

Кирсанова А. А., Крамар Л. Я., Рузавин А. А.

## ВЫСОКОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЯЖЕЛЫЕ БЕТОНЫ НОРМАЛЬНОГО ТВЕРДЕНИЯ

Исследована возможность получения высокофункциональных тяжелых бетонов на шлакопортландцементных и портландцементных нормального твердения. Поскольку высокофункциональные тяжелые бетоны обладают повышенными качественными характеристиками, область применения такого материала довольно обширна. Высокофункциональные бетоны, наиболее востребованные в качестве конструкционного материала для зданий и сооружений с повышенными требованиями к эксплуатации, для устройства остова здания или ствола жесткости, перекрытий большепролетных зданий, туннелей, мостов, для устройства дорожных покрытий и т.д. При этом использование таких бетонов в строительстве ограничено вследствие высоких технологических требований, которые трудно соблюдать при бетонировании в полевых условиях. Поэтому приоритетным направлением на сегодняшний день является обеспечение неизменно высоких параметров качества бетона и стойкости его к воздействию любого вида агрессивных сред при одновременном облегчении технологии его изготовления и снижении материальных затрат. Добиться такого результата возможно за счет применения комплексных добавок-модификаторов.

В исследовании рассмотрена комплексная добавка, включающая метакаолин, микрокремнезем и суперпластификатор. Рассмотренная в исследовании комплексная добавка позволяет направленно изменять фазообразование цементного камня и получать микроструктуру бетона, преимущественно из низкоосновных гидросиликатов кальция и стабильных гидроалюминатов кальция. Применение комплексной добавки-ускорителя, включающей суперпластификатор, на разных типах цемента повышает устойчивость бетона к циклическому замораживанию-оттаиванию, поскольку приводит к некоторому снижению количества «свободной воды», которая находясь в поровом пространстве бетона при переходе в лед, создает внутреннее давление. Кроме этого применение комплексной добавки ускоряет твердение бетона, снижает открытую пористость и способствует формированию микроструктуры бетона преимущественно из стабильных гидратных новообразований, не подвергающихся перекристаллизации при циклических изменениях среды. Доказана эффективность применения комплексной добавки, включающей метакаолин, как ускорителя твердения цементного камня и бетона, твердеющего в нормальных условиях.

**Ключевые слова:** высокофункциональный бетон, шлакопортландцемент, добавки-ускорители, метакаолин, морозостойкость.

## HIGH-FUNCTIONAL HEAVY CONCRETE NORMAL SOLIDS

*The possibility of obtaining highly functional heavy concretes on shlakoportlandtsementy and portland cement of normal hardening has been studied. Since high-performance heavy-weight concretes have improved quality characteristics, the scope of such material is quite extensive. Highly functional concrete, the most demanded as a structural material for buildings and structures with increased requirements for operation, for the construction of a building or stiffened borehole, overlapping of large span buildings, tunnels, bridges, road pavement, etc. At the same time, the use of such concretes in construction is limited due to high technological requirements, which are difficult to observe when concreting in the field. Therefore, the priority for today is to ensure consistently high quality parameters of concrete and its resistance to the impact of any type of corrosive media while simplifying the technology of its production and reducing material costs. To achieve such a result is possible due to the use of complex additives-modifiers.*

*A complex additive including metakaolin, microsilica and superplasticizer is considered. The complex additive considered in the study makes it possible to change the phase formation of the cement stone and obtain a microstructure of the concrete, mainly from low-basic calcium hydrosilicates and stable calcium hydroaluminates. The use of a complex additive accelerator including a superplasticizer on different types of cement increases the resistance of the concrete to cyclic freezing-thawing, since it leads to a certain decrease in the amount of "free water", which, in the pore space of the concrete upon transition to ice, creates internal pressure. In addition, the use of a complex additive accelerates the hardening of concrete, reduces the open porosity and promotes the formation of the microstructure of the concrete, mainly from stable hydrated neoplasms that do not undergo recrystallization under cyclic changes in the medium. The effectiveness of using a complex additive, including metakaolin, as an accelerator for hardening cement stone and concrete, hardening under normal conditions, is proved.*

**Keywords:** high performance concrete, shlakoportlandtsementy, accelerators additives, metakaolin, frost resistance.

В современном строительстве одним из наиболее востребованных материалов являются высокофункциональные тяжелые бетоны. Согласно ГОСТ 25192-2012 высокофункциональными называют бетоны, соответствующие специальным требованиям к функциональности, которые не могут быть достигнуты путем использования традиционных компонентов, методов смешивания, укладки, ухода и твердения [1]. Такие бетоны должны обладать определенными показателями качества, такими как высокая подвижность смеси (ПЗ-П4) при водоцементном отношении (В/Ц) не выше 0,4, прочностью класса В50 и более, быстрым набором прочности, водонепроницаемостью не ниже W12, коррозионной стойкостью, долговечностью и т.д. [2-5].

Для нашего региона так же важным показателем качества бетона, эксплуатируемого при атмосферных воздействиях, явля-

ется его морозостойкость. Морозостойкостью называется способность насыщенного водой или растворами солей цементного камня в бетоне, сохранять сплошность и релаксировать давление, возникающее в его поровой структуре в результате циклических фазовых переходов воды при замораживании [6-8]. Для повышения морозостойкости бетона необходимо снизить открытую пористость и формировать фазовый состав с наличием низкоосновных, гелевидных или слабозакристаллизованных гидратных фаз, которые будут способны релаксировать возникающие напряжения.

Поскольку высокофункциональные тяжелые бетоны обладают повышенными качественными характеристиками, область применения такого материала довольно обширна. Высокофункциональные бетоны, наиболее востребованные в качестве конструкционного материала для зданий и сооружений

с повышенными требованиями к эксплуатации, для устройства остова здания или ствола жесткости, перекрытий большепролетных зданий, туннелей, мостов, для устройства дорожных покрытий и т.д. [6-9].

Использование таких бетонов в строительстве ограничено за счет высоких технологических требований, которые трудно соблюдать при бетонировании в полевых условиях. Поэтому приоритетным направлением на сегодняшний день является обеспечение неизменно высоких параметров прочности и непроницаемости бетона, стойкости его к воздействию любого вида агрессивных сред при одновременном максимальном облегчении технологии его изготовления.

Одним из наиболее эффективных путей производства таких бетонов, является тщательный подбор состава и применение комплексных добавок, включающих суперпластификатор и добавки-модификаторы [10-13].

**Цель работы:** оценка влияния комплексной добавки на повышение прочности и морозостойкости бетонов, твердеющих в нормальных условиях.

**Задачи:** исследовать влияние комплексной добавки, включающей метакаолин, на прочность и морозостойкость бетона на разных видах цемента.

**Материалы:** комплексная добавка для бетона включала 3,5 масс.% метакаолина (МН) производства ЗАО «Пласт-Рифей» ТУ 5729-095-51460677-2009, 5% микрокремнезема (МК-85) (г. Новокузнецк) ТУ 5743-048-02495332-96 и 1% суперпластификатора (СП-1), производства ОАО «Полипласт» г. Новомосковск согласно ТУ 5870-005-58042865-05. Вяжущее – портландцемент (ПЦ) класса ЦЕМ I 42,5Н производства Невьянский цементник, шлакопортландцемент (ШПЦ) класса ЦЕМ III/A 32,5Н ГОСТ 31108-2016, ОАО «Магнитогорский цементно-огнеупорный завод», кварцевый песок месторождения Хлебороб (Мк 2,4), ГОСТ 8736-2014, щебень гранодиоритный Новосмолинского карьера, ГОСТ 8267-93. Для проведения испытаний на тяжелом бетоне готовили образцы-кубы с ребром 10 см, твердеющие в нормальных условиях (НУ) при температуре  $20 \pm 50^{\circ}\text{C}$  и влажности  $95 \pm 5\%$  в соответствии с требованиями ГОСТ 24211-2008, ГОСТ 10060.0-2012. Прочность оценивали по ГОСТ 10180-2012, морозостойкость по ГОСТ 10060.2-2012 третьим ускоренным методом.

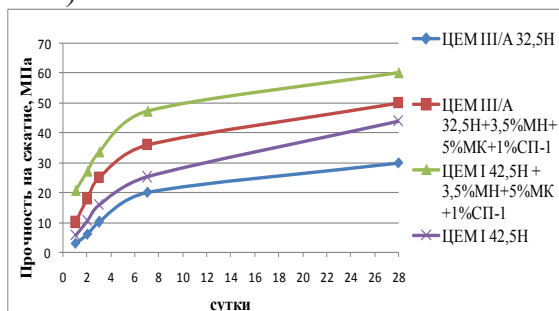
#### Результаты исследования

Особенности роста прочностных харак-

теристик бетона на разных типах цемента, модифицированного комплексной добавкой до 28 суток твердения в нормальных условиях представлены на рис.1. Из зависимостей (рис.1,а) видно, что применение комплексной добавки для ЦЕМ III/A 32,5Н на 2 суток обеспечивает прирост прочности на сжатие до 67% от марочной прочности контрольного состава. На изгиб прочность модифицированного бетона на 2 суток составляет около 50% от марочной прочности контрольного состава. К 7 суткам прочность бетона на сжатие (рис.1,а) с применением комплексной добавки выше марочной прочности контрольного состава на 17%, на изгиб выше на 7% (рис.1,б). На 28 сутки прочность модифицированного бетона выше на 67% на сжатие и на 50% на изгиб по сравнению с контрольным бездобавочным составом.

Применение комплексной добавки для портландских цементах также позволило повысить прочность бетона на сжатие на 2 суток в два раза, в 28 суток на 75%, на изгиб на 2 суток в два раза, в 28 на 63% по сравнению с контрольным бездобавочным составом (рис.1).

А)



Б)

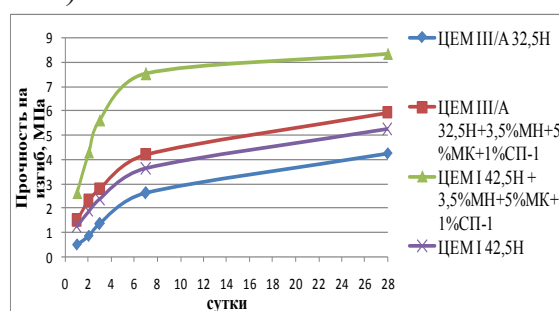


Рис.1. Характер набора прочности бетона: а) на сжатие; б) на изгиб

Формирование гидратных новообразований и оценку фазового состава проводили с помощью дериватографического и рентгенофазового анализа. Согласно дериватографическому анализу, применение комплексной добавки на цементе класса ЦЕМ I 42,5Н на

28 суток твердения приводит к формированию структуры цементного камня с пониженным содержанием химически связанной воды, что говорит о кристаллизации низкоосновных гидратных фаз (рис.2), что также подтверждается рентгенофазовым анализом (рис.3).

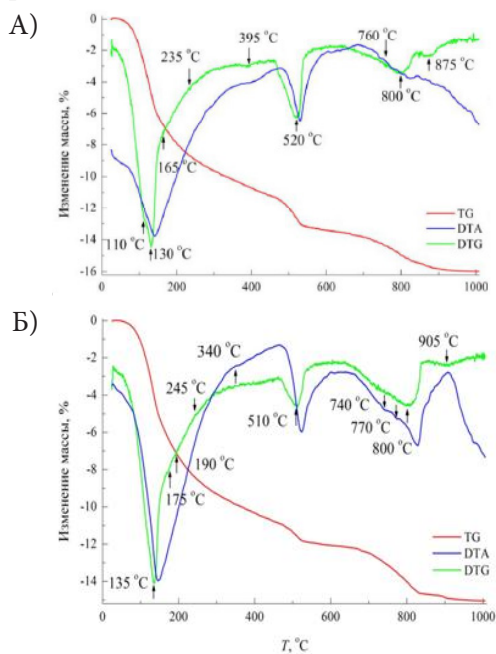


Рис.2. Дериватографический анализ цементного камня на ПЦ в 28 сутки твердения: а) контрольный состав; б) модифицированный состав

При введении комплексной добавки, фазовый состав цементного камня представлен в основном низкоосновными гидросликатами кальция (ГСК) типа С-S-H(I) (эндозффект при 740°C и экзоэффекты при 800-900°C,  $d/n=3,07;2,81;1,83\text{Å}$ ) и стабильными гидроалюминатами кальция – кубической  $C_3AH_6$  (эндозффект при 490°C,  $d/n=5,01;4,4;3,37;2,82;2,23;2,07;1,68\text{Å}$ ) и гексагональной  $CAH_{10}$  сингонии (потери при 175°C; 190°C и экзоэффект при 910°C,  $d/n=7,16;3,72;3,56;3,27;2,88;2,69;2,55;1,94;1,64\text{Å}$ ), а также гидрогранатами, типа  $C_2ASH_4$  (эндозффект при 490°C,  $d/n=2,8;2,72\text{Å}$ ), которые в дальнейшем, с изменением щелочности среды, не подвергаются процессам перекристаллизации и способствуют повышению прочности камня.

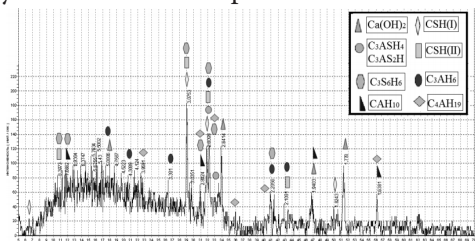


Рис.3. Рентгенограмма модифицированного цементного камня на ПЦ, в 28 сутки твердения

Кроме этого, модифицированный цементный камень включает высокоосновные ГСК, типа С-S-H (II) фазы (эндозффекты при 110-135° и 740-770°C,  $d/n=9,8;3,07; 2,8;2,0;1,83\text{Å}$ ),  $Ca(OH)_2$  (эндозффект при 520,510°C,  $d/n=4,9;2,63; 1,93;1,79;1,69;1,49\text{Å}$ ) и метастабильные гидроалюминатные фазы, представленные в основном гексагональными гидроалюминатами кальция, типа  $C_4AH_{19}$  (эндозффект при 175°C,  $d/n=3,94;2,78;2,46;2,21\text{Å}$ ).

Применение комплексной добавки на цементе класса ЦЕМ III/A 32,5Н на 28 сутки твердения приводит к формированию гидратных фаз цементного камня с несколько повышенным содержанием химически связанной воды (рис.4).

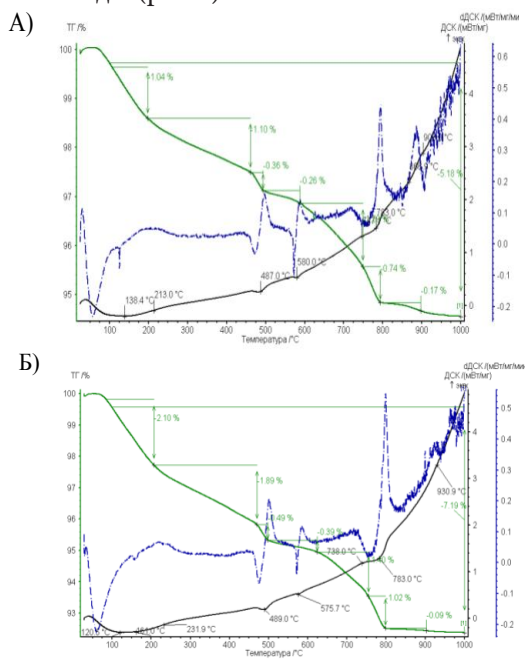


Рис.4. Дериватографический анализ цементного камня на ШПЦ в 28 сутки твердения: а) контрольный состав, без комплексной добавки; б) модифицированный состав

При введении комплексной добавки, фазовый состав цементного камня представлен в основном высокоосновными ГСК, типа С-S-H (II) фазы (эндозффекты при 135-160° и 740-770°C,  $d/n=9,8;3,07; 2,8;2,0;1,83\text{Å}$ ),  $Ca(OH)_2$  (эндозффект при 480-489°C,  $d/n=4,9;2,63; 1,93;1,79;1,69;1,49\text{Å}$ ), низкоосновными ГСК типа С-S-H(I) (эндозффект при 738°C и экзоэффект при 930°C,  $d/n=3,07;2,81;1,83\text{Å}$ ), метастабильными гидроалюминатами кальция, типа  $C_4AH_{19}$  (эндозффект при 120, 162, 232°C,  $d/n=3,94;2,78;2,46;2,21\text{Å}$ ) стабильными гидроалюминатами кальция –  $C_3AH_6$  (эндозффект при 489°C,  $d/n=5,01;4,4;3,37;2,82;2,23;2,07;1,68\text{Å}$ ) и  $CAH_{10}$  (потери при 161°C; 232°C и экзоэффект при 910°C,  $d/n=7,16;3,72;3,56;3,27;$

2,88;2,69;2,55;1,94;1,64 Å), а также гидрографатами, типа  $C_3ASH_4$  (эндоеффект при  $489^\circ C$ ,  $d/n=2,8;2,72\text{Å}$ ) (рис.5).

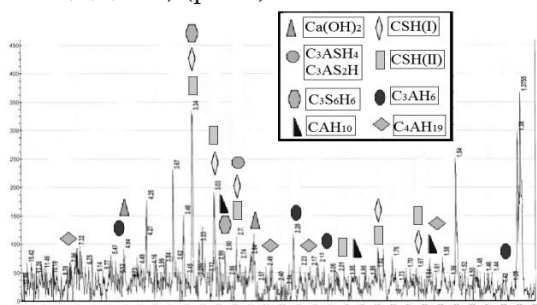


Рис.5. Рентгенограмма модифицированного цементного камня на ШПЦ, в 28 сутки твердения

Влияние комплексной добавки на морозостойкость бетонов, твердеющих в НУ, представлено на рис.6. Введение комплексной добавки в ПЦ позволяет получать бетон с маркой по морозостойкости  $F_11000$ , тогда как без применения комплекса бетон имел марку  $F_1300$ . На модифицированном ЦЕМ III/A 32,5Н бетон имеет марку по морозостойкости  $F_1600$ , что в три раза выше контрольного состава [6-8,13].

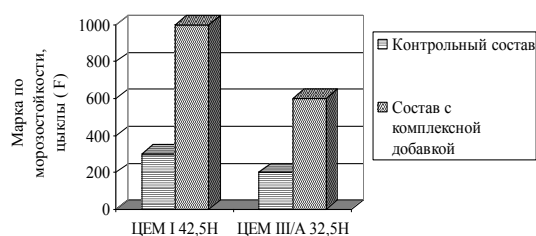


Рис.6. Морозостойкость бетона

Применение комплексной добавки, включающей суперпластификатор, на разных типах цемента приводит к некоторому снижению воды затворения и соответственно уменьшению количества «свободной воды», которая находится в поровом пространстве бетона и при переходе в лед, способна создавать внутреннее давление. Кроме этого применение комплексной добавки ускоряет твердение бетона, снижает открытую пористость и способствует формированию микроструктуры бетона преимущественно из стабильных гидратных новообразований, не подвергающихся перекристаллизации при циклических изменений среды.

### Выводы

Применение комплексной добавки, включающей 3,5 масс.% МН, 5% МК и 1% СП-1 на ПЦ и ШПЦ обеспечивает прирост прочности бетона как на сжатие так и на изгиб. Однако применение комплексной добавки для получения быстротвердеющих в НУ бетонов возможно только на ПЦ.

Комплексная добавка позволяет направленно изменять фазообразование и получать микроструктуру бетона, преимущественно из низкоосновных ГСК и стабильных гидроалюминатов кальция.

Применение комплексной добавки позволяет получить на ШПЦ бетоны классов В30... В35, с морозостойкостью до  $F_1600$  без дополнительной тепловой обработки. Введение добавки в ПЦ, позволяет получить высокофункциональные тяжелые бетоны классов В45... В50 с маркой по морозостойкости  $F_11000$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 12 с.
- Умемура И., Сату М., Коизуми К., Цуюки Н. Влияние микрокремнезема и суперпластификатора на гидратацию цемента при низком водоцементном отношении. Цемент и его применение. № 4, 2013. – С.134-138.
- Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения // Бетон и железобетон. №1(6), 2012. – С. 82-89.
- Рагинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Рагинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. –187 с.
- Schmidt M. Jahre Entwicklung bei Zement, Zusatzmittel und Beton. Ceitzum Baustoffe und Materialprüfung. Schriftenreihe Baustoffe. // Fest-schrift zum 60. Geburgstag von Prof. Dr.-Jng. Peter Schiesse. Heft 2. 2003. – s. 189-198.
- Бабушкин В.И. Защита строительных конструкций от коррозии, старения и износа / В.И. Бабушкин. – Харьков: Изд-во Высшая школа при Харьковском университете, 1989. – 168 с.
- Москвин В. М., Подвальный А. М, Садыков М. С. Разрушение бетона, замораживаемого в растворах солей. / Коррозия бетона в агрессивных средах. – М. : Стройиздат,1971. – С.87-97.
- Трофимов, Б.Я. Механизм «старения» гидратных фаз цементного камня при циклическом замораживании / Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Популярное бетоноведение. – № 3 (29), 2009. – С. 69-83.

9. Kim Hong – Sam, Lee, Sang-Ho, Moon Han – Young Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. // Construction and Building Materials Journal. 2007. – №1. P. 128.
10. Сватовская Л.Б., Сычев М.М. Активированное твердение цементов. – Л.: Стройиздат, 1983. – 160 с.
11. Крамар Л.Я. Модификаторы цементных бетонов и растворов (Технические характеристики и механизм действия) / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Е.А. Гамалий, Т.Н. Черных, В.В. Зимич. – Челябинск: ООО «Искра-Профи», 2012. – 202 с.
12. Heikal M. Effect of Calcium formate as an accelerator on the physiochemical and mechanical properties of pozzolanic cement pastes/ // Cement and Concrete Research. 2004. – №34.P.1051–1056.
13. Трофимов Б.Я. Регулирование морозостойкости бетона на шлакопортландцементе. //Популярное бетоноведение, 2009. – №5. –С. 34-48.

## REFERENCES

1. GOST 25192-2012. Betony. Klassifikaciya i obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Concretes. Classification and general technical requirements] / Publishing house of standards, 2003. - 12 p.
2. Umemura, I., Satu, M., Koizumi, K., Cuyuki, N. Vliyanie mikroremnezema i superplastifikatora na gidratatsiyu cementa pri nizkom vodocementnom otnoshenii. Cement i ego primenenie [Effect of microsilica and superplasticizer on cement hydration at low water-cement ratio. Cement and its application] /№ 4, 2013. – P.134-138.
3. Kalashnikov, V.I. Kak prevratit' betony starogo pokoleniya v vysokoehffektivnyye betony novogo pokoleniya [How to turn old-fashioned concrete into high-performance concrete of a new generation] // Concrete and reinforced concrete. No. 1 (6), 2012. - P. 82-89.
4. Ratinov, V.B. Dobavki v beton [Additives in concrete] / M: Stroizdat, 1989. -187 p.
5. Schmidt M. Jahre Entwicklung bei Zement, Zusatzmittel und Beton. Ceitzum Baustoffe und Materialprüfung. Schriftenreihe Baustoffe. // Fest-schrift zum 60. Geburgstag von Prof. Dr.-Jng. Peter Schiesse. Heft 2. 2003. – p. 189-198.
6. Babushkin V.I. Zashchita stroitel'nyh konstrukcij ot korrozii, stareniya i iznosa [Protection of building structures against corrosion, aging and wear] / Kharkov: Publishing house Higher school at the Kharkov university, 1989. - 168 p.
7. Moskvina V. M., Podval'nyj A. M., Sadykov M. S. Razrushenie betona, zamorazhivaemogo v rastvorah solej. / Korroziya betona v agressivnyh sredah [Destruction of concrete, which is frozen in salt solutions. Corrosion of concrete in corrosive environments] / M.: Stroizdat, 1971. - P.87-97.
8. Trofimov, B.YA. Mekhanizm «stareniya» gidratnyh faz cementnogo kamnya pri ciklicheskom zamorazhivanii [Mechanism of «aging» of hydrated phases of cement stone during cyclic freezing] / Popular concrete science. - № 3 (29), 2009. - P. 69-83.
9. Kim Hong – Sam, Lee, Sang-Ho, Moon Han – Young Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. // Construction and Building Materials Journal. 2007. – №1. P. 128.
10. Svatovskaya L.B., Sychev M.M. Aktivirovannoe tverdenie cementov [Activated curing of cements] / L.: Stroizdat, 1983. -160 p.
11. Kramar L.YA. Modifikatory cementnyh betonov i rastvorov (Tekhnicheskie harakteristiki i mekhanizm dejstviya) [Modifiers of cement concretes and mortars (Technical characteristics and mechanism of action) ] / Chelyabinsk: Iskra-Profi LLC, 2012. - 202 p.
12. Heikal M. Effect of Calcium formate as an accelerator on the physiochemical and mechanical properties of pozzolanic cement pastes/ // Cement and Concrete Research. 2004. – №34.P.1051–1056.
13. Trofimov B.YA. Regulirovanie morozostojkosti betona na shlakoportlandcemente [Regulation of frost resistance of concrete on slag Portland cement] / Popular Concrete Studies, 2009. - №5. -FROM. 34-48.

**Кирсанова А. А.,**

кандидат технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск. E-mail: kiss421@mail.ru

---

**Крамар Л. Я.,**

доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск. E-mail: kramar-l@mail.ru

---

**Рузавин А.А.,**

аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г.Челябинск. E-mail: rag89@rambler.ru

---

**Kirsanova A.A.,**

PhD in construction, docent, South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: kiss421@mail.ru

---

**Kramar L. Ya.,**

doctor of science (construction), professor, South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: kramar-l@mail.ru

---

**Ruzavin A.A.,**

postgraduate, South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: rag89@rambler.ru

---

*Поступила в редакцию 31.07.2017*