

БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЙ, ВЫСОКОПРОЧНЫЙ И МОРОЗОСТОЙКИЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Л.Я. Крамар, И.М. Иванов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Известно, что бетоны на шлакопортландцементе (ШПЦ) отличаются высокими экологическими и экономическими показателями, а также повышенной долговечностью почти во всех средах эксплуатации. Но многими исследователями и технологами, как и положениями стандартов, утверждается, что на ШПЦ невозможно получать быстротвердеющие и высокопрочные бетоны, а также бетоны с высокой морозостойкостью. В настоящей работе предложены комплексные меры, направленные на эффективное повышение всех этих характеристик. Результаты испытаний доказывают, что при низком водоцементном отношении шлакопортландцемент, содержащий молотый гранулированный доменный шлак и минеральные добавки, способен быстро твердеть в нормальных условиях, набирать высокую прочность и формировать структуру цементного камня бетона с низкой открытой пористостью, которая обеспечивает высокую морозостойкость. В результате разработан быстротвердеющий бетон класса по прочности на сжатие B55 с маркой по морозостойкости F2 400 (F1 1000). Оценены и другие характеристики бетона: класс по прочности на осевое растяжение – Bt 3,6, на растяжение при изгибе – Btb 6,4; марка по истираемости – G1 и марка по водонепроницаемости – W16.

Ключевые слова: шлакопортландцемент, молотый гранулированный доменный шлак, портландцемент, активация шлака, скорость твердения, прочность, морозостойкость, долговечность, высокофункциональный бетон.

Введение

Современная строительная индустрия направлена на ускорение темпа производства, получение качественных и долговечных материалов при пониженных затратах. При этом остро стоят вопросы утилизации побочных продуктов различных производств и снижения выбросов вредных веществ в атмосферу. Применение шлакопортландцемента (ШПЦ) при производстве бетонов актуально, поскольку позволяет комплексно решать экологические проблемы [1, 2], снижать затраты на производство [3] и обеспечивать повышенную долговечность бетонов в неагрессивных средах, при карбонизации, воздействии хлоридов, сульфатов и др. химически агрессивных веществ [4–6]. Кроме того, бетоны на ШПЦ не склонны к выщелачиванию, высолообразованию и возникновению внутренней коррозии из-за реакции щелочей с кремнезёмом заполнителей, что обусловлено формированием их структуры цементного камня с низким содержанием свободного гидроксида кальция [7].

Однако в области исследований бетонов на основе шлакопортландцемента чётко обозначаются две основные проблемы: низкая скорость твердения в нормальных условиях [8] и пониженная морозостойкость [9, 10]. Известно, что бетоны на ШПЦ твердеют наиболее эффективно при высокотемпературной тепловлажностной обработке, но это не обеспечивает высокую прочность и морозостойкость [11]. Об этом свидетельствует и ГОСТ 31384-2017 (см. табл. Д.3), который не допускает применение ШПЦ для бетонов, предназначенных для эксплуатации в средах с индексом XF2, XF3 и XF4. Решение этих проблем может открыть воз-

можность применения ШПЦ для производства долговечных бетонов с высокими экономическими и экологическими показателями.

Ещё в 70-х годах прошлого века были получены быстротвердеющие шлакопортландцементы [12–14], но эффективность таких цемента оказалась ниже, чем эффективность портландцементов, поэтому эти разработки не нашли широкого применения. Современные исследования показывают, что многие добавки-ускорители, такие как нитрат кальция, формиат кальция, органическая щелочь триэтаноламин и кристаллическая затравка CSH, обычно эффективные для портландцементов, не вызывают значительного увеличения прочности бетонов на ШПЦ, особенно в ранние сроки твердения [15]. Самым эффективным способом ускорения твердения ШПЦ остаётся тепловая обработка, причём при повышенных температурах – 80...95 °C [8]. На основе ШПЦ ранее получали бетоны с морозостойкостью до F₂ 300, применяя воздухововлекающие добавки и высокотемпературную тепловую обработку [16], но бетоны на ШПЦ нормального твердения (без тепловой обработки) всегда имели низкую морозостойкость. Следовательно, возможность получения эффективного быстротвердеющего, высокопрочного и морозостойкого бетона на основе шлакопортландцемента до настоящего времени не доказана.

Цель настоящей работы – доказать пригодность применения шлакопортландцемента для получения бетонов нормального твердения с высокими показателями по скорости твердения, прочности, морозостойкости и другим эксплуатационным характеристикам.

Для эффективного повышения функциональных свойств бетона на ШПЦ предложено:

– молотый гранулированный доменный шлак отдельно от цементного клинкера до высокой удельной поверхности (500...520 м²/кг) с введением при его помоле минеральных добавок-активаторов;

– в бетонной смеси предельно сократить водоцементное отношение с целью увеличения прочности, скорости её набора, снижения открытой пористости и, как следствие, повышения водонепроницаемости и морозостойкости бетона.

Материалы и методы испытаний

В данной работе шлакопортландцемент получали в бетонной смеси, раздельно дозируя портландцемент и молотый гранулированный доменный шлак с добавками-активаторами в количестве 40 и 60 % соответственно. Применяли портландцемент, соответствующий ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 31108-2016), производитель – ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент». Молотый гранулированный доменный шлак имел удельную поверхность 500...520 м²/кг и полностью соответствовал ТУ 38.32.22-012-99126491-2017 и EN 15167-1:2006, производитель – ООО «Мечел-Материалы».

В качестве суперпластификатора применяли MasterPolyheed 3045, производитель – ООО «BASF Строительные системы».

Крупным заполнителем для бетона принят гранодиоритовый щебень фракции 3-10, марки по дробности 1200, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8267-93. Мелким заполнителем служил кварцевый песок с модулем крупности 2,73, соответствующий условиям ГОСТ 8736-2014, месторождение песка – Хлебороб.

Все испытания бетона проведены на образцах размером 10 × 10 × 10 см. Прочность бетона определяли в соответствии с ГОСТ 10180-2012, а его класс по прочности устанавливали с учётом требований ГОСТ 18105-2018 и ГОСТ 31914-2012. Испытание бетона на водопоглощение проводили по ГОСТ 12730.3-78. Морозостойкость разработанного бетона определяли и устанавливали в соответствии с ГОСТ 10060-2012 по третьему методу.

Результаты и их обсуждение

На основе шлакопортландцемента разработан состав бетона с расходом цемента (ШПЦ) 530 кг/м³ и В/Ц = 0,27. Марка по подвижности разработанной бетонной смеси – П2 с сохраняемостью в течение 70 минут. Воздухововлечение в бетонной смеси составило 0,8 %. Из полученной бетонной смеси изготавливали образцы, которые твердели в нормальных условиях ($t = 20 \pm 2$ °С, $\phi = 95 \pm 5$ %) и далее подвергались испытаниям.

Для получения зависимости предела прочности бетона на сжатие от продолжительности нормального твердения (рис. 1) испытано по 4 образца-кубика на 1, 2, 3, 7, 14, 21 и 28 суток. Средний внутрисерийный коэффициент вариации прочности в различные сроки испытания не превысил 2,8 %. В производственных условиях получить такой коэффициент вариации прочности очень затруднительно, поэтому принят стандартный коэффициент вариации 13,5 %, с учётом которого на рис. 1 справа нанесены пороговые отметки классов бетона по прочности на сжатие.

Нормальное твердение бетона в течение 28 суток обеспечивает ему среднюю прочность на сжатие 73,4 МПа. Согласно ГОСТ 18105-2018 и ГОСТ 31914-2012 установлено, что в производст-

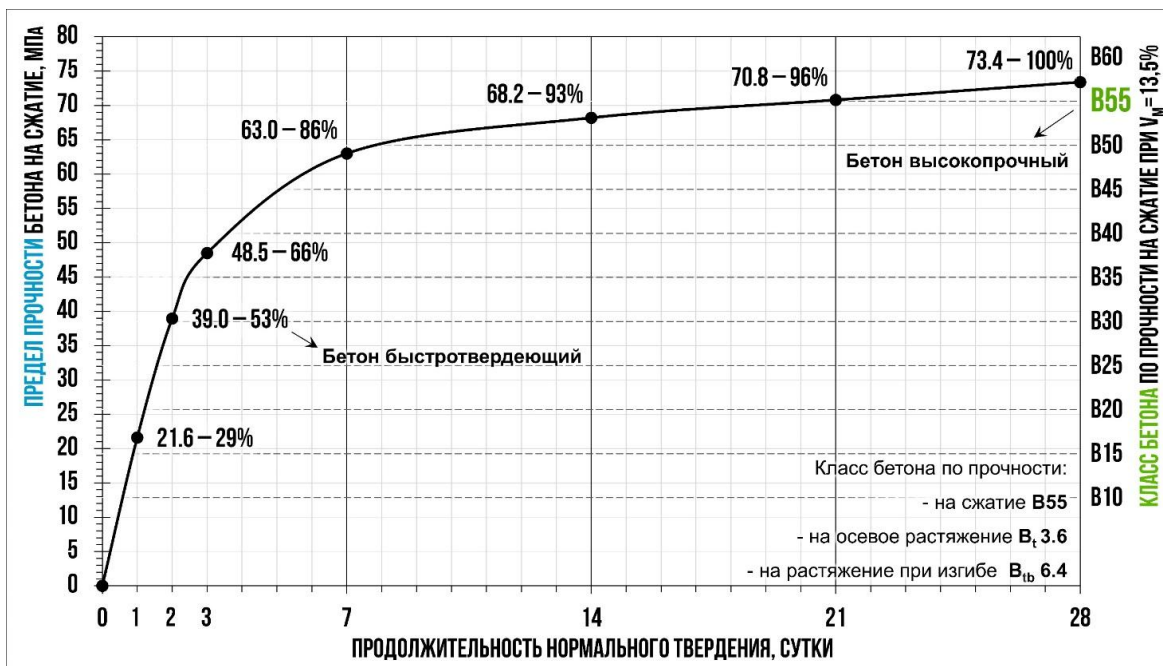


Рис. 1. Результаты испытания бетона на прочность и их анализ

Строительные материалы и изделия

венных условиях разработанный бетон может применяться как бетон с классом по прочности на сжатие В55 (см. рис. 1). На 2-е сутки бетон обладает прочностью 39,0 МПа, что составляет 53 % от 28-суточной прочности. По классификации бетонов из ГОСТ 25192-2012 полученный бетон является быстротвердеющим ($R_2/R_{28} > 0,4$) и высокопрочным ($\geq B55$).

Так как полученный бетон является высокопрочным, можно считать, что его стойкость к истиранию соответствует марке G1 в соответствии с зависимостями, полученными в других исследованиях [17]. Прочность бетона на осевое растяжение (5,1 МПа) и растяжение при изгибе (8,8 МПа) вычислены с помощью коэффициентов перехода от прочности на сжатие (73,4 МПа) к указанным видам напряжённого состояния. Коэффициенты перехода приведены в таблице Л.1 ГОСТ 10180-2012. Учитывая коэффициент требуемой прочности (1,305 при $V_m=13,5\%$) и градации классов бетонов по прочности из ГОСТ 26633-2015, мы определили класс бетона по прочности на осевое растяжение – $V_1 3,6$ и на растяжение при изгибе – $V_{ib} 6,4$.

Водопоглощение по массе полученного бетона в возрасте 28 суток составило 2,6 %. Известно, что бетоны, изготовленные из бетонной смеси с $V/C \leq 0,3$ и имеющие $W_m \leq 3,0\%$, как правило обладают особо низкими показателями проницаемости и, как следствие, маркой по водонепроницаемости от W16 до W20 (ГОСТ 31384-2017, см. табл. Д.2). Таким образом можно установить, что бетон имеет марку по водонепроницаемости W16.

Далее выполнен анализ результатов испытания бетона на морозостойкость. Средние значения изменений массы и прочности образцов в зависимости от числа циклов замораживания-оттаивания

представлены на рис. 2. Значения этих характеристик, полученные до замораживания, соответствуют нулю циклов и относятся к контрольным образцам, а все остальные значения, полученные после различного числа циклов, относятся к основным образцам (см. рис. 2).

До 37 циклов включительно бетон практически не теряет массу и прочность. Финальное испытание после 80 циклов показало сброс прочности в среднем на 5 %, а нижняя граница доверительного интервала прочности основных образцов опустилась ниже критерия морозостойкости по прочности (см. рис. 2). Среднее значение потерь массы образцов после 80 циклов не превысило 2 %, однако наблюдалось существенное шелушение поверхности образцов, что вызвало необходимость завершить испытание.

Испытание бетона после 55 циклов выявило, что нижняя граница доверительного интервала прочности основных образцов превышает 90 % от нижней границы доверительного интервала прочности контрольных образцов. То есть результаты испытания бетона после 55 циклов удовлетворяют критерию морозостойкости по прочности. Снижение массы составило лишь 0,16 %, а шелушения поверхности образцов не отмечено. Следовательно, марка бетона по морозостойкости соответствует $F_2 400$ и $F_1 1000$. По классификации ГОСТ 25192-2012 полученный бетон можно отнести к бетонам высокой морозостойкости.

Заключение

Выявлено, что применение комплексных мер, включающих повышение тонкости помола гранулированного доменного шлака до 500...520 m^2/kg , введение при его помоле минеральных добавок

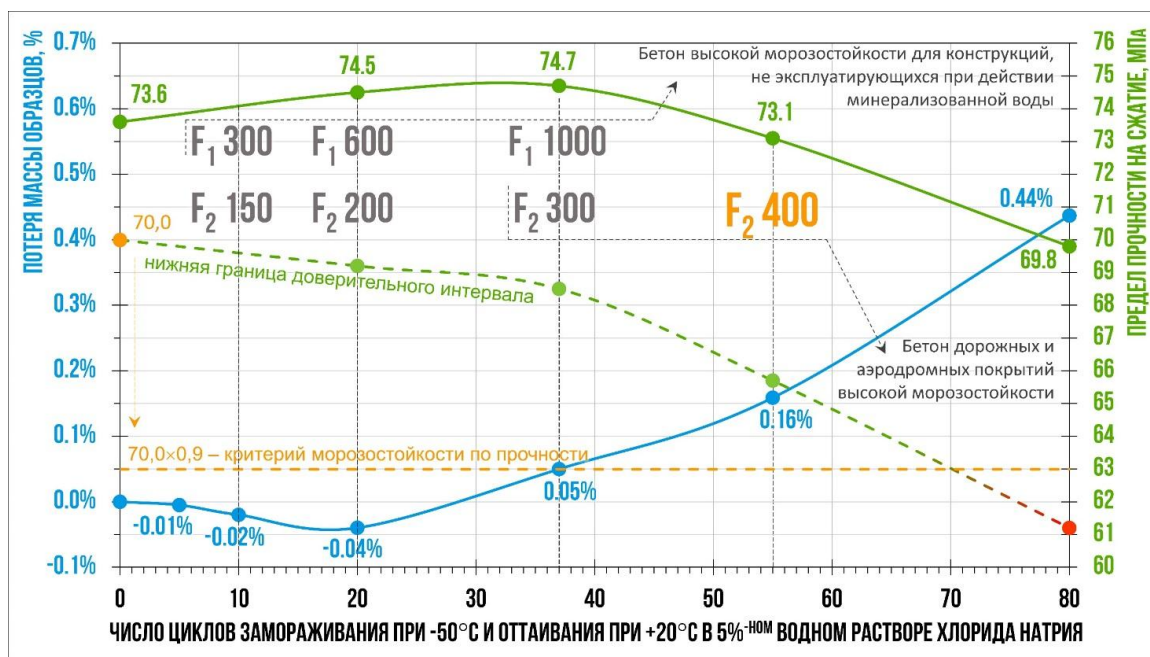


Рис. 2. Результаты испытания бетона на морозостойкость и их анализ

активаторов и обеспечение в бетонной смеси стеснённых условий эффективным суперпластификатором позволяет получать на основе шлакопортландцемента быстротвердеющий, высокопрочный и морозостойкий бетон с высокой водонепроницаемостью и низкой истираемостью.

Разработана бетонная смесь с водоцементным отношением 0,27 и расходом цемента 530 кг/м³, содержащим 60 % молотого гранулированного доменного шлака с минеральными добавками. Эта бетонная смесь сохраняет марку по подвижности П2 в течение 70 минут, а полученный из неё бетон соответствует:

- классу по прочности на сжатие – В55;
- классу по прочности на растяжение при изгибе – В_{из} 6,4;
- классу по прочности на осевое растяжение – В_т 3,6;
- марке по истираемости – G1;
- марке по водонепроницаемости – W16;
- марке по морозостойкости – F₂ 400 или F₁ 1000.

Литература

1. Saranya, P. Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review / P. Saranya, P. Nagarajan, A.P. Shashikala // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 330, № 1. – P. 012057, 1–5.
2. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М.И. Панфилов, Я.Ш. Школьник, Н.В. Орининский и др. – М.: Металлургия, 1987. – 238 с.
3. Ozbay, E. Utilization and Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties – A Review / E. Ozbay, M. Erdemir, H.I. Durmus // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 105. – P. 423–434.
4. Osborne, G.J. Durability of Portland Blast-furnace Slag Cement Concrete / G.J. Osborne // *Cement and Concrete Composites*. – 1999. – Vol. 21, № 1. – P. 11–21.
5. Lukowski, P. Durability of Mortars Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag in Acid and Sulphate Environment / P. Lukowski, A. Salih // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 108. – P. 47–54.
6. Ground Granulated Blast Furnace Slag Effect on the Durability of Ternary Cementitious System Exposed to Combined Attack of Chloride and Sulfate / G. Li, A. Zhang, Z. Song et al. // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 158. – P. 640–648.
7. Richardson, I.G. Microstructure and Microanalysis of Hardened Cement Pastes Involving Ground Granulated Blast-furnace Slag / I.G. Richardson, G.W. Groves // *Journal of Materials Science*. – 1992. – Vol. 27, № 22. – P. 6204–6212.
8. Трофимов, Б.Я. Молотый доменный гранулированный шлак и способы его активации / Б.Я. Трофимов, К.В. Шульдяков // *Труды международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг»*. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 146–152.
9. Wawrzenczyk, J. Scaling Resistance and Air Void Characteristics in Concrete Containing GGBS / J. Wawrzenczyk, A. Molendowska, T. Juszcak // *Archives of Civil Engineering*. – 2016. – Vol. 62, № 4. – P. 181–192.
10. Wawrzenczyk, J. Determining k-Value with Regard to Freeze-thaw Resistance of Concretes Containing GGBS / J. Wawrzenczyk, A. Molendowska, T. Juszcak // *Materials*. – 2018. – Vol. 11, № 12. – P. 2349, 1–10.
11. Трофимов, Б.Я. Влияние количества шлака в цементе на морозостойкость тяжелого бетона / Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар, К.В. Шульдяков // *Строительные материалы*. – 2013. – № 9. – С. 96–101.
12. Сатарин, В.И. Быстротвердеющий шлакопортландцемент / В.И. Сатарин, Я.М. Сыркин, М.Б. Френкель. – М.: Стройиздат, 1970. – 152 с.
13. Сыркин, Я.М. Минеральный состав и свойства добавки эффективного интенсификатора твердения шлакопортландцемента / Я.М. Сыркин // *Журнал прикладной химии*. – 1979. – Т. 52, № 11. – С. 1680–1687.
14. Майков, В.П. О роли добавок в твердении шлакопортландцемента и шлаковых минералов / В.П. Майков, Б.В. Гусев, В.Б. Ратинов // *Журнал прикладной химии*. – 1976. – Т. 49, № 3. – С. 470–475.
15. Pizon, J. Influence of Hardening Accelerating Admixtures on Properties of Cement with Ground Granulated Blast Furnace Slag / J. Pizon, P. Miera, B. Lazniewska-Piekarczyk // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 161. – P. 1070–1075.
16. Михайлов, Г.Г. Морозостойкость пропаренного бетона на шлакопортландцементях / Г.Г. Михайлов, Б.Я. Трофимов, Е.А. Гамалий // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2012. – Т. 14, № 17. – С. 42–47.
17. Эккель, С.В. Некоторые вопросы строительства и ремонта цементобетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов / С.В. Эккель // *Цемент и его применение*. – 2017. – № 6. – С. 78–86.

Крамар Людмила Яковлевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kramar-1@mail.ru

Иванов Илья Михайлович, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ivanov.im@bk.ru

Поступила в редакцию 1 декабря 2020 г.

FAST-HARDENING, HIGH-STRENGTH AND FROST RESISTANT CONCRETE BASED ON SLAG PORTLAND CEMENT

L.Ya. Kramar, kramar-l@mail.ru

I.M. Ivanov, ivanov.im@bk.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

It is known that concretes based on slag portland cement (SPC) are distinguished by high environmental and economic indicators, as well as increased durability in almost all operational environments. But many researchers, technologists and the provisions of standards, argue that it is impossible to obtain fast-hardening and high-strength concretes, as well as concretes with high frost resistance using SPC. In this article, comprehensive measures aimed at effectively improving the mentioned characteristics have been proposed. The research results show that at a low water-cement ratio, slag portland cement, which contains ground granulated blast-furnace slag and mineral additives, is able to quickly harden under normal conditions, gain high strength and form the structure of a cement stone of concrete with low open porosity, that provides high frost resistance. As a result, a fast-hardening concrete of compressive strength class B55 and frost resistance grade of F₂ 400 (F₁ 1000) has been developed. Other characteristics of the concrete have also been evaluated: axial tensile strength class – B₁ 3.6; flexural tensile strength class – B_{fb} 6.4; abrasion grade – G1 and watertightness grade – W16.

Keywords: slag portland cement, ground granulated blast-furnace slag, portland cement, slag activation, rate of hardening, strength, frost resistance, durability, high-performance concrete.

References

1. Saranya P., Nagarajan P., Shashikala A.P. [Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 330, no. 1, 012057, pp. 1–5.
2. Panfilov M.I., Shkol'nik Ya.Sh., Orininskiy N.V. *Pererabotka shlakov i bezotkhodnaya tekhnologiya v metallurgii* [Slag Processing and Waste-free Technology in Metallurgy]. Moscow, Metallurgiya, 1987. 238 p.
3. Ozbay E., Erdemir M., Durmus H.I. [Utilization and Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties - A Review]. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 105, pp. 423–434.
4. Osborne G.J. [Durability of Portland Blast-furnace Slag Cement Concrete]. *Cement and Concrete Composites*, 1999, vol. 21, no. 1, pp. 11–21.
5. Lukowski P., Salih A. [Durability of Mortars Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag in Acid and Sulphate Environment]. *Procedia Engineering*, 2015. vol. 108, pp. 47–54.
6. Li G., Zhang A., Song Z. [Ground Granulated Blast Furnace Slag Effect on the Durability of Ternary Cementitious System Exposed to Combined Attack of Chloride and Sulfate]. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 158, pp. 640–648.
7. Richardson I.G., Groves G.W. [Microstructure and Microanalysis of Hardened Cement Pastes Involving Ground Granulated Blast-furnace Slag]. *Journal of Materials Science*, 1992., vol. 27, no. 22, pp. 6204–6212.
8. Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. [Ground Granulated Blast-furnace Slag and its Activation Methods]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Prom-Inzhiniring"* [Proc. of the International Conference on Industrial Engineering 2015]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2015, pp. 146–152.
9. Wawrzenczyk J., Molendowska A., Juszcak T. [Scaling Resistance and Air Void Characteristics in Concrete Containing GGBS]. *Archives of Civil Engineering*, 2016, vol. 62, no. 4, pp. 181–192.
10. Wawrzenczyk J., Molendowska A., Juszcak T. [Determining k-Value with Regard to Freeze-thaw Resistance of Concretes Containing GGBS]. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 12, 2349, pp. 1–10.
11. Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya., Shuldyakov K.V. [Effect of the Amount of Slag in Cement on Freeze-thaw Resistance of Heavy Concrete]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2013, no. 9, pp. 96–101. (in Russ.)
12. Satarin V.I., Syrkin Ya.M., Frenkel' M.B. *Bystrotverdeyushchiy shlakoportlandtsement* [Fast Hardening Portland Blast-furnace Slag Cement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1970. 152 p.
13. Syrkin Ya.M. [Mineral Composition and Properties of the Additive of an Effective Hardening Intensifier of Portland Blast-furnace Slag Cement]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1979, vol. 52, no. 11, pp. 1680–1687. (in Russ.)
14. Maykov V.P., Gusev B.V., Ratinov V.B. [On the Role of Additives in the Hardening of Portland Blast-furnace Slag Cement and Slag Minerals]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1976, vol. 49, no. 3, pp. 470–475. (in Russ.)

15. Pizon J., Miera P., Lazniewska-Piekarczyk B. [Influence of Hardening Accelerating Admixtures on Properties of Cement with Ground Granulated Blast Furnace Slag]. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 161, pp. 1070–1075.

16. Mikhaylov G.G., Trofimov B.Ya., Gamaliy E.A. [Freeze-thaw Resistance of Steam Cured Concrete on Blastfurnace Cement]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2012, vol. 14, no. 17, pp. 42–47. (in Russ.)

17. Ekkel' S.V. [Some Issues of Construction and Repair of Cement Concrete Pavements of Highways and Airfields]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its Application], 2017, no. 6, pp. 78–86. (in Russ.)

Received 1 December 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Крамар, Л.Я. Быстротвердеющий, высокопрочный и морозостойкий бетон на основе шлакопортландцемента / Л.Я. Крамар, И.М. Иванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 48–53. DOI: 10.14529/build210106

FOR CITATION

Kramar L.Ya., Ivanov I.M. Fast-Hardening, High-Strength and Frost Resistant Concrete Based on Slag Portland Cement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021, vol. 21, no. 1, pp. 48–53. (in Russ.). DOI: 10.14529/build210106
