ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ САМОУПЛОТНЯЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ СЖИГАНИЯ УГЛЯ

**Ю.М. Баженов, В.В. Воронин, Л.А. Алимов, А.М. Бахрах, О.А. Ларсен,
В.Н. Соловьев, Нгуен Дык Винь Куанг**

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

Предмет исследования: получили распространение самоуплотняющиеся бетоны (СУБ), при использовании которых не требуется дополнительное уплотнение, для применения в густоармированных конструкциях и труднодоступных местах. В СУБ для регулирования технологических свойств широко применяются тонкомолотые добавки-микронаполнители. Их введение в бетонную смесь позволит получить более плотную структуру бетона. Отмечается влияние микронаполнителей на водопотребность и пластичность бетонной смеси, кинетику набора прочности, тепловыделение и коррозионную стойкость.

Цели: работа посвящена разработке состава СУБ с заданными свойствами с использованием зол уноса на основе отходов сжигания угля, оптимизированного с помощью метода математического планирования эксперимента с целью выяснения влияния количества золы, цемента и крупности песка на прочностные свойства.

Материалы и методы: в качестве вяжущего применялся бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5Н. В качестве заполнителей использовался гранитный щебень фракции 5...20 мм, крупный песок с $M_k = 2,6$ и мелкий песок с $M_k = 1,4$. В качестве пластифицирующей добавки применялся суперпластификатор BASF Master Glenium 115. В качестве наполнителя вводилась зола уноса Черепецкой ГРЭС. Исследования прочностных и технологических характеристик СУБ проводились с использованием стандартных методов.

Результаты: получена трехфакторная квадратичная зависимость прочностных свойств от содержания золы, цемента и доли мелкого заполнителя в смеси мелких заполнителей.

Выводы: введение добавки микронаполнителя на основе зол уноса позволило получить бетонную смесь, обладающую высокой подвижностью, текучестью и эффектом самоуплотнения. Полученный бетон обладает высокими прочностными показателями, замедленным набором прочности за счет замены части вяжущего золой. Введение золы уноса повышает степень гидратации портландцемента за счет большой водоудерживающей способности, а также способствует уменьшению общей капиллярной пористости структуры СУБ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: зола уноса, самоуплотняющийся бетон, наполнитель, прочность при сжатии, морозостойкость, суперпластификатор

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Баженов Ю.М., Воронин В.В., Алимов Л.А., Бахрах А.М., Ларсен О.А., Соловьев В.Н., Нгуен Дык Винь Куанг. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 12 (111). С. 1385–1391.

HIGH-QUALITY SELF-COMPACTING CONCRETE WITH COAL BURNING WASTE

**Yu.M. Bazhenov, V.V. Voronin, L.A. Alimov, A.M. Bakhrakh, O.A. Larsen,
V.N. Solov'ev, Nguen Dyk Vin Kuang**

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, 129337, Russian Federation*

Subject: nowadays self-compacting concretes (SCC), the use of which requires no additional compaction, have become widespread for use in densely-reinforced structures and hard-to-reach places. In self-compacting concretes, finely-ground admixtures-microfillers are widely used for controlling technological properties. Their introduction into the concrete mix allows us to obtain more dense structure of concrete. The influence of micro-fillers on water consumption and plasticity of concrete mix, on kinetics of strength gain rate, heat release and corrosion resistance is also noticeable.

Research objectives: the work focuses on the development of composition of self-compacting concrete with assigned properties with the use of fly ash based on coal burning waste, optimized with the help of experimental design method in order to clarify the influence of ash and cement quantity, sand size on strength properties.

Materials and methods: pure Portland cement CEM I 42.5 N was used as a binder. Crushed granite of fraction 5...20 mm was used as coarse aggregate, coarse quartz sand with the fineness modulus of 2.6 and fine sand with the fineness modulus of 1.4 were used as fillers. A superplasticizer BASF-Master Glenium 115 was used as a plasticizing admixture. The fly ash from Cherepetskaya thermal power plant was used as a filler. The study of strength and technological properties of self-compacting concrete was performed by using standard methods.

Results: we obtained three-factor quadratic dependence of strength properties on the content of ash, cement and fraction of fine filler in the mix of fine fillers.

Conclusions: introduction of micro-filler admixture based on the fly ash allowed us to obtain a concrete mix with high mobility, fluidity and self-compaction property. The obtained concrete has high strength characteristics, delayed strength gain rate due to replacement of part of the binder with ash. Introduction of the fly ash increases degree of hydration of Portland cement due to the greater water retention capacity, and also contributes to reduction in total capillary porosity of SCC structure.

KEY WORDS: fly ash, self-compacting concrete, filler, compressive strength, frost resistance, superplasticizer

FOR CITATION: Bazhenov Yu.M., Voronin V.V., Alimov L.A., Bakhrah A.M., Larsen O.A., Solov'ev V.N., Nguen Dyk Vin Kuang. Vysokokachestvennyye samouplotnyayushchiesya betony s ispol'zovaniem otkhodov szhiganiya uglya [High-quality self-compacting concrete with coal burning waste]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 12 (111), pp. 1385–1391.

ВВЕДЕНИЕ

Отходы сжигания угля — зола и шлаки, несгораемый остаток, складываемый в золоотвалах, занимающих огромные территории. Золоотвалы искажают ландшафт, нарушают экологию, уничтожают места обитания различных видов животных.

В период с 2016 по 2017 г. было добыто 417514,2 тыс. т угля, из которых 238237 тыс. т для собственных нужд России. Важным является вопрос утилизации отходов тепловой энергетики, в том числе для реализации возможностей по более полному и эффективному использованию различных видов угля.

В строительстве наиболее эффективно применяют золы сухого отбора, которые не требуют предварительной обработки перед использованием. Появление самоуплотняющихся бетонов (СУБ) открыло новую перспективу для использования золы-уноса в качестве микронаполнителя. Микронаполнитель в бетонах служит для повышения водоудерживающей способности бетонной смеси, уплотнения структуры.

Данная статья посвящена разработке состава СУБ с заданными свойствами с золой уноса.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Основное применение золы в строительстве — введение ее в бетон в качестве заполнителя и наполнителя в количестве, обычно не превышающем 20 % от массы цемента [1]. В частности, в статье [2], представляющей зарубежную школу технологии бетона, приведен расход золы 121 кг при расходе цемента 543 кг. Зола уноса оказывает влияние на водопотребность и пластичность бетонной смеси благодаря удельной поверхности не менее 150 м²/кг таким образом, что проектная прочность бетона с золой уноса может быть достигнута в возрасте 90 и 180 сут. Такие бетоны применяют в гидротехническом строительстве. В работах [3–5] отмечается уплотнение структуры бетона благодаря примене-

нию золы уноса, частички которой имеют диаметр зачастую менее 20 мкм и заполняют пустоты в цементном камне.

Отмечается [6–8] высокая пуццолановая активность кислых зол уноса, содержащих аморфный кремнезем SiO₂ в количестве 50 % и более и связывающий Ca(OH)₂ в низкоосновные гидросиликаты кальция, что положительно сказывается на коррозионной стойкости бетонов.

Самоуплотняющаяся бетонная смесь может самостоятельно заполнять форму опалубки благодаря своей высокой подвижности без какого-либо механического воздействия извне под действием собственного веса [9, 10]. Представители отечественной школы СУБ приводят данные по получению самоуплотняющихся бетонных смесей с распылом конуса 54,5 см и более [11]. Необходимым компонентом СУБ является тонкодисперсный наполнитель, который вводится для экономии вяжущего, повышения водоудерживающей способности бетонной смеси и достижения необходимых технологических свойств.

Имеется опыт применения как кислых [12, 13] с содержанием CaO менее 10 %, так и основных зол уноса с содержанием CaO более 10 % в различных рецептурах по приготовлению СУБ [14]. В работе [15] указывается возможность получения СУБ класса В25 с дозировкой золы уноса 30 % по массе вяжущего.

Большое влияние на свойства СУБ оказывают заполнители. В публикации [16] указано на необходимость соблюдения непрерывности гранулометрии заполнителей для достижения наиболее связной структуры бетонной смеси. Статьи [17, 18] отмечают необходимость применения мелкого песка с модулем крупности $M_k = 1,3$ и щебня с максимальной крупностью 12,5 мм соответственно.

Цель исследования, изложенного в данной работе, — разработать состав СУБ, отличающийся повышенными характеристиками, с содержанием золы уноса 60 % от массы цемента на рядовых заполнителях, выяснить влияние количества цемента, золы уноса и гранулометрического состава мелкого

заполнителя на свойства СУБ, а также провести оптимизацию состава методом математического планирования с помощью полученных данных. Повышенные дозировки золы уноса призваны не только улучшить свойства разрабатываемого материала, но и также решить проблему утилизации зол ТЭС, описанную в работах [19, 20] отечественных авторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н Мордовцемент согласно ГОСТ 31108-2016¹. Использовался гранитный щебень фракции 5...20 мм, третьего класса лещадности формы согласно ГОСТ 8267-93², насыпной плотности 1390 кг/м³, истинной плотности 2700 кг/м³ и крупный песок I класса согласно ГОСТ 8736-2014³. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о непрерывной гранулометрии заполнителей, которая положительно сказывается на эффекте самоуплотнения [16], плотности упаковки частиц, предотвращает расслоение бетонной смеси [17]. Рис. 1 демонстрирует близость смеси песка и щебня к требованиям для перекачиваемых смесей.

Применялся суперпластификатор BASF Master Glenium 115. Его дозировка определялась опытным путем и составила 1,6 % от массы цемента. В эксперименте использовалась зола уноса Черепетской

ГРЭС марки ЗУ КУК-1 ГОСТ 25818-91⁴. Количество золы составило 60 % исходя из условий самоуплотнения бетонной смеси, экономических и экологических соображений. Возможность использования такого количества золы определяется высоким содержанием в ней SiO₂, увеличивающим количество новообразований в начальные сроки твердения, большой водоудерживающей способностью, способствующей высокой степени гидратации цемента, округлой формой, улучшающей реологические свойства бетонной смеси.

В результате учета математических условий текучести бетонных смесей и изучения мирового опыта получения самоуплотняющихся бетонных смесей был разработан состав СУБ: цемент — 360 кг/м³, зола — 215 кг/м³ (60 % от массы цемента), вода — 183 кг/м³, песок — 750 кг/м³, щебень — 810 кг/м³ и суперпластификатор — 5,4 кг/м³. Водовязущее отношение составило 0,31.

Расплав обратного конуса Абрамса составил 650 мм, что соответствует высокоподвижной смеси SF1 согласно стандарту испытаний СУБ. С помощью поромера было измерено содержание вовлеченного воздуха, количество которого составило 3,6 % от общего объема, что на 1,6 % больше проектного значения (2 %). Повышенная пористость может как положительно, так и отрицательно сказаться на морозостойкости полученного бетона.

Были изготовлены образцы-кубы размером 10 × 10 × 10 см. Прочность образцов на 3, 7, 14 и 28 сут составила соответственно 23,1, 41,8, 47,4

¹ ГОСТ 31108-2016 Цементы общестроительные. Технические условия.

² ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями № 1-4).

³ ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия (с Поправкой)

⁴ ГОСТ 25818-91 Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов.

Рис. 1. Зерновой состав заполнителей СУБ

и 63,7 МПа. Согласно ГОСТ 10180-2012⁵, данный бетон относится к классу В45. Зола уноса замедляет набор прочности, и ее максимальное значение может быть достигнуто в отдаленные сроки (90 и 180 сут).

Проведена оптимизация состава с помощью метода математического планирования эксперимента для выяснения влияния количества микронаполнителя, цемента и крупности песка на прочностные свойства СУБ.

В качестве факторов варьирования были выбраны содержание золы уноса в процентах от массы цемента, расход цемента в килограммах и доля мелкого песка в смеси песков в процентах от общего количества песка соответственно.

Для оценки влияния мелкого песка на технологические свойства и гранулометрический состав мелкого заполнителя был произведен рассев мелкого песка, построена гранулометрическая кривая, результаты которого представлены на рис. 2.

Исходя из условий растекаемости СУБ были выбраны факторы варьирования. Согласно плану эксперимента, были получены смеси десяти составов, оценены их технологические и физико-механические свойства.

Получено следующее уравнение зависимости прочности Y от факторов варьирования на седьмые сутки:

$$Y = 46,365 + 6,376X_2 + 0,085X_3 - 6,402X_2^2 + 6,629X_3^2 + 6,111X_2X_3.$$

Установлено, что при значении $X_1 = 40\%$, наблюдается экстремум функции, т.е. максимально

значение $Y = 46,8$ МПа при значениях факторов $X_2 = 424,2$ кг и $X_3 = 12,55\%$.

Получено следующее уравнение зависимости прочности от факторов варьирования на 28-е сутки:

$$Y = 76,474 + 7,958X_2 + 0,203X_3 - 10,148X_2^2 + 6,766X_3^2 + 6,836X_2X_3.$$

При значении $X_1 = 40\%$ наблюдается экстремум функции, т.е. максимально значение $Y = 77,8$ МПа при значениях факторов $X_2 = 429,9$ кг и $X_3 = 40,9\%$.

Таким образом, обоснована возможность получения высококачественных СУБ повышенным содержанием золы уноса, которая оказывает положительное влияние на реологические свойства бетонной смеси и повышает степень гидратации цемента.

ВЫВОДЫ

Введение микронаполнителя на основе золы уноса позволило получить бетонную смесь, обладающую высокой подвижностью, текучестью и эффектом самоуплотнения. Полученный бетон обладает высокими прочностными показателями, замедленным набором прочности за счет замены части вяжущего золой. Введение золы уноса повышает степень гидратации портландцемента за счет большей водоудерживающей способности, а также способствует уменьшению общей капиллярной пористости структуры СУБ.

Проведенные исследования обосновывают возможность решения проблемы утилизации отходов от сжигания угля в России путем их применения в больших дозировках в качестве наполнителей для бетонов, в том числе и высококачественных.

⁵ ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам

Рис. 2. Гранулометрическая кривая мелкого песка

ЛИТЕРАТУРА

1. Altoubat S., Talha J., Leblouba M., Badran D. Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 79. Pp. 9–20.
2. Nepomuceno M.C.S., Pereira-de-Oliveira L.A., Lopes S.M.R. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 64. Pp. 82–94.
3. Nikbin I.M., Beygi M.H.A., Kazemi M.T. et al. Effect of coarse aggregate volume on fracture behavior of self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. No. 52. Pp. 137–145.
4. Lomboy G.R., Wang X., Wang K. Rheological behavior and formwork pressure of SCC, SFSCC, and NC mixtures // *Cement and Concrete Composites*. 2014. No. 54. Pp. 110–116.
5. Adekunle S., Ahmad S., Maslehuddin M., Al-Gahtani H.J. Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers // *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 62. Pp. 125–133.
6. Muellera F.V., Wallevika O.H., Khayat K.H. Linking solid particle packing of Eco-SCC to material performance // *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 54. Pp. 117–125.
7. Da Silva P.R., De Brito J. Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler // *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49. Issue 7. Pp. 2749–2766.
8. Соловьянчик А.Р., Коротин В.Н., Пуляев И.С. и др. Опыт применения самоуплотняющихся бетонных смесей при строительстве мостов и тоннелей // *Alitinform. Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2012. № 3 (25). С. 8–21.
9. Несветаев Г.В., Лопатина Ю.Ю. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и ее растворной составляющей // *Науковедение*. 2015. Т. 7. № 5. С. 1–14.
10. Ghoddousi P., Shirzadi Javid A.A., Sobhani J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 53. Pp. 102–109.
11. Figueiras H., Nunes S., Coutinho J.S., Andrade C. Linking fresh and durability properties of paste to SCC mortar // *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 45. Pp. 209–226.
12. Celik K., Meral C., Petek Gursel A. et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder // *Cement and Concrete Composites*. February 2015. Vol. 56. Pp. 59–72.
13. Dinakar P., Babu K.G., Santhanam M. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes // *Cement and Concrete Composites*. November 2008. Vol. 30. Issue 10. Pp. 880–886.
14. Ng S., Justnes H. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash // *Cement and Concrete Composites*. January 2016. Vol. 65. Pp. 41–54.
15. Şahmaran M., Yaman İ.Ö., Tokyay M. Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash // *Cement and Concrete Composites*. February 2009. Vol. 31. Issue 2. Pp. 99–106.
16. Taylor P.C., Tait R.B. Effects of fly ash on fatigue and fracture properties of hardened cement mortar // *Cement and Concrete Composites*. 1999. Vol. 21. Issue 3. Pp. 223–232.
17. Turk K., Karatas M., Gonen T. Effect of fly ash and silica fume on compressive strength, sorptivity and carbonation of SCC // *Cement and Concrete Composites*. January 2013. Vol. 17. Issue 1. Pp. 202–209.
18. Dinakar P., Babu K.G., Santhanam M. Building products and constructions Department // *Structural Concrete*. June 2008. Vol. 9. Issue 2. Pp. 109–116.
19. Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Шестернин А.И., Уразова А.А. Применение промышленных отходов в технологии самоуплотняющихся бетонов // *Образование и наука в современном мире. Иновации*. 2016. № 6–2. С. 226–234.
20. Шульце С.Е., Рикерт Й. Влияние химического состава золы уноса на ее реакционную способность // *Цемент и его применение*. 2012. № 1. С. 170–175.

Поступила в редакцию 14 сентября 2017 г.

Принята в доработанном виде 6 октября 2017 г.

Одобрена для публикации 23 ноября 2017 г.

ОБ АВТОРАХ: **Баженов Юрий Михайлович** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, заведующий кафедрой технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; zavkaf@list.ru;

Воронин Виктор Валерианович — профессор, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; s-voronina191@yandex.ru;

Алимов Лев Алексеевич — профессор, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; AlimovLA@mgsu.ru;

Бахрах Антон Михайлович — бакалавр института строительства и архитектуры, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; antonbahrah@mail.ru;

Ларсен Оксана Александровна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; larsen.oksana@mail.ru;

Соловьев Виталий Николаевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; sol-v-n@mail.ru;

Нгуен Дык Винь Куанг — аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ndvquang@hueic.edu.vn.

REFERENCES

1. Altoubat S., Talha J., Leblouba M., Badran D. Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2017, vol. 79, pp. 9–20.
2. Nepomuceno M.C.S., Pereira-de-Oliveira L.A., Lopes S.M.R. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*. 2014, vol. 64, pp. 82–94.
3. Nikbin I.M., Beygi M.H.A., Kazemi M.T. et al. Effect of coarse aggregate volume on fracture behavior of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2014, no. 52, pp. 137–145.
4. Lomboy G.R., Wang X., Wang K. Rheological behavior and formwork pressure of SCC, SFSCC, and NC mixtures. *Cement and Concrete Composites*. 2014, no. 54, pp. 110–116.
5. Adekunle S., Ahmad S., Maslehuddin M., Al-Gahtani H.J. Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers. *Cement and Concrete Composites*. 2015, vol. 62, pp. 125–133.
6. Muellera F.V., Wallevika O.H., Khayat K.H. Linking solid particle packing of Eco-SCC to material performance. *Cement and Concrete Composites*. 2014, vol. 54, pp. 117–125.
7. Da Silva P.R., De Brito J. Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *Materials and Structures*. 2016, vol. 49, issue 7, pp. 2749–2766.
8. Solov'yanchik A.R., Korotin V.N., Pulyaev I.S. et al. Opyt primeneniya samouplotnyayushchikhsya betonnykh smesey pri stroitel'stve mostov i tonneley [Application of self-compacting concrete mixes in bridges and tunnels construction]. *Altinform. Tsement. Beton. Sukhie smesi* [Altinform. Cement. Concrete. Dry mixes]. 2012, no. 3 (25), pp. 8–21. (In Russian)
9. Nesvetaev G.V., Lopatina Yu.Yu. Proektirovanie makrostruktury samouplotnyayushchey betonnoy smesi i ee rastvornoy sostavlyayushchey [Design of macrostructure of self-compacting concrete and its mortar component]. *Naukovedenie* [Online Journal Science Studies]. 2015, vol. 7, no. 5, pp. 1–14. (In Russian)
10. Ghoddousi P., Shirzadi Javid A.A., Sobhani J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*. 2014, vol. 53, pp. 102–109.
11. Figueiras H., Nunes S., Coutinho J.S., Andrade C. Linking fresh and durability properties of paste to SCC mortar. *Cement and Concrete Composites*. 2014, vol. 45, pp. 209–226.
12. Celik K., Meral C., Petek Gursel A. et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, February 2015, vol 56, pp. 59–72.
13. Dinakar P., Babu K.G., Santhanam M. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. *Cement and Concrete Composites*, November 2008, vol 30, issue 10, pp. 880–886.
14. Ng S., Justnes H. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash. *Cement and Concrete Composites*. January 2016, vol. 65, pp. 41–54.

15. Şahmaran M., Yaman İ.Ö., Tokyay M. Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Composites*. February 2009, vol. 31, issue 2, pp. 99–106.
16. Taylor P.C., Tait R.B. Effects of fly ash on fatigue and fracture properties of hardened cement mortar. *Cement and Concrete Composites*. 1999, vol. 21, issue 3, pp. 223–232.
17. Turk K., Karatas M., Gonen T. Effect of fly ash and silica fume on compressive strength, sorptivity and carbonation of SCC. *Cement and Concrete Composites*. January 2013, vol. 17, issue 1, pp. 202–209.
18. Dinakar P., Babu K.G., Santhanam M. Building products and constructions department. *Structural Concrete*. June 2008, vol. 9, issue 2, pp. 109–116.
19. Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Sheshternin A.I., Urazova A.A. Primenenie promyshlennykh otkhodov v tekhnologii samouplotnyayushchikhsya betonov [The use of industrial waste in the technology of self-compacting concrete]. *Obrazovanie i nauka v sovremennoy mire. Inovatsii* [Education and Science in the Modern World. Innovations]. 2016, no. 6–2, pp. 226–234.
20. Shul'tse S.E., Rikert Y. Vliyanie khimicheskogo sostava zoly unosa na ee reaktivnost' [Influence of the chemical composition of fly ash on its reactivity]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its Applications]. 2012, no. 1, pp. 170–175.

Received September 14, 2017.

Adopted in revised form on October 6, 2017.

Approved for publication on November 23, 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Bazhenov Yuriy Mikhaylovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Russian Federation, 129337, Russian Federation, zavkaf@list.ru;

Voronin Viktor Valerianovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Russian Federation, s-voronina191@yandex.ru;

Alimov Lev Alekseevich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Russian Federation, AlimovLA@mgsu.ru;

Bakhrakh Anton Mikhaylovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of construction of thermal and nuclear power facilities, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Russian Federation, sol-vn-@mail.ru;

Larsen Oksana Aleksandrovna — Bachelor, Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Russian Federation, antonbahrah@mail.ru;

Solov'ev Vitaliy Nikolaevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Russian Federation, larsen.oksana@mail.ru;

Nguyen Dyk Vin Kuang — Postgraduate student, Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Russian Federation, ndvquang@hueic.edu.vn.