

ЛИТЫЕ БЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА И НАНОКРЕМНЕЗЕМА

А.В. Кравцов, С.В. Цыбакин, Т.М. Евсеева, К.Г. Соболев*, В.В. Потапов**

*Костромская государственная сельскохозяйственная академия (Костромская ГСХА),
156530, Костромская обл., пос. Караваяево, Учебный городок, д. 34;*

**Университет Висконсин-Милуоки, США, 53201, Висконсин, Милуоки, п/я 784;*

***Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук (НИИГТЦ ДВО РАН),
683002, г. Петропавловск-Камчатский, Северо-Восточное шоссе, д. 30*

АННОТАЦИЯ. Предмет исследования: применение в технологии литых и самоуплотняющихся бетонов минеральных микронаполнителей на основе техногенных отходов цветной металлургии совместно с нанокремнеземом. Результатами предыдущих опытов была доказана эффективность использования молотого медеплавильного шлака в технологии литых бетонных смесей. Однако отсутствуют результаты исследования совместной работы данного микронаполнителя и нанодобавки в пластичных бетонных смесях.

Цель исследования: определение оптимального диапазона использования нанокремнезема в литых бетонных смесях со шлаковым микронаполнителем с точки зрения сохранения пластичности бетонной смеси и увеличения прочности бетона.

Материалы и методы: определение пластичности бетонной смеси осуществлялось по расплыву малого конуса на встряхивающем столике по методике, разработанной в НИУ МГСУ. Проверка прочности бетонных образцов осуществлялась в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Статистическая обработка полученных результатов произведена методом наименьших квадратов.

Результаты: построены графики зависимости пластичности бетонной смеси и прочности литого бетона с молотым медеплавильным шлаком от дозировки нанодобавки, а также влияния дозировки суперпластификатора на указанные свойства при высоких значениях использования нанокремнезема. Выведены уравнения регрессии для всех установленных зависимостей.

Выводы: установлено, что введение нанокремнезема в дозировке 0,1...0,5 % от массы цемента положительно сказывается на прочности бетона при совместном использовании с медеплавильным шлаком и суперпластификатором. Разработанные составы литых мелкозернистых бетонных смесей могут использоваться в густоармированных бетонных конструкциях, имеющих высокие требования по крупности заполнителей и пластичности бетонной смеси.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: медеплавильный шлак, помол, поликарбоксилатный суперпластификатор, минеральная добавка, утилизация, литой мелкозернистый бетон, самоуплотняющийся бетон, нанокремнезем, нанодобавка, многокомпонентная бетонная смесь

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кравцов А.В., Цыбакин С.В., Евсеева Т.М., Соболев К.Г., Потапов В.В. Литые бетоны с использованием отходов медеплавильного производства и нанокремнезема // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 9 (108). С. 1010–1018.

CAST CONCRETE WITH THE USE OF COPPER PRODUCTION WASTES AND NANO SILICA

A.V. Kravtsov, S.V. Tsibakin, T.M. Evseeva, K.G. Sobolev*, V.V. Potapov**

*Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma SAA), 34 Uchebniy gorodok, Karavaevskaya s\la,
poselok Karavaevo, Kostromskaya oblast', 156530, Russian Federation;*

**University of Wisconsin-Milwaukee, P.O. Box 784, Wisconsin, Milwaukee, USA, 53201;*

***Scientific Research Geotechnological Center Far Easter Branch of Russian Academy of Sciences,
30 North-East shosse, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, 683002*

ABSTRACT. Subject: applying mineral microfillers based on technogenic waste of non-ferrous metallurgy together with nano silica in the technology of cast and self-compacting concrete is the subject of the paper. The results of the previous experiments proved the effectiveness of the use of ground copper slag in the technology of cast concrete mixtures. However, there are no research results on the combined work of the microfiller and nanoparticles in plastic concrete mixtures.

Research objectives: determining the optimal range of the use of nano silica in cast concrete mixtures with copper slag filler from the viewpoint of conservation of plasticity of the concrete mixture and increase of the concrete strength.

Materials and methods: plasticity of the concrete mixture was determined according to spread of a small cone on the shaking table by the method developed in NRU MGSU. The strength of concrete samples was checked according to GOST 10180-2012. Statistical processing of the obtained results was carried out by the least square method.

Results: plots showing dependence of plasticity of the concrete mixture and strength of cast concrete with ground copper slag on the dosage of nanoparticles and also the influence of the dosage of superplasticizer on the indicated properties at high values of the content of nano silica were obtained. Regression equations for all specified dependencies were derived.

Conclusions: it is established that the introduction of nano silica in a dosage of 0.1...0.5 % of cement weight positively affects the concrete strength when used in conjunction with copper slag and superplasticizer. The developed compositions of cast fine-grained concrete mixtures can be used in high-density reinforcement concrete structures with strict requirements for size of fillers and plasticity of the concrete mixture.

KEY WORDS: copper smelting slag, grinding, polycarboxylate superplasticizer, mineral admixture, recycling, cast fine concrete, self-compacting concrete, nano silica, nano-additive, multicomponent concrete mixture

FOR CITATION: Kravtsov A.V., Tsibakin S.V., Evseeva T.M., Sobolev K.G., Potapov V.V. Litye betony s ispol'zovaniem otkhodov medepлавильного производства i nanokremnezema [Cast Concrete with the Use of Copper Production Wastes and Nano Silica]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 9 (108), pp. 1010–1018.

ВВЕДЕНИЕ

Бетоны с использованием техногенных отходов различных видов металлургической промышленности к настоящему времени нашли широкое применение в производстве гидравлических вяжущих, строительных растворов и различных видов бетонов. Однако среди отходов цветной металлургии особое место занимает шлак, полученный в результате добычи и плавления меди, отвалы которого располагаются преимущественно на территории Челябинской области [1–4]. Отличительной особенностью этого вида техногенных отходов является высокое содержание оксида железа (III) (около 50 %).

В настоящее время проводится разработка литых бетонов с использованием тонкомолотого медеплавильного шлака, суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов и нанокремнезема в виде золя диоксида кремния, полученного из гидротермального раствора.

Целью настоящего исследования является поиск оптимальной доли нанокремнезема в рассмотренной системе компонентов с точки зрения влияния на пластичность бетонной смеси и марочную прочность бетона.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На сегодняшний день отсутствуют данные комплексного исследования использования медеплавильного шлака в технологии бетонов, однако результатами опытов ученых России, Казахстана, Польши и Индии показано, что медеплавильный гранулированный шлак можно использовать при помоле общестроительных цементов в качестве минеральной добавки в количестве 10...30 % без существенного снижения активности цементов [5].

Ранее был проведен ряд исследований, согласно которым было установлено, что после помола медеплавильного шлака до удельной поверхности 7800...8000 см²/г можно использовать полученный материал в качестве минерального микронаполнителя для бетонов при массовой доле 30...40 % без

потери прочности [6]. Это объясняется тем, что молотый медеплавильный шлак уменьшает объем пор продуктов гидратации вяжущего посредством замещения пустот собственным объемом, а также получением совместных продуктов гидратации с цементом.

Значительное внимание многих специалистов строительной отрасли в настоящее время сосредоточено на разработке современных видов высококачественных бетонов, имеющих особые эксплуатационные характеристики и свойства [7]. Одним из таких видов является направление литых и самоуплотняющихся бетонов, способных под действием собственного веса плотно заполнять опалубку независимо от степени армирования возводимой конструкции [8–12].

Для достижения такой пластичности и однородности бетонной смеси осуществляется тщательный расчет гранулометрии заполнителей, а также активно используются микронаполнители из техногенных отходов различных видов промышленного производства, современные пластифицирующие добавки, а также тонкодисперсные нанодобавки [13–22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Молотый минеральный наполнитель из медеплавильного шлака в данной системе позволяет сократить расход цемента и понизить седиментацию бетонной смеси. Поликарбоксилатный суперпластификатор обеспечивает снижение соотношения В/Ц и значительно повышает пластичность бетонной смеси до категории литых бетонов. Нанокремнезем позволяет в полной мере реализовать потенциал использованных вяжущих веществ посредством химической реакции с гидроксидами кальция, связывая их до получения прочных гидросиликатов кальция. Также нанодобавка выполняет функцию стабилизатора бетонной смеси, так как увеличивает ее вязкость и предотвращает расслоение смеси и водоотделение.

При проектировании составов мелкозернистых бетонных смесей использовались следующие материалы:

- портландцемент производства ЗАО «Мордовцемент» ЦЕМ I 42,5Б (ГОСТ 31108-2003¹, ГОСТ 30515-97²) с нормальной плотностью 27,5 %, активностью (28 сут) 50,0 МПа, удельной поверхностью смеси $S_{уд} = 5511 \text{ см}^2/\text{г}$;

- песок Храмцовского месторождения (Храмцово, Ивановская область) с модулем крупности $M_{кр} = 2,8$, плотностью $\rho_{нас} = 1620 \text{ кг}/\text{м}^3$, водопотребностью $B_n = 5 \%$;

- молотый медеплавильный шлак Карабашского медеплавильного завода, $S_{уд} = 7832 \text{ см}^2/\text{г}$, $\rho_{ист} = 3227 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_{нас} = 1338 \text{ кг}/\text{м}^3$, $B_n = 27,5 \%$. Химический состав шлака следующий:

Наименование оксида	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	ZnO	MgO	K ₂ O	TiO ₂
Массовая доля	48,10	31,66	5,89	5,61	3,29	1,00	0,641	0,214

- суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров «Хидетал-ГП-9 Альфа Б» производства ГК «СКТ-Стандарт», $\rho = 1040 \text{ кг}/\text{м}^3$, массовая доля сухого компонента 16 %;

- нанокремнезем в виде золя, $\rho = 1075 \text{ кг}/\text{м}^3$, содержание SiO₂ = 120 г/л, полученный на основе гидротермального раствора по технологической схеме: поликонденсация ортокремниевой кислоты с образованием наночастиц SiO₂ при определенных температуре и кислотности pH; ультрафильтрационное мембранное концентрирование наночастиц в форме стабильного водного золя [20].

Химический состав сухого остатка золя нанокремнезема (R₂O — сумма оксидов щелочных металлов Na и K; массовая доля потерь при прокаливании 4,2 %) следующий:

Наименование оксида	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	R ₂ O
Массовая доля	94,0	0,5	0,9	0,13

В рамках рассмотренного исследования было проведено шесть предварительных экспериментов. В качестве постоянных эксперимента для возможности корректного сравнения результатов использовались водовязущее отношение В/Вяз = 0,53, водотвердое отношение В/Тв = 0,36, массовая доля суперпластификатора 0,16 % по сухому веществу, массовая доля минерального микронаполнителя 45 %. Так как раствор суперпластификатора и золь нанокремнезема содержит значительное количество воды, то для соблюдения постоянства соотношения В/Ц излишнее количество воды вычиталось из об-

щей рассчитанной водопотребности компонентов. Также для соблюдения постоянства В/Ц из расхода цемента вычитался расход сухого содержания SiO₂ в золе, так как нанокремнезем является самостоятельным вяжущим веществом. Общий расход материалов приведен в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов представлены на рис. 1 и 2.

Согласно полученным результатам, введение нанокремнезема в доле до 0,5 % от массы цемента способствует постепенному увеличению прочности мелкозернистого бетона до 6,7 %. Таким образом, оптимальным диапазоном использования добавки с точки зрения повышения прочности является 0,3...0,5 %. В то же время увеличение доли нанодобавки приводит к резкому уменьшению пластичности смеси, которое наблюдается даже при доле до 0,2 % массы цемента.

Расплыв конуса на встряхивающем столике при максимальной дозировке нанодобавки составил 15 см, что переносит рассмотренные бетонные смеси из категории литых в категорию смесей нормальной густоты.

Возможным решением данной проблемы может быть увеличение доли поликарбоксилатного пластификатора без увеличения соотношения В/Ц. Далее с целью оптимизации полученных составов были увеличены доли пластификаторов для составов с использованием нанодобавки в размере 0,3 и 0,5 % от массы цемента.

По результатам проведенных дополнительных исследований, представленных на рис. 3–6, видно, что достижение высокой пластичности бетонных смесей требует значительного увеличения доли суперпластификатора.

Из полученных зависимостей видно, что увеличение доли суперпластификатора значительно увеличивает пластичность бетонной смеси, несмотря на относительно большое содержание золя кремнезема. Помимо этого, наблюдается рост прочности мелкозернистого бетона на 9,5 МПа (17 %) при использовании 0,3 % нанокремнезема и на 6,8 МПа (12 %) при использовании 0,5 % нанокремнезема. Это происходит по причине лучшего уплотнения смеси под действием собственного веса из-за повышения ее пластичности.

При расходе нанодобавки 0,3 % от массы цемента оптимальным составом является бетонная смесь с 0,28 % суперпластификатора. При расходе нанодобавки 0,5 % от массы цемента оптимальным составом является бетонная смесь с 0,32 % суперпластификатора. В целях экономии расхода материальных ресурсов и снижения итоговой стоимости составов выгоднее использовать оптимизированный состав с 0,3 % нанокремнезема.

¹ ГОСТ 31108-2003. Цементы общестроительные. Технические условия.

² ГОСТ 30515-2013. Цементы. Общие технические условия.

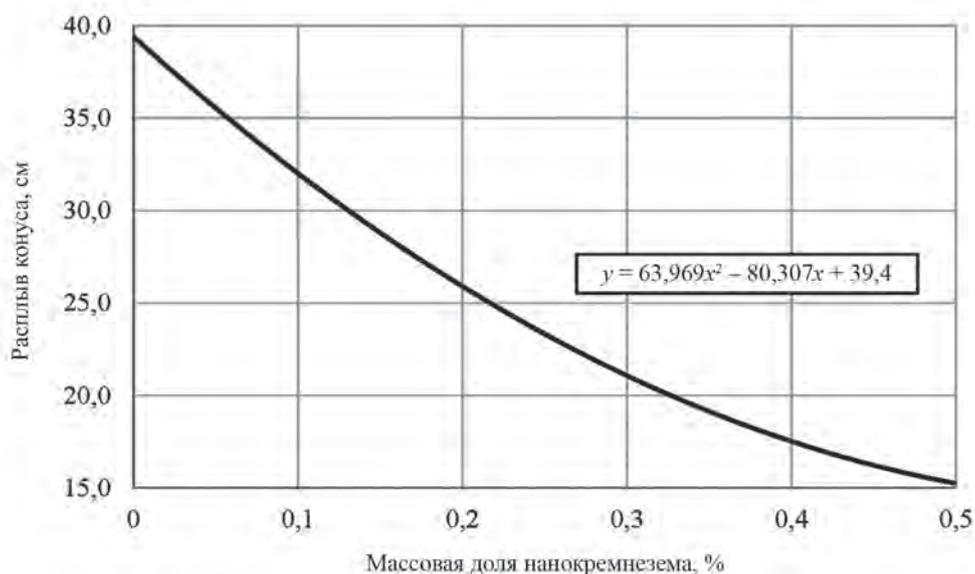


Рис. 1. Распыл конуса на встряхивающем столике бетонной смеси в зависимости от массовой доли нанокремнезема в расчете на сухой SiO_2

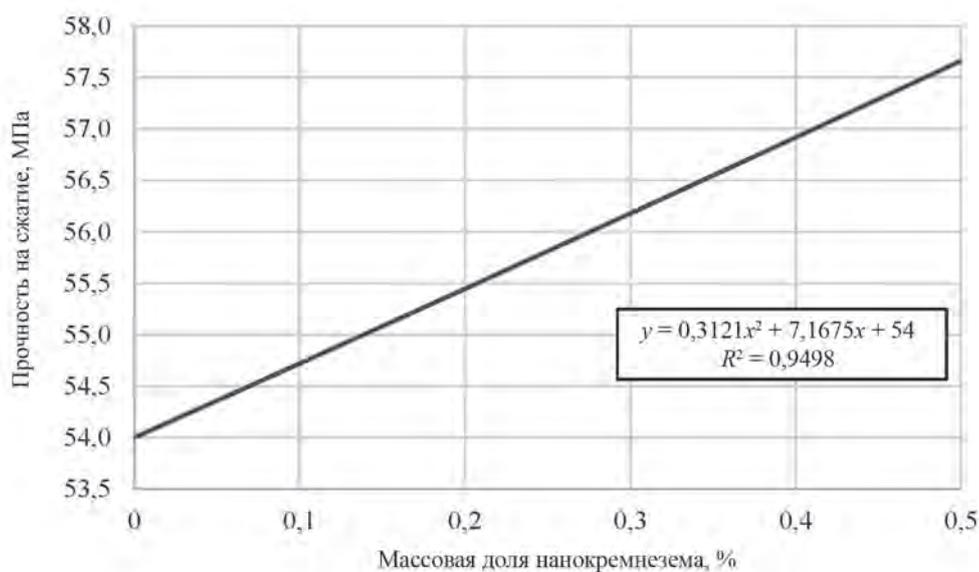


Рис. 2. Прочность на сжатие мелкозернистого бетона в возрасте 28 сут в зависимости от массовой доли нанокремнезема в расчете на сухой SiO_2

Табл. Расход материалов, кг/м³

Номер состава	Цемент	Молотый шлак	Суперпластификатор	Песок	Вода	Нанокремнезем		
						Сухое вещество SiO_2	Золь	
1	491,26	221,1	5,35	1376	253,67	—	—	—
2	491,21	221,1	5,35	1376	253,27	0,01 %	0,049	0,44
3	491,01	221,1	5,35	1376	251,71	0,05 %	0,245	2,20
4	490,77	221,1	5,35	1376	249,76	0,1 %	0,491	4,40
5	489,78	221,1	5,35	1376	241,94	0,3 %	1,473	13,20
6	488,80	221,1	5,35	1376	234,12	0,5 %	2,456	22,00

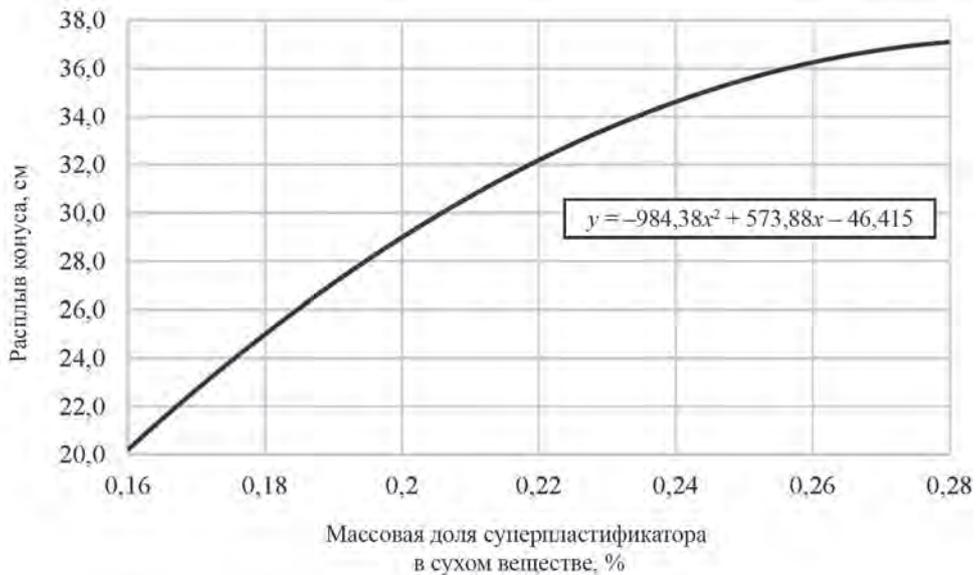


Рис. 3. Распыль конуса на встряхивающем столике бетонной смеси в зависимости от массовой доли суперпластификатора при доле нанокремнезема в 0,3 % от массы цемента

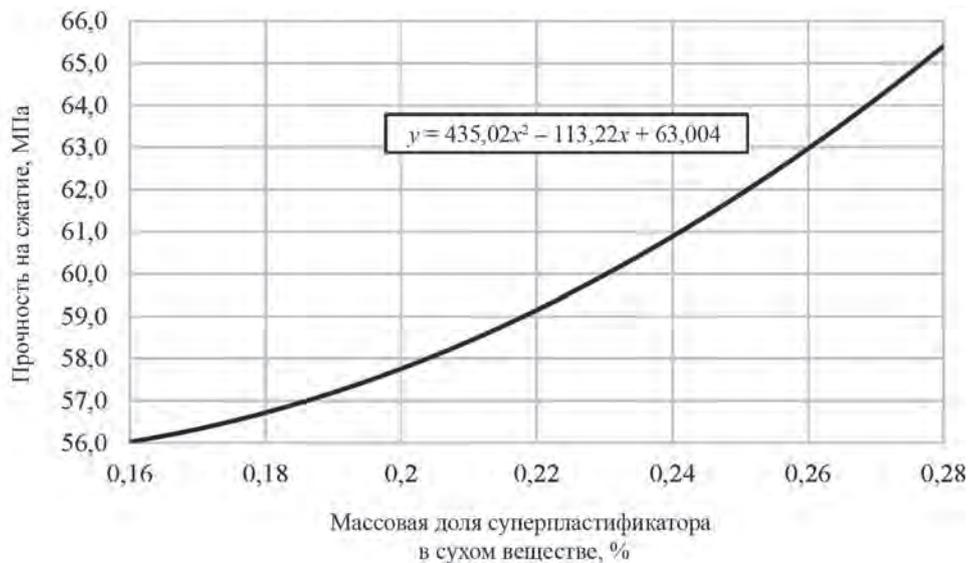


Рис. 4. Прочность на сжатие мелкозернистого бетона в возрасте 28 сут в зависимости от массовой доли суперпластификатора при доле нанокремнезема в 0,3 % от массы цемента

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании проведенных экспериментов и результатов их обработки можно сделать следующие выводы:

- введение нанокремнезема в доле 0,1...0,5 % от массы цемента положительно сказывается на прочности бетона при совместном использовании с медеплавильным шлаком и суперпластификатором;
- использование нанокремнезема при доле 0,3...0,5 % значительно уменьшает пластичность бетонной смеси, поэтому требует повышенного рас-

хода суперпластификатора на основе поликарбоксилатных эфиров;

- разработанные составы мелкозернистых бетонных смесей могут использоваться в густоармированных бетонных конструкциях, имеющих высокие требования по крупности заполнителей и пластичности бетонной смеси.

Полученные результаты являются частью комплексного изучения возможности утилизации отходов медеплавильного шлака на территории Южного Урала при производстве бетонных работ с помощью местных материалов. Явным преимуществом раз-

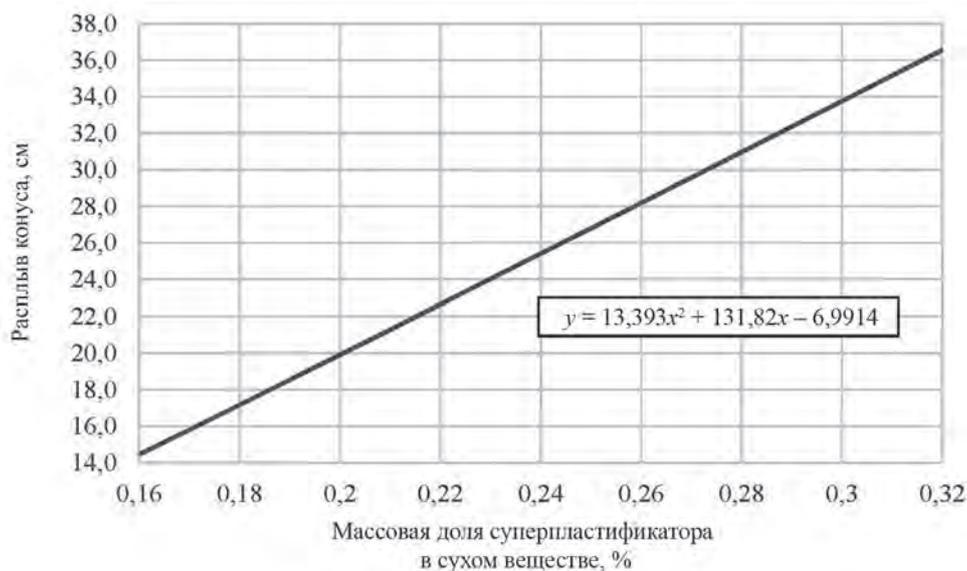


Рис. 5. Распыл конуса на встряхивающем столике бетонной смеси в зависимости от массовой доли суперпластификатора при доле нанокремнезема в 0,5 % от массы цемента

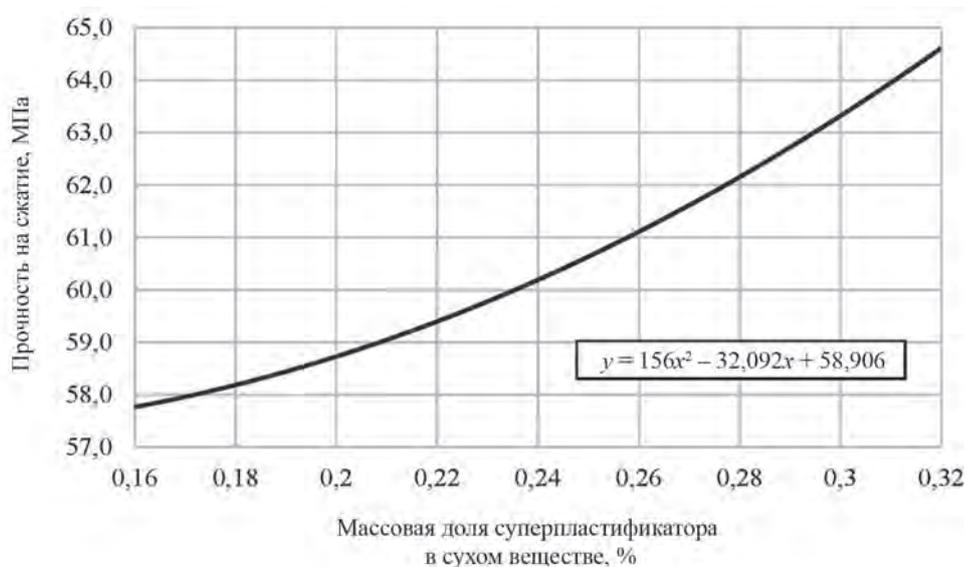


Рис. 6. Прочность на сжатие мелкозернистого бетона в возрасте 28 сут в зависимости от массовой доли суперпластификатора при доле нанокремнезема в 0,5 % от массы цемента

работанных составов являются улучшенные характеристики бетонной смеси и бетона при снижении затрат на производство бетонных работ.

В перспективе развития данного исследования находится изучение кинетики твердения разрабо-

танных бетонных смесей в течение всего марочного возраста бетона, а также изучение свойств тяжелых конструктивных бетонов с тонкомолотым медеплавильным шлаком и нанокремнеземом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 221 с.
2. Гудим Ю.А., Голубев А.А. Эффективные способы утилизации отходов металлургического

производства Урала // Экология и промышленность России. 2008. № 12. С. 4–8.

3. Худяков И.Ф., Кляйн С.Э., Агеев Н.Г. Металлургия меди, никеля, сопутствующих элементов и проектирование цехов. М. : Металлургия, 1993. 431 с.

4. Купряков Ю.П. Шахтная плавка вторичного сырья цветных металлов. М. : ЦНИИцветмет экономики и информации, 1995. 164 с.

5. Шаповалов Н.А., Загороднюк Л.Х., Тикунова И.В. и др. Шлаки металлургического производства — эффективное сырье для получения сухих строительных смесей // Фундаментальные исследования. 2013. № 1. С. 167–172.

6. Кравцов А.В., Цыбакин С.В., Виноградова Е.А., Бородина Л.М. Бетоны с органоминеральной добавкой на основе тонкомолотого шлака медеплавильного производства // Вестник МГСУ. 2016. № 2. С. 86–97.

7. Баженов Ю.М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2002. 500 с.

8. Баженов Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны // Технологии бетонов. 2012. № 3–4 (68–69). С. 39–42.

9. Гусев Б.В., Фаликман В.Р. Бетон и железобетон в эпоху устойчивого развития // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 2. С. 30–38.

10. Баженова С.И., Алимов Л.А. Высококачественные бетоны с использованием отходов промышленности // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 226–230.

11. Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Муртазаева Т.С., Хубаев М.С. Высококачественные модифицированные бетоны на основе минеральных добавок и суперпластификаторов различной природы // Инновации и инвестиции. 2015. № 8. С. 163–166.

12. Ларсен О.А., Дятлов А.К. Повышение эффективности мелкозернистых бетонов добавками поликарбоксилатных пластификаторов для монолитного домостроения // Технологии бетонов. 2013. № 10 (87). С. 14–15.

13. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6. С. 25–33.

14. Калашиников В.И. Высокопрочные самоуплотняющиеся мелкозернистые жаростойкие бетоны. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2015. 148 с.

15. Фаликман В.Р., Соболев К.Г. «Простор за пределом», или как нанотехнологии могут изменить мир бетона, ч. 1 // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2010. № 6. С. 17–31.

16. Соболев К. Современные достижения нанотехнологии в области цемента и бетона // Цемент и его применение. 2016. № 4. С. 96–102.

17. Баженов Ю.М., Королев Е.В., Лукутцова Н.П. и др. Высококачественные декоративные мелкозернистые бетоны, модифицированные наночастицами диоксида титана // Вестник МГСУ. 2012. № 6. С. 73–78.

18. Гончарова Н.С., Перцев В.Т., Власов В.В., Рубаков О.Б. Высококачественные бетоны на основе местных сырьевых материалов, модифицированных нанотрубками // Научный журнал строительства и архитектуры. 2012. № 2. С. 46–54.

19. Баженова С.И. Высококачественные бетоны на наномодификаторах техногенного происхождения // Вестник МГСУ. 2011. № 3–2. С. 172–175.

20. Потапов В., Ефименко Ю., Михайлова Н. и др. Применение нанокремнезема для повышения прочности бетона // Наноиндустрия. 2014. № 7 (53). С. 64–69.

21. Kuznetsova E.F., Sobolev G.M., Sobolev K. Self-Consolidating Green Concrete Based on Metakaolin and Aggregate Fines // Materials Research Society Proceedings. 2014. Vol. 1611. Pp. 75–80.

22. Nanotechnology and Nanoengineering of Construction Materials // Nanotechnology in Construction: Proceedings of NICOM5 / Sobolev K., Shah S.P. eds. Springer International Publishing, 2015. Pp. 3–13.

Поступила в редакцию в мае 2017 г.

Принята в доработанном виде в июне 2017 г.

Одобрена для публикации в августе 2017 г.

О Б АВТОРАХ: **Кравцов Алексей Владимирович** — аспирант кафедры технологии, организации и экономики строительства, **Костромская государственная сельскохозяйственная академия (Костромская ГСХА)**, 156530, Костромская обл., пос. Караваяево, Учебный городок, д. 34, kravtsov1992@yandex.ru;

Цыбакин Сергей Валерьевич — кандидат технических наук, доцент, декан архитектурно-строительного факультета, **Костромская государственная сельскохозяйственная академия (Костромская ГСХА)**, 156530, Костромская обл., пос. Караваяево, Учебный городок, д. 34, sv44kostroma@yandex.ru;

Евсеева Татьяна Михайловна — магистрант, **Костромская государственная сельскохозяйственная академия (Костромская ГСХА)**, 156530, Костромская обл., пос. Караваяево, Учебный городок, д. 34, evstate@mail.ru;

Соболев Константин Геннадьевич — кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и охраны окружающей среды, **Университет Висконсин-Милуоки**, п/я 784, Милуоки, Висконсин, 53201, США, sobolev@uwm.edu;

Потапов Вадим Владимирович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения РАН (НИГТЦ ДВО РАН), 683002, г. Петропавловск-Камчатский, Северо-Восточное шоссе, д. 30, vadim_p@inbox.ru.

REFERENCES

1. Kastornykh L.I. *Dobavki v betony i stroitel'nye rastvory* [Admixtures for Concrete and Mortars]. Ros-tov-on-Don, Feniks Publ., 2007, 221 p. (In Russian)
2. Gudim Yu.A., Golubev A.A. Effektivnye sposoby utilizatsii otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva Urala [Effective Methods of Disposal of Metallurgical Production Wastes in the Urals]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2008, no. 12, pp. 4–8. (In Russian)
3. Khudyakov I.F., Klyayn S.E., Ageev N.G. *Metallurgiya medi, nikelya, sopushtvuyushchikh elementov i proektirovanie tsekhov* [Metallurgy and Workshops Design of Copper, Nickel and Accompanying Elements]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1993, 431 p. (In Russian)
4. Kupryakov Yu.P. *Shakhtnaya plavka vtorichnogo syr'ya tsvetnykh metallov* [Mine Smelting of Secondary Raw Materials of Non-Ferrous Metals]. Moscow, TsNIItsvetmet ekonomiki i informatsii Publ., 1995. 164 p. (In Russian)
5. Shapovalov N.A., Zagorodnyuk L.Kh., Tikunova I.V. et al. Shlaki metallurgicheskogo proizvodstva — effektivnoe syr'e dlya polucheniya sukhikh stroitel'nykh smesey [Slag Metallurgical Production — Effective Feed Stock for Dry Mixes]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research]. 2013, no. 1, pp. 167–172. (In Russian)
6. Kravtsov A.V., Tsybakin S.V., Vinogradova E.A., Borodina L.M. Betony s organomineral'noy dobavkoy na osnove tonkomolotogo shlaka medeplavil'nogo proizvodstva [Concrete with Organic-Mineral Admixture Based on Fine Grinding Copper Slag]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 2, pp. 86–97. (In Russian)
7. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Concrete Technology]. Moscow, ASV Publ., 2007, 500 p. (In Russian)
8. Bazhenov Yu.M. Puti razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya: novye betony [Ways of Development of Building Materials: New Concrete]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2012, no. 3–4 (68–69), pp. 39–42. (In Russian)
9. Gusev B.V., Falikman V.R. Beton i zhelezobeton v epokhu ustoychivogo razvitiya [Concrete and Reinforced Concrete in the Era of Sustainable Development]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2016, no. 2, pp. 30–38. (In Russian)
10. Bazhenova S.I., Alimov L.A. Vysokokachestvennye betony s ispol'zovaniem otkhodov promyshlennosti [High-Quality Concrete Using Industrial Wastes]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2010, no. 1, pp. 226–230. (In Russian)
11. Salamanova M.Sh., Saydumov M.S., Murtazayeva T.S., Khubaev M.S. Vysokokachestvennye modifitsirovannye betony na osnove mineral'nykh dobavok i super-plastifikatorov razlichnoy prirody [High Quality Modified Concrete Based on Mineral Admixtures and Different Nature Superplasticizers]. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and Investment]. 2015, no. 8, pp. 163–166. (In Russian)
12. Larsen O.A., Dyatlov A.K. Povyshenie effektivnosti melkozernistykh betonov dobavkami polikarboksilatnykh plastifikatorov dlya monolitnogo domostroeniya [Improving the Efficiency of Fine-Grained Concrete by Polycarboxylate Plasticizers Admixtures for Monolithic Housing]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2013, no. 10 (87), pp. 14–15. (In Russian)
13. Ponomarev A.N. Vysokokachestvennye betony. Analiz vozmozhnostey i praktika ispol'zovaniya metodov nanotekhnologii [High-Quality Concretes. Analysis of Possibilities and the Practical Use of Nanotechnological Methods]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil Engineering Magazine]. 2009, no. 6, pp. 25–33. (In Russian)
14. Kalashnikov V.I. *Vysokoprochnye samouplotnyayushchiesya melkozernistye zharostoykie betony* [High-Strength Self-Compacting Fine-Grained Heat-Resistant Concretes]. Penza, Privolzhskiy Dom znaniy Publ., 2015, 148 p. (In Russian)
15. Falikman V.R., Sobolev K.G. «Prostor za predelom», ili kak nanotekhnologii mogut izmenit' mir betona, ch. 1 [“The space beyond the limits”, or as Nanotechnologies Can Change the Concrete World, part 1]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal* [Nanotechnologies in Construction: Scientific Web-Magazine]. 2010, no. 6, pp. 17–31. (In Russian)
16. Sobolev K. Sovremennye dostizheniya nanotekhnologii v oblasti tsementa i betona [Modern Achievements of Nanotechnology in the Field of Cement and Concrete]. *Tsement i ego primenenie* [Cement and Its Application]. 2016, no. 4, pp. 96–102. (In Russian)
17. Bazhenov Yu.M., Korolev E.V., Lukutsova N.P. et al. Vysokokachestvennye dekorativnye melkozernistye betony, modifitsirovannye nanochastitsami

dioksida titana [High-Quality Ornamental Fine Concretes Modified by Nanoparticles of Titanium Dioxide]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012, no. 6, pp. 73–78. (In Russian)

18. Goncharova N.S., Pertsev V.T., Vlasov V.V., Rubakov O.B. Vysokokachestvennyye betony na osnove mestnykh syr'evykh materialov, modifitsirovannykh nanotrubkami [High Quality Concretes on the Basis of Local Raw Materials, Modified Nanotubes]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury* [Scientific Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2012, no. 2, pp. 46–54. (In Russian)

19. Bazhenova S.I. Vysokokachestvennyye betony na nanomodifikatorakh tekhnogennogo proiskhozhdeniya [High Quality Concrete Based on Anthropogenic Ori-

gin Nanomodifiers]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 3–2, pp. 172–175. (In Russian)

20. Potapov V., Efimenko Yu., Mikhaylova N. et al. Primenenie nanokremnezema dlya povysheniya prochnosti betona [The Use of Nano Silica for Increasing the Strength of Concrete]. *Nanoindustrialiya* [Nano Industry]. 2014, no. 7 (53), pp. 64–69. (In Russian)

21. Kuznetsova E.F., Sobolev G.M., Sobolev K. Self-Consolidating Green Concrete Based on Metakolin and Aggregate Fines. *Materials Research Society Proceedings*. 2014, no. 1611, pp. 75–80.

22. Sobolev K., Shah S.P. eds. Nanotechnology and Nanoengineering of Construction Materials. *Nanotechnology in construction: proceedings of NICOM5*. Springer International Publishing, 2015, pp. 3–13.

Received in May 2017.

Adopted in revised form in June 2017.

Approved for publication in August 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Kravtsov Aleksey Vladimirovich** — Postgraduate student, Department of Building Technology, Management and Economy, **Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma SAA)**, 34 Uchebnyy gorodok, poselok Karavaevo, Kostromskaya oblast', 156530, Russian Federation; kravtsov1992@yandex.ru;

Tsybakin Sergey Valerievich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Architecture and Building Engineering, **Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma SAA)**, 34 Uchebnyy gorodok, poselok Karavaevo, Kostromskaya oblast', 156530, Russian Federation; sv44kostroma@yandex.ru;

Evseeva Tatyana Mihaylovna — Student, **Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma SAA)**, 34 Uchebnyy gorodok, poselok Karavaevo, Kostromskaya oblast', 156530, Russian Federation; evstate@mail.ru;

Sobolev Konstantin Gennadievich — Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Construction and Environmental Protection, **University of Wisconsin-Milwaukee**, P.O. Box 784, Wisconsin, Milwaukee, USA, 53201, sobolev@uwm.edu;

Potapov Vadim Vladimirovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Scientific Officer, **Scientific Research Geotechnological Center of the Far Easter Branch of the Russian Academy of Sciences**, 30 Severo-Vostochnoe shosse, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russian Federation; sv44kostroma@yandex.ru.