяющегося цемента), когда камень еще не приобрел достаточной жесткости, расширения не будет [12]. Если увеличить количество гипса в обычном цементе, то определенное его количество будет связываться в ГСАК в отдаленные сроки, когда структура цементного камня приобретает высокую прочность [13]. Рост кристаллов вызовет не только расширение, но и разрушение камня. Именно ускоренным ростом кристаллов эттрингита по сравнению с ростом кристаллов других гидратных новообразований объясняется тот факт, что при образовании ГСАК расширение и разрушение цементного камня вызывают силы кристаллизационного давления в процессе роста кристаллов эттрингита [14, 15].

Анализ данных предыдущих исследований позволяет сделать заключение о необходимости создания условий для ускоренного образования ГСАК в начальный период твердения цементных растворов для предотвращения усадочных явлений.

Решение поставленной задачи становится возможным при применении интенсивных технологий приготовления вяжущих композиций, позволяющих регулировать процессы их структурообразования, значительно повышать степень использования внутренней энергии обрабатываемых материалов

и качество строительных изделий на их основе, — активационных технологий [16–19]. Наиболее перспективным при этом является использование гидродинамического метода активации, обеспечивающего создание интенсивных гидродинамических потоков и эффективности диспергирующего воздействия на обрабатываемую среду вследствие различных активизирующих факторов, в результате чего резко улучшаются физико-химические характеристики обрабатываемых материалов и строительно-технические свойства получаемого конечного продукта [20].

Поэтому целью нашего исследования стало получение микродисперсной добавки кристаллогидратов при гидродинамической активации, способствующей ускоренному набору прочности и расширению цементного камня.

Для исследования влияния модифицирующей добавки на процесс формирования структуры и свойства цементного камня использовали портландцемент (ПЦ) 500-Д0 (ОАО «Подольск-Цемент»).

В качестве модифицирующей добавки выступила микродисперсная добавка кристаллогидратов, синтезированная путем гидродинамической активации сульфоалюминатного клинкера (САК) в течение 5 мин в лабораторном центробежном активаторе-смесителе — роторно-пульсационном аппарате (РПА) — при отношении твердого вещества и воды (Т/В), равном 1/3.

Для определения физико-механических свойств изготовили образцы в виде призм размером $4 \times 4 \times 16$ см, а для оценки влияния добавок на структуру цементного камня — размером $1 \times 1 \times 3$ см, которые

Рис. 1. Рентгенограммы исходного САК и обработанного в РПА

Fig. 1. X-Ray of original SAC (sulfoaluminate clinker) and SAC treated in RPU

Рис. 2. Изменение гранулометрического состава добавки при механоактивации: САК исх. — исходное состояние; САК 3 мин — через 3 мин после обработки САК; САК 20 мин — 20 мин после обработки САК; САК 40 мин — 40 мин после обработки САК

Fig. 2. Change of grain size of expander in case of mechanical activation : SAC int — initial state; SAC 3 min — 3 min after SAC treatment; SAC 20 min — 20 min after SAC treatment; SAC 40 min — 40 min after SAC treatment

твердели и набирали прочность в нормальных условиях. Для изучения состава гидратных фаз добавки применяли известные методы физико-химического анализа: рентгенофазового (РФА) и дифференциально-термического (ДТА). Структуру добавки и цементного камня исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа в Центре коллективного пользования РХТУ имени Д.И. Менделеева. Размер кристаллов микродисперсных добавок изучали методом лазерной гранулометрии.

Продуктами гидратации САК после обработки в РПА являются различные типы гидросиликатов кальция, ГСАК. РФА установлено, что в результате интенсивных воздействий на обрабатываемую среду в смеси образуется эттрингит (диаметр частиц $d = 9,77; 5,6; 3,8 \text{ \AA}$), гидросиликаты кальция ($d = 12,5; 8,9; 3,05; 2,82; 2,00; 1,83; 1,56 \text{ \AA}$) (рис. 1).

На кривой ДТА активированной добавки САК наблюдаются три выраженных эндотермических эффекта с максимумами в интервале температур $100...200 \text{ }^\circ\text{C}$, $250...270 \text{ }^\circ\text{C}$ и около $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Эндотермические эффекты при температуре около $130 \text{ }^\circ\text{C}$ обусловлены совместными эффектами дегидратации эттрингита и гидросиликатов кальция, а при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ — эффектами дегидратации смеси гидросиликатов кальция разной основности.

При изучении влияния обработки САК в РПА на гранулометрический состав добавки было обнаружено смещение гранулометрического состава в область мелких фракций. Через 3 мин после обработки САК наблюдается резкое увеличение количества частиц размером 10 мкм и менее в сравнении

с их количеством в исходном сульфоалюминатном цементе (рис. 2). При дальнейшей обработке САК в РПА происходит некоторое увеличение размера частиц. Это связано с тем, что в активированном цементе возникающие мельчайшие частицы быстро взаимодействуют между собой с образованием более крупных агрегатов, что и отражается на гранулометрическом составе обработанного в РПА материала.

Данные кристаллогидраты добавки в цементной системе являются первичными зародышами и затравками для гидратных соединений и продолжают расти за счет свободных ионов в водном растворе, тем самым армируя по всему объему цементный камень.

Электронно-микроскопический анализ структуры добавки САК показал, что она представлена гидратными образованиями, главным образом, ГСАК и гидросиликатами кальция, с размером кристаллов менее 10 мкм (рис. 3).

Определение прочностных характеристик цементных растворов показало, что введение добавок кристаллогидратов увеличивает прочность при сжатии на $20...30 \text{ \%}$ и при изгибе — на $10...20 \text{ \%}$ в начальный период твердения (2 сут) по сравнению с прочностью контрольного состава (рис. 4). Через 28 сут прочность при сжатии у образцов с добавками была выше на $8...15 \text{ \%}$, а прочность при изгибе — в среднем на $14 \text{ \%}$, чем у образцов без добавок, так как игольчатые кристаллы эттрингита выступают в роли армирующего агента и способствуют увеличению прочности.

Рис. 3. Фотографии микроstructures добавки САК после обработки в РПА, сделанные растровым электронным микроскопом с увеличением: *a* — в 5000 раз; *б* — в 2000 раз

Fig. 3. Photos of the microstructure of SAC expander after treatment in RPU (rotary pulsing unit), made using scanning electronic microscope with magnification: *a* — 5000 times; *b* — 2000 times

Рис. 4. Прочность цементного камня с активированной добавкой САК: *a* — при сжатии; *б* — при изгибе: контр. — контрольный состав; 1 % — состав с 1 %-ной добавкой; 3 % — состав с 3 %-ной добавкой; 5 % — состав с 5 %-ной добавкой

Fig. 4. Strength of cement stone with activated SAC expander: *a* — compressive; *b* — bending: test. — test mix; 1 % — mix with 1% expander; 3 % — mix with 3 % expander; 5 % — mix with 5 % expander

При увеличении количества добавки до 5 % прочностные характеристики цементного камня несколько снизились. Снижение прочности объясняется расширением цементного камня, которое происходит за счет увеличения объема твердой фазы — этtringита (рис. 5).

Таким образом, применение микродисперсной добавки кристаллогидратов САК создает расширение цементного камня даже при минимальных дозировках добавки, а при увеличении количества вводимой добавки (до 5 %) расширение максимально и прочностные показатели несколько снижаются.

Расширение цементного камня обусловлено как высокой скоростью зародышеобразования, так и повышенной скоростью формирования кристаллов этtringита. Это, в свою очередь, отражается на микроструктуре затвердевшего камня с микродисперсными

добавками: кристаллы этtringита равномерно распределяются по структуре образца.

Исследования образцов с применением сканирующего электронного микроскопа показали, что структура цементного камня, образующаяся при использовании микродисперсной добавки, отличается от микроstructures бездобавочного цементного камня (рис. 6). В образцах с добавками наблюдается равномерное распределение кристаллов этtringита, как в межзерновом пространстве, так и на поверхности гидратирующихся частиц цемента.

Кристаллы этtringита заполняют поры, происходит их коагуляция, и вместе с этим наблюдается раздвижка между образовавшимися гидратами, т.е. расширение цементного камня.

Уплотнение структуры цементного камня за счет кристаллизации новообразований в его порах обуславливает уменьшение пористости камня (рис. 7).

Рис. 5. Расширение цементного камня с активированной добавкой в зависимости от времени твердения: 0 % — без добавки; САК 1 % — с 1%-ной добавкой САК; САК 5 % — с 5%-ной добавкой САК

Fig. 5. Expansion of cement stone with activated expander, depending on curing time: 0 % — without expander; SAC 1 % — with 1% SAC expander; SAC 5 % — with 5% SAC expander

Рис. 6. Фотографии микроструктуры цементного камня после 3 сут твердения, сделанные растровым электронным микроскопом: *a* — без добавки; *б* — с 5%-ной добавкой

Fig. 6. Photos of microstructure of the cement stone after 3 days of curing, made with scanning electronic microscope : *a* — without expander; *b* — with 5% expander

Рис. 7. Пористость цементного камня в зависимости от количества активированной добавки САК

Fig. 7. Porosity of cement stone depending on the amount of activated SAC expander

Трещиностойкость цементного камня

Crack resistance of cement stone

Образец / Sample	Время появления трещин, сут / Time to cracks, days
ПЦ бездобавочный / PC without expander	18
ПЦ с 1%-ной активированной добавкой / PC with 1% activated expander	38
ПЦ с 5%-ной активированной добавкой / PC with 5% activated expander	59

Пористость образцов, твердевших 3 и 28 сут, пропорционально уменьшается при увеличении количества добавки. Пористость цементного камня с 5%-ной добавкой практически в два раза меньше, чем пористость бездобавочного образца.

Повышение плотности камня и устранение усадочных деформаций при использовании активированной добавки обеспечивают повышение трещиностойкости цементного камня (табл.). Испытания выполнены по известному методу Р. Лермита — формирование цементного кольца и хранение его на воздухе до появления трещин [21].

Таким образом, применение добавки, состоящей из активированных кристаллогидратов, приводит к значительному уменьшению пористости, формированию начальной плотной и прочной структуры цементного камня.

Добавка кристаллогидратов на основе САК является не только кристаллической затравкой, но и расширяющей добавкой в бетон, образуя при гидратации игольчатые кристаллы этtringита. Данные микрокристаллы прорастают в капиллярах бетона, колымаируют их и создают условия для повышения трещиностойкости цементных бетонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. М.: Стройиздат, 1986. 208 с.
2. Гридчина А.А., Титова Л.А. Перспективы применения бетонов на основе расширяющих добавок в современном монолитном строительстве // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 21. С. 17–19.
3. Кривобородов Ю.Р., Самченко С.В. Состав и свойства расширяющихся цементов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. 54 с.
4. Кузнецова Т.В., Кривобородов Ю.Р., Самченко С.В. Химия, состав и свойства специальных цементов // Химия, химическая технология на рубеже тысячелетия: материалы науч.-практ. конф. (Томск, 03–04 октября 2000 г.). Томск, 2000. № 1. С. 96–98.
5. Кузнецова Т.В., Кривобородов Ю.Р., Бурлов И.Ю. Основные направления в химии и технологии специальных цементов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 61–63.
6. Хлыстов А.И., Коннова Л.С., Широков В.А. и др. Расширяющиеся пластичные композиции общестроительного и специального назначения // Научное обозрение. 2015. № 23. С. 22–26.
7. Кузнецова Т.В. Производство и применение сульфоалюминатных цементов // Строительные материалы. 2010. № 3. С. 29–32.
8. Тимашев В.В., Сычева Л.И., Нестерина Е.М. Синтез и исследование комплексных солей кальция // Труды всесоюзного совещания по гидратации и твердению вяжущих. Львов, 1981. С. 49–52.
9. Kouznetsova T.V., Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V. et al. Special cements on base sulphoaluminate clinker // 13th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). Madrid. Spain. 2011. Pp. 198.1–198.6
10. Самченко С.В., Зорин Д.А., Борисенкова И.В. Влияние дисперсности глиноземистого шлака и сульфоалюминатного клинкера на формирование структуры цементного камня // Техника и технология силикатов. 2011. Т. 18. № 2. С. 12–14.
11. Пат. 2447123 RU, МПК C09K 8/46, E21B 33/138. Тампонажный материал для цементирования скважин с большим газовым фактором / В.Л. Воеводкин, Ю.В. Фелов, К.В. Кохан, О.А. Чугаева, О.Г. Кузнецова, Н.А. Зуева, Е.М. Сажина; патентообл. ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». № 2011110400/03; заявл. 18.03.2011; опубл. 10.04.2012. Бюл. № 10.
12. Janotka I., Krajči L., Ray A. et al. The hydration phase and pore structure formation in the blends of sulfoaluminate-belite cement with Portland cement // Cement and Concrete Research. 2003. 33 (4). Pp. 489–497.
13. Winnefeld F., Lothenbach B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements experimental findings and thermodynamic modeling // Cement and Concrete Research. 2010. 40 (8). Pp. 1239–1247.
14. Курдовский В. Проблемы, вызываемые этtringитом // Цемент и его применение. 2016. № 4. С. 30–33.
15. Самченко С.В., Зорин Д.А., Борисенкова И.В. Структура и свойства расширяющихся цементов в зависимости от дисперсности глиноземистого шлака и сульфоалюминатного клинкера // Технологии бетонов. 2012. № 11–12 (76–77). С. 28–29.
16. Сулименко Л.М., Кривобородов Ю.Р., Плотников В.В. и др. Механоактивация вяжущих композиций на основе техногенных продуктов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1998. № 10 (478). С. 51–56.
17. Бердов Г.И., Машкин Л.Н. Исследование процесса активации цемента в гидродинамическом диспергаторе // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 12. С. 37–41.
18. Пименов С.И., Ибрагимов Р.А., Изотов В.С. Влияние гидромеханохимической активации цементной суспензии на физико-механические свойства тяжелого бетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 11 (671). С. 16–21.

19. Сулименко Л.М., Кривобородов Ю.Р. Влияние механической активации сырья на процессы клинкерообразования и свойства цементов // Журнал прикладной химии. 2000. Т. 73. № 5. С. 714–717.

20. Плотников В.В., Кривобородов Ю.Р. Активация цемента путем гидравлического диспергирования // Цемент. 1989. № 1. С. 20–21.

21. Лермит Р. Проблемы технологии бетона / пер. с фр. под ред. А.Г. Десова. 2-е изд. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 296 с.

Поступила в редакцию в ноябре 2016 г.

Об авторах: Еленова Аурика Алмазовна — аспирант кафедры химической технологии композиционных и вяжущих материалов, **Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева)**, 125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, стр. 4, aurika-zolotko@mail.ru;

Кривобородов Юрий Романович — доктор технических наук, профессор кафедры химической технологии композиционных и вяжущих материалов, **Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева)**, 125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, стр. 4, ukriv@rambler.ru.

Для цитирования: Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Синтез расширяющей добавки для устранения усадки цементного камня // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 3 (102). С. 326–333. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.326-333

REFERENCES

1. Kuznetsova T.V. *Alyuminatnye i sul'foalyuminatnye tsementy* [Aluminate and Sulfoaluminate Cements]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 208 p. (In Russian)
2. Gridchina A.A., Titova L.A. Perspektivy primeneniya betonov na osnove rasshiryayushchikh dobavok v sovremenom monolitnom stroitel'stve [Prospects for Use of Concretes on the Basis of Expanding Additives in Modern Monolithic Construction]. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoy nauki* [Theoretical and Applied Aspects of Modern Science]. 2014, no. 21, pp. 17–19. (In Russian)
3. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. *Sostav i svoystva rasshiryayushchikhsya tsementov* [Composition and Properties of Expanding Cements]. Moscow, RKHTU im. D.I. Mendeleeva Publ., 2004, 54 p. (In Russian)
4. Kuznetsova T.V., Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Khimiya, sostav i svoystva spetsial'nykh tsementov [Chemistry, Composition and Properties of Special Cements]. *Khimiya, khimicheskaya tekhnologiya na rubezhe tysyacheletiya: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Tomsk, 03–04 oktyabrya 2000 g.)* [Chemistry, Chemical Technology at the Turn of the Millennium: Materials of Scientific and Practical Conference (Tomsk, 03–04 October 2000)]. Tomsk, 2000, no. 1, pp. 96–98. (In Russian)
5. Kuznetsova T.V., Krivoborodov Yu.R., Burlov I.Yu. Osnovnye napravleniya v khimii i tekhnologii spetsial'nykh tsementov [Basic Trends in Chemistry and Technology of Special Cements]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2008, no. 10, pp. 61–63. (In Russian)
6. Khlystov A.I., Konnova L.S., Shirokov V.A. et al. Rasshiryayushchiesya plasticheskiye kompozitsii obshchestroitel'nogo i spetsial'nogo naznacheniya [Expanding Plastic Compositions of General Construction and Special Purpose]. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review]. 2015, no. 23, pp. 22–26. (In Russian)
7. Kuznetsova T.V. Proizvodstvo i primeneniye sul'foalyuminatnykh tsementov [Production and Use of Sulfoaluminate Cements]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2010, no. 3, pp. 29–32. (In Russian)
8. Timashev V.V., Sycheva L.I., Nesterina E.M. Sintez i issledovanie kompleksnykh soley kal'tsiya [Synthesis and Study of Complex Salts of Calcium]. *Trudy vsesoyuznogo soveshchaniya po gidratatsii i tverdeniyu vyazhushchikh* [Proceedings of All-Union Conference on Hydration and Hardening of Binding Agents]. L'vov, 1981, pp. 49–52. (In Russian)
9. Kouznetsova T.V., Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V. et al. Special cements on base sulphoaluminate clinker. 13th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). Madrid. Spain. 2011, pp. 198.1–198.6.
10. Samchenko S.V., Zorin D.A., Borisenkova I.V. Vliyaniye dispersnosti glinozemistogo shlaka i sul'foalyuminatnogo klinkera na formirovaniye struktury tsementnogo kamnya [Impact of Dispersity of Aluminous Slag and Sulfoaluminate Clinker on Cement Stone Structure Formation]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov* [Technique and Technology of Silicates]. 2011, vol. 18, no. 2, pp. 12–14. (In Russian)
11. Voevodkin V.L. Patent No. 2447123 RU, MPK C09K 8/46, E21B 33/138. Tamponazhnyy material dlya tsementirovaniya skvazhin s bol'shim gazovym faktorom [Patent No. 2447123 RU, MPK C09K 8/46, E21B 33/138. Backfill Material for Cementing of Wells with a Large Gas Factor]. Patent holder LUKOYL PERM' LLC, no. 2011110400/03; appl. 18.03.2011, publ. 10.04.2012, bulletin no. 10. (In Russian)
12. Janotka I., Krajči L., Ray A., Mojumdar S.C. The hydration phase and pore structure formation in the blends of sulfoaluminatebelite cement with Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2003, 33 (4), pp. 489–497.
13. Winnefeld F., Lothenbach B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements experimental findings and thermodynamic modeling. *Cement and Concrete Research*. 2010, 40 (8), pp. 1239–1247.
14. Kurdovskiy V. Problemy, vyzvaemye ettringitom [Problems Caused by Ettringite]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its Application]. 2016, no. 4, pp. 30–33. (In Russian)
15. Samchenko S.V., Zorin D.A., Borisenkova I.V. Struktura i svoystva rasshiryayushchikhsya tsementov v zavisimosti ot dispersnosti glinozemistogo shlaka i sul'foalyuminatnogo klinkera [Structure and Properties of Expanding Cements Depending on Dispersity of Aluminous Slag and Sulfoaluminate Clinker]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2012, no. 11–12 (76–77), pp. 28–29. (In Russian)
16. Sulimenko L.M., Krivoborodov Yu.R., Plotnikov V.V. et al. Mekhanoaktivatsiya vyazhushchikh kompozitsiy na osnove tekhnogennykh produktov [Mechanical Activation of Binding Compositions on the basis of Technogenic Products]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1998, no. 10 (478), pp. 51–56. (In Russian)

17. Berdov G.I., Mashkin L.N. Issledovanie protsessa aktivatsii tsementa v gidrodinamicheskom dispergatore [Study of Cement Activation Process in a Hydrodynamic Disperser]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2007, no. 12, pp. 37–41. (In Russian)
18. Pimenov S.I., Ibragimov R.A., Izotov V.S. Vliyaniya gidromekhanokhimicheskoy aktivatsii tsementnoy suspenzii na fiziko-mekhanicheskie svoystva tyazhelogo betona [Influence of Hydromechanochemical Activation of Cement Suspension on Physical and Mechanical Properties of Heavy Concrete]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014, no. 11 (671), pp. 16–21. (In Russian)
19. Sulimenko L.M., Krivoborodov Yu.R. Vliyanie mekhanicheskoy aktivatsii syr'ya na protsessy klinkeroobrazovaniya i svoystva tsementov [Impact of Mechanical Activation of Raw Materials on Clinker Formation Processes and Properties of Cements]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry]. 2000, vol. 73, no. 5, pp. 714–717. (In Russian)
20. Plotnikov V.V., Krivoborodov Yu.R. Aktivatsiya tsementa putem gidrovolnovogo dispergirovaniya [Activation of Cement by Means of Mud Wave Dispersion]. *Tsement* [Cement]. 1989, no. 1, pp. 20–21. (In Russian)
21. Robert L'Hermite. Idées actuelle sur la technologie du béton. Documentation technique du bâtiment et des travaux publics, 1955. 242 p.

Received in November, 2016.

About the authors: **Elenova Aurika Almazovna** — post-graduate student, Department of Chemical Engineering of Composite and Cementing Agents, **Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia**, 20 bldg 4 Geroev Panfilovtsev str., Moscow, 125480, Russian Federation; aurika-zolotko@mail.ru;

Krivoborodov Yuriy Romanovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Engineering of Composite and Cementing Agents, **Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia**, 20 bldg 4 Geroev Panfilovtsev str., Moscow, 125480, Russian Federation; ykriv@rambler.ru.

For citation: *Elenova A.A., Krivoborodov Yu.R. Sintez rasshiryayushchey dobavki dlya ustraneniya usadki tsementnogo kamnya* [Synthesis of Expander to Prevent Contraction of Cement Stone]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 3 (102), pp. 326–333. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.326-333