

Технология и эффективность использования золы бурых углей Лельчицкого месторождения в цементе и бетонных смесях

Докт. техн. наук, проф. Г. Д. Ляхевич¹⁾,
акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. И. И. Лиштван²⁾,
канд. экон. наук, доц. А. Г. Ляхевич¹⁾,
кандидаты техн. наук В. М. Дударчик²⁾, В. М. Крайко²⁾, асп. С. А. Звонник¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Институт природопользования НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. В современных представлениях о роли высокодисперсных добавок в бетонных смесях отмечается положительное влияние оптимального количества золы от сжигания твердого топлива на структуру и физико-механические характеристики цементных композиций: упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями с образованием кластеров «вяжущее – наполнитель» за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя; снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя; связывание гидроксида кальция аморфизованным кремнеземом пуццолановых наполнителей; повышение пуццоланической активности наполнителя при его тонком измельчении и др. Экспериментальными исследованиями установлено, что использование в сырьевых смесях портландцементного клинкера образцов золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения способствовало увеличению жизнеспособности и активности цемента. Получены образцы бетона с улучшенными физико-механическими свойствами благодаря введению в их состав 2–14 % (от массы цемента) золы от сжигания бурого угля и 1,6–2,1 % натриевой соли продукта конденсации сульфоксида ароматических углеводородов с формальдегидом. Эффективность выполненной работы подтвердилась решением вопросов увеличения жизнеспособности цементного теста, активности цемента, прочности бетона. Не менее важной решаемой проблемой является защита окружающей среды от загрязнений золой от сжигания высокозольных бурых углей.

Ключевые слова: технология, эффективность, зола, бурые угли, Лельчицкое месторождение, цемент, бетонные смеси

Для цитирования: Технология и эффективность использования золы бурых углей Лельчицкого месторождения в цементе и бетонных смесях / Г. Д. Ляхевич [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 104–112. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-104-112

Technology and Efficiency in Usage of Brown Coal Ash for Cement and Concrete Mixtures at the Lelchitsky Deposit

G. D. Lyahevich¹⁾, I. I. Lishtvan²⁾, A. G. Lyahevich¹⁾, V. M. Dudarchik²⁾, V. M. Kraiko²⁾, S. A. Zvonnik¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Institute for Nature Management of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Modern visions on the role of high-dispersity additives in concrete mixtures reflect a positive effect of optimal amount of ash left after combustion of solid fuel on structure and physico-mechanical characteristics of cement compositions: hardening of contact zone between cement stone and aggregates with formation of “binder – aggregate” clusters due to high surface energy of aggregate particles; reduction of total cement stone porosity in concrete while increasing volumetric concen-

Адрес для переписки

Ляхевич Генрих Деонисьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-64-77
mit_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Lyahevich Genrih D.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-64-77
mit_ftk@bntu.by

tration and aggregate dispersion; binding of calcium hydroxide by amorphized silicon of pozzolanic aggregates; increase in pozzolanic aggregate activity with its fine grinding, etc. Experimental investigations have ascertained that usage of portland cement clinker ash samples left after brown coal burning at the Lelchitsky deposit contributed to an increase of cement working life and activity. Concrete samples have been obtained that have improved physico-mechanical properties owing to introduction the following components in their composition: 2–14 % (of cement mass) of ash left after brown coal burning and 1.6–2.1 % of sodium salt that is a condensation product of sulfur oxidate in aromatic hydrocarbons with formaldehyde. Efficiency of the executed work has been proved by solution of the problems pertaining to an increase of neat cement working life, cement activity, concrete strength. The paper also considers no less important problem concerning protection of the environment from contamination with ash left after burning of high-ash brown coal.

Keywords: technology, efficiency, ash, brown coal, Lelchitsky deposit, cement, concrete mixtures

For citation: Lyahevich G. D., Lishtvan I. I., Lyahevich A. G., Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Zvonnik S. A. (2017) Technology and Efficiency in Usage of Brown Coal Ash for Cement and Concrete Mixtures at the Lelchitsky Deposit. *Science and Technique*. 16 (2), 104–112. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-104-112 (in Russian)

Введение

Улучшение физико-механических свойств цементобетона может быть достигнуто путем введения в бетонную смесь различных добавок и прежде всего золы от сжигания твердого топлива. В мире ежегодно образуется более 390 млн т золы, при этом используется ее менее 15 % [1]. Бетонные смеси с золой обладают большей связностью, меньшим водоотделением и расслоением. Бетон имеет при этом большие прочность, плотность, водонепроницаемость, стойкость к сульфатной коррозии, меньшую теплопроводность. Известные технологии производства цементных вяжущих веществ являются весьма трудо- и энергоемкими процессами. Они включают добычу материала из недр земли, его обогащение и многоступенчатую обработку: дробление, помол, сушку, обжиг и снова помол, а также способствуют существенному загрязнению окружающей среды: земли, воды и атмосферы. Все это приводит к высокой стоимости цементных вяжущих и бетонов на их основе.

Теоретические аспекты влияния золы от сжигания твердого топлива на бетон

Положительному влиянию золы на структурообразование бетона способствует эффект мелких порошков [2–5]. Факторы, которые считаются основными при оценке влияния высокодисперсных наполнителей на свойства цементного камня и бетона, связаны с физическим эффектом (эффектом микронаполнителя) либо с реакциями активных гидравлических составляющих. Эффект микронаполнителя проявляется в том, что мелкие частицы золы имеют более тонкий гранулометрический состав, чем порт-

ландцемент. Пуццолановая активность проявляется при любых способах введения добавок, а микронаполняющий эффект – лишь при росте содержания дисперсных частиц в смеси [6–8]. Но при высокой степени наполнения после достижения его максимума происходит уменьшение прочности бетона, несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня вследствие ухудшения сцепления наполненного цементного камня с заполнителем [9–20]. Увеличение количества наполнителя выше оптимального приводит к разбавлению цементного камня наполнителем, к нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера и уменьшению прочности.

При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Наглядным критерием этого состояния является достижение максимально плотной упаковки частиц в тесте, если частицы наполнителя значительно мельче частиц цемента, или достижение максимального насыщения цемента наполнителем без образования контактов частиц наполнителя между собой, если частицы наполнителя и цемента соизмеримы. Экспериментальные данные [14, 15] на цементном тесте с добавкой 20 % кремнеземистой пыли показали, что кремнеземистая пыль – побочный продукт производства ферросилиция – ускоряет гидратацию портландцемента и шлакопортландцемента уже в первые часы после затворения. Изучено влияние высокодисперсной золы на свойства бетона [16, 17]. Введение в бетон добавки высокодисперсной золы заметно влияет на его свойства. При осадке конуса бетонных смесей, равной 16,5–21,0 см, добавка высокодисперсной золы снижает расход супер-

пластификатора. Исследования выявили также, что добавка высокодисперсной золы способствует повышению сульфатостойкости бетона (при использовании добавки в сочетании с высокоалюминатным цементом). Установлено, что при содержании в бетоне золы в количестве 8 % от массы цемента он отличается высокой, а при содержании золы 12 и 16 % очень высокой сульфатостойкостью.

При изучении морозостойкости образцы бетона с добавкой 8 % микрокремнезема и бетона с добавкой 12 % золы-уноса подвергали воздействию 900 циклов попеременного замораживания-оттаивания. Проведенные испытания не выявили заметного снижения динамического модуля упругости образцов из бетона всех составов. Установлено также, что бетон с добавкой высокодисперсной золы меньше подвержен трещинообразованию в результате развития усадочных деформаций, чем бетон с добавкой микрокремнезема [16–20]. Введение в бетон высокодисперсной золы оказывает положительное влияние на его свойства, в частности снижает его хлоридопроницаемость, что дает возможность значительно повысить долговечность железобетонных элементов в условиях эксплуатации, подвергающихся воздействию хлоридов. Можно считать, что применение в бетоне добавки высокодисперсной золы в количестве 8–12 мас. % придает ему эксплуатационные свойства, которые эквивалентны свойствам бетона с добавкой 8 % микрокремнезема.

Характеристика золы от сжигания твердого топлива

Строение и состав золы зависят от целого комплекса одновременно действующих факторов: вида и морфологических особенностей сжигаемого топлива; тонкости помола в процессе его подготовки; зольности топлива; химического состава минеральной части топлива; температуры в зоне горения; времени пребывания частиц в этой зоне и др. Одна из существенных характеристик золы как активной минеральной добавки в бетон – ее гидравлическая активность. Традиционными методами она определяется по способности золы поглощать известь из известкового раствора, а также про-

являть вяжущие свойства в сочетании с гидратной известью.

Требования к золам как к активным минеральным добавкам в бетонную смесь обусловлены физико-химическим механизмом их влияния на процессы твердения и структурообразования бетона. Гидравлическая активность зол, как и других веществ пуццоланового типа, в значительной мере обусловлена химическим взаимодействием входящих в них оксидов кремния и алюминия с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе клинкерных минералов, с образованием гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. Гидратации зол способствует их стекловидная фаза, а кристаллическая фаза в этом процессе практически инертна. Химическая активность зол непосредственно связана также с их дисперсностью.

Зола представляет собой преимущественно силикатное стекло, слагающий его аморфный кремнезем химически активен по отношению к $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющемуся при гидратации цемента (так называемая пуццоланическая активность). Реакция между ними приводит к образованию высокодисперсных гидросиликатов кальция (типа $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) с высокой связующей способностью взамен малопрочного $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Кроме пуццоланического эффекта, зола оказывает на бетон и значительное физическое воздействие, которое принято называть эффектом микронаполнителя. В чистом виде он проявляется в повышении прочности при введении в бетон инертных порошков. Его основой можно считать увеличение концентрации дисперсных частиц в цементном тесте, что вызывает снижение пористости теста. Введение золы улучшает зерновой состав цементно-песчаной составляющей, уменьшает расслоение бетонной смеси и повышает однородность бетона. Следует отметить, что «стабилизирующая» роль золы возрастает в связи с тенденцией применения в монолитном строительстве все более подвижных смесей с повышенной склонностью к расслоению.

При увеличении расхода цемента расслоение бетонной смеси снижается, но повышается тепловыделение твердеющего бетона, что может привести к образованию микротрещин уже на ранних стадиях твердения. Сокращение расхода цемента при введении золы снижает тепловыделение и вероятность образования

термических микротрещин, что также улучшает структуру бетона. В массивном бетоне опасность микротрещин существенно возрастает, и положительная роль золы проявляется во всем диапазоне расхода цемента.

Согласно ГОСТ 25818–91, золы-уноса в зависимости от качественных показателей подразделяют на четыре вида:

I – для железобетонных конструкций и изделий из тяжелого и легкого бетонов;

II – для бетонных конструкций и изделий из тяжелого и легкого бетонов, строительных растворов;

III – для изделий и конструкций из ячеистого бетона;

IV – для бетонных и железобетонных изделий и конструкций, работающих в особо тяжелых условиях (гидротехнические сооружения, дороги, аэродромы и др.).

В пределах отдельных видов дополнительно выделяют классы золы для бетонов: А – тяжелого; Б – легкого. Удельная поверхность золы класса А должна быть не менее 2800 см²/г, а класса Б – 1500–4000 см²/г. Влажность золы сухого отбора – не более 3 %.

Экспериментальная часть

Сырьевая смесь для получения портландцементного клинкера

Исследовались сырьевые смеси для получения портландцементного клинкера, для чего использованы: глинистый, железосодержащий, известняковый компоненты ОАО «Красносельскстройматериалы», зола от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь. Золы от сжигания бурых углей (образцы № 1, 2) Лельчицкого месторождения получены в лабораторных условиях Института экологии НАН Беларуси.

Образец золы № 1 имел следующий химический состав, мас. %: SiO₂ – 53,00; Al₂O₃ – 23,00; Fe₂O₃ – 11,40; CaO – 6,57; MgO – 0,90; MnO – 0,12; K₂O – 1,37; Na₂O – 0,25; TiO₂ – 0,82; P₂O₅ – 0,14; SO₃ – 2,43; потери массы при прокаливании 1,66; влажность 0,39; остаток на сите № 008 – 4,5.

Для определения активности цементного камня, полученного из тонко измельченного клинкера совместно с 2,8 мас. % гипса, использовали кварцевый песок (ГОСТ 6139–78), водо-

проводную воду, которая отвечала требованиям СТБ 1114. Испытания исходных и полученных материалов проводили согласно [21, 22].

Технология получения клинкера

В заданном соотношении компоненты клинкерной сырьевой смеси перемешивали, измельчали и подвергали обжигу в печи при температуре 1400–1450 °С. Полученный клинкер охлаждали и размалывали совместно с гипсом до удельной поверхности 3200–3500 см²/г. Составы сырьевых смесей и активность цементов, полученных с использованием этих смесей, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Составы сырьевой смеси для получения портландцементного клинкера
Composition of raw mixture for obtaining portland cement clinker

№ образца	Компонент в сырьевой смеси, мас. %			
	Глинистый	Железосодержащий	Известняковый	Зола от сжигания бурых углей (образец № 1)
1	1,51	7,59	79,03	11,87
2	1,60	8,70	79,10	10,60
3	1,79	9,37	80,82	8,02
4	2,86	9,83	80,67	6,64
5	4,34	10,46	80,12	5,08
6	6,50	10,80	80,07	2,63
7	8,19	11,85	78,76	1,20

Анализ данных табл. 2 показывает, что введение в сырьевую смесь для получения портландцементного клинкера золы от сжигания бурого угля (образец № 1) в пределах от 2,63 до 10,60 мас. % обеспечивает получение цемента с активностью: предел прочности на осевое сжатие 53,5–58,0 МПа (табл. 2, образцы № 3, 6), предел прочности на растяжение при изгибе 5,23–5,75 МПа. В случае уменьшения (до 1,20 мас. %) или увеличения содержания золы (до 11,87 мас. %) (образцы № 1, 7) качество образцов цемента снижалось. опыты показали, что использование в сырьевых смесях портландцементного клинкера золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения расширяет сырьевую базу для производства цемента с обеспечением его прочностных характеристик, отвечающих современным стандартам.

Таблица 2

Жизнеспособность и активность цементов, полученных путем совместного помола образцов портландцементного клинкера с 2,8 мас. % гипса
Life cycle and activity of cement obtained while using mixed grinding of portland cement clinker samples with gypsum constituting 2.8 % of clinker mass

№ образца	Время помола клинкера, мин	Жизнеспособность цементного теста, мин	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
1	35	89	5,18	52,5
2	35	82	5,75	58,0
3	35	76	5,56	56,0
4	35	68	5,42	55,0
5	35	63	5,38	54,5
6	35	54	5,23	53,5
7	40	48	4,26	51,0

Примечание. Жизнеспособность цементного теста – его способность продолжительное время сохранять свои первоначальные свойства. Определяется сроком схватывания цементного теста – временной интервал от момента затворения цемента водой до начала твердения (игла прибора Вика не доходит 1–2 мм до пластинки, на которой установлено кольцо, заполненное исследуемым материалом).

Таким образом, разработана и исследована сырьевая смесь для получения портландцементного клинкера, включающая глинистый, железосодержащий, известняковый компоненты и дополнительно содержащая золу от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения, при следующем соотношении компонентов, мас. %: глинистый компонент 1,6–6,5; железосодержащий компонент 8,7–10,8; зола от сжигания бурых углей 1,2–10,6; известняковый компонент – остальное.

Бетонная смесь

Для решения задачи применения золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения в бетонных смесях были использованы:

– цемент марки М500 ОАО «Красносельскстройматериалы» ПЦ-Д0 с тонкостью помола 93,4 %, истинной плотностью 3,1051 г/см³, величиной удельной поверхности 3048 см²/г, активностью 50,4 МПа;

– крупный заполнитель – щебень производства ГП «Гранит» (г. п. Микашевичи) с максимальной крупностью зерен 20 мм. Физико-механические свойства щебня: насыпная плотность 1438 кг/м³, плотность 2681 кг/м³, водо-

поглощение 1,49 мас. %, дробимость 6,4 %, содержание глинистых и пылеватых частиц 0,75 мас. %, влажность 0,58 мас. %;

– песок кварцевый для строительных работ, ГОСТ 6139–78, с модулем крупности $M_k = 2,03$;

– для затворения бетонных смесей применялась водопроводная вода, которая отвечала требованиям СТБ 1114;

– зола от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения (табл. 1, образец золы № 2) имела следующий химический состав, мас. %: SiO₂ – 57,31; Al₂O₃ – 33,86; Fe₂O₃ – 3,77; CaO – 3,46; MgO – 0,19; MnO – 0,04; TiO₂ – 0,83; SO₃ – 0,54. Потери при прокаливании 1,02; влажность 0,57; остаток на сите № 008 – 2,6;

– суперпластификатор – натриевая соль продукта конденсации сульфоксида ароматических углеводородов с формальдегидом (НСПКСАУсФ-1). Он имел следующие качественные показатели: массовая доля сухих веществ 62,3 %, плотность при 20 °С 1,2756 г/см, показатель активности водородных ионов 8,12. Добавка НСПКСАУсФ-1 позволяет существенно повысить удобоукладываемость бетонных смесей.

Водонепроницаемость образцов определяли по ГОСТ 12730.5–84, прочность – по ГОСТ 10180–90 на гидравлическом прессе.

Технология приготовления бетонной смеси и испытание образцов бетона

Бетонную смесь готовили следующим образом: цемент, золу от сжигания бурых углей (табл. 1, образец № 2) и суперпластификатор подвергали домолу в мельнице с получением высокодисперсной массы, которую вводили в работающую мешалку, сюда же доливали расчетное количество воды, загружали мелкий и крупный заполнители, содержимое перемешивали в течение 1–2 мин. Затем полученную бетонную смесь выгружали и подвергали испытаниям. Испытания проводили согласно [21, 22].

Составы бетонных смесей и физико-механические показатели бетонов, полученных из этих смесей, приведены в табл. 3, 4. Анализ данных табл. 3, 4 показывает, что при увеличении содержания в бетонной смеси золы от сжигания бурых углей в количестве от 2 до 12 мас. % (табл. 3, составы № 1–6) предел прочности бетона на осевое сжатие 53,6–65,4 МПа, а для контрольного состава 50,7 МПа, т. е. этот показатель в 1,1–1,3 раза больше, чем для контрольного образца. Марка по водонепроницаемости для бетонов, полученных по составам № 2–7, была выше, чем у контрольного образца.

Составы бетонных смесей
Composition of concrete mixtures

№ состава	Состав бетонной смеси, мас. %				Добавка, % от массы цемента	
	Щебень	Песок	Цемент ПЦ500	Вода	Зола от сжигания бурых углей (табл. 1, образец № 2)	Суперпластификатор НСПКСАУсФ-1
Контрольный	46,9	15,9	24,8	12,4	–	–
1	50,6	15,9	24,8	8,7	2	1,6
2	50,6	15,9	24,8	8,7	4	1,6
3	50,6	15,9	24,8	8,7	6	1,8
4	50,6	15,9	24,8	8,7	8	1,8
5	50,6	15,9	24,8	8,7	10	1,8
6	50,6	15,9	24,8	8,7	12	1,9
7	50,6	15,9	24,8	8,7	14	2,1

Таблица 4

Физико-механические показатели бетонов, содержащих золу от сжигания бурого угля Лельчицкого месторождения

Physical and mechanical indices of concrete containing ash left after brown coal burning at the Lelchitsky deposit

№ состава	Физико-механический показатель бетона		
	Осадка конуса ОК, см	Предел прочности бетона на осевое сжатие, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
Контрольный	5,7	50,7	W4
1	6,8	53,6	W4
2	7,4	54,8	W6
3	10,3	56,9	W6
4	10,8	59,7	W8
5	16,5	65,1	W10
6	17,1	65,4	W12
7	20,7	52,8	W14

Зола положительно влияет на структурообразование цементного камня благодаря эффекту мелких порошков, расширяющих свободное пространство, в котором осаждаются продукты гидратации. Микронаполняющий эффект проявляется при увеличении объемной концентрации тонкодисперсного наполнителя, приводящей к снижению пористости цементного камня в бетоне. В присутствии тонкодисперсного наполнителя – золы от сжигания бурого угля (табл. 3, образец № 2) – происходит упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителем в бетонах. В нормальных порт-

ландцементных бетонах зона контакта обычно менее плотная, чем массивное тесто, и включает большое количество пластинчатых кристаллов гидроксида кальция, у которых продольная ось перпендикулярна поверхности заполнителя. Следовательно, она более подвержена образованию микротрещин при растягивающих усилиях, возникающих при изменениях обычных условий температуры и влажности.

Контактная зона из-за своей структуры является наиболее слабым звеном в бетоне и поэтому оказывает большое влияние на его прочность. Введение золы в значительной степени снижает капиллярную пористость контактной зоны за счет резкого уменьшения общего содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В то же время рост содержания гидросиликата кальция в непосредственной близости от поверхности заполнителя положительно сказывается на свойствах контактной зоны. В связи с этим отмечается положительное влияние на микроструктуру контактной зоны при введении сравнительно небольшого количества золы от сжигания бурых углей (табл. 3, образец № 2) с высокой степенью дисперсности и реакционной способности.

При содержании золы 14 мас. % (табл. 3, образец № 7) предел прочности бетона на осевое сжатие снизился до 52,8 МПа. Это можно объяснить тем, что при высокой степени наполнения после достижения его максимума происходит уменьшение прочности бетонов, несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня вследствие ухудше-

ния сцепления наполненного цементного камня с наполнителем. Увеличение количества наполнителя более оптимального приводит к разбавлению цементного камня наполнителем, нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера и уменьшению прочности.

При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Наглядным критерием этого состояния является достижение максимально плотной упаковки частиц в тесте, если частицы золы значительно мельче частиц цемента. В смешанной системе цемента с высокодисперсным материалом важно, чтобы частицы ультрадисперсного материала не обволакивали поверхность новых фаз и не препятствовали образованию контактов срастания между кристаллогидратами. Это условие может быть соблюдено при оптимизации объемной концентрации дисперсного материала в смешанной системе с учетом гидравлической активности наполнителя. Для инертного наполнителя оптимальной дозировкой может быть объем, сопоставимый с объемом капиллярных пор и необходимый для заполнения соответствующих пустот, а также уплотнения структуры.

Эффект заполнения пустот является физическим фактором и наблюдается независимо от гидравлической активности дисперсного материала. Однако увеличение дозировки сверх объема указанных пор в зависимости от гидравлической активности может привести к противоположным результатам. Полученные данные показывают, что при повышенном объеме содержания инертного микронаполнителя эффект заполнения пустот и уплотнения структуры не может компенсировать негативного воздействия микронаполнителя на контакты срастания, поэтому прочность снижается. В то же время марка бетона по водонепроницаемости повысилась до W14 (табл. 4) в результате повышения плотности и соответственно уменьшения пористости образцов бетона благодаря повышенному объемному содержанию инертного микронаполнителя – эффекта заполнения пустот и уплотнения структуры. Таким образом, введение в бетонную смесь золы от сжига-

ния высокозольных бурых углей Лельчицкого месторождения Беларуси совместно с суперпластификатором НСПКСАУсФ-1 обеспечивает улучшение физико-механических показателей образцов бетона (табл. 4).

Практическая значимость, экономическая и экологическая эффективность использования зол от сжигания бурого угля

Практическая значимость проведенной работы достигнута благодаря:

- разработке составов сырьевых смесей для получения клинкера, содержащих золу от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь;
- технологии получения цементов на основе этих сырьевых смесей, установлению оптимального количества золы, обеспечивающего улучшенные показатели качества цемента;
- разработке составов и технологии приготовления бетонных смесей, содержащих золу от сжигания бурых углей, при этом смеси с золой обладали большей связностью, меньшими водоотделением и расслоением;
- изготовлению образцов бетона, отличающихся повышенными физико-механическими показателями, прежде всего пределом прочности бетона на осевое сжатие, водонепроницаемостью.

Экономическая и экологическая эффективность выполненной работы достигнута благодаря использованию золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь. Благодаря этому расширяется сырьевая база для получения качественных вяжущих, бетонов. Не менее важными решаемыми экономическими и экологическими задачами являются исключение расходов на вывоз и захоронение трудно утилизируемых отходов зол от сжигания высокозольного бурого угля, а также защита окружающей среды от загрязнений.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа современных представлений о роли высокодисперсных добавок в бетонных смесях можно утверждать о положительном влиянии золы от сжигания твердого топлива на структуру и физико-механические

характеристики цементных композиций: упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями с образованием кластеров «вяжущее – наполнитель» за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя; снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя, связывание гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ кристаллогидратной связки аморфизированным кремнеземом пуццолановых наполнителей; повышение пуццоланической активности наполнителя при его тонком измельчении и др.

2. Положительному влиянию золы на структурообразование бетона способствует эффект мелких порошков, расширяющих свободное пространство, в котором осаждаются продукты гидратации. Микронаполняющий эффект проявляется при увеличении объемной концентрации тонкодисперсного наполнителя, приводящей к снижению пористости цементного камня в бетоне. При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Эффект заполнения пустот является физическим фактором и наблюдается независимо от гидравлической активности золы. Однако увеличение дозировки минерального наполнителя сверх объема пор и трещин может привести к снижению качественных показателей бетона.

3. Экспериментальными исследованиями установлено, что использование в сырьевых смесях портландцементного клинкера золы от сжигания бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь способствовало увеличению жизнеспособности и активности цемента.

4. Получены образцы бетона с улучшенными физико-механическими свойствами благодаря применению 2–14 % (от массы цемента) золы от сжигания бурых углей и 1,6–2,1 % суперпластификатора – натриевой соли продукта конденсации сульфоксида ароматических углеводородов с формальдегидом.

5. Эффективность выполненной работы подтвердилась решением вопросов увеличения жизнеспособности цементного камня, активности цемента, прочности и водонепроницаемости бетона, расширения сырьевой базы для по-

лучения цемента, бетона для мостовых конструкций. Важнейшей решенной проблемой является защита окружающей среды от загрязнений золой от сжигания высокозольных бурых углей Лельчицкого месторождения Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геополимербетон с золой уноса [Электронный ресурс] // Строительный мир. Режим доступа: <http://www.stroinauka.ru/dl9dr5492m2.html>. Дата доступа: 11.01.2006.
2. Волженский, А. В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / А. В. Волженский, И. А. Иванов, Б. Н. Виноградов. М.: Стройиздат, 1984. 247 с.
3. Рыбьев, И. А. Создание строительных материалов с заданными свойствами / И. А. Рыбьев, А. А. Жданов // Известия вузов. Строительство. 2003. № 3. С. 45–48.
4. Баженов, Ю. М. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин // Известия вузов. Строительство. 1996. № 7. С. 55–58.
5. Власов, В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками / В. К. Власов // Бетон и железобетон. 1993. № 4. С. 10–12.
6. Власов, В. К. Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя / В. К. Власов // Бетон и железобетон. 1988. № 10. С. 9–11.
7. Высоцкий, С. А. Минеральные добавки для бетонов / С. А. Высоцкий // Бетон и железобетон. 1994. № 2. С. 7–10.
8. Bastian, S. Wodoszczelnosc Betonow z Popiolow Lotnych / S. Bastian // Przegląd Budowlany. 1971. No 6. P. 319–329.
9. Berry, E. E. Fly Ash for Use in Concrete – a Critical Review / E. E. Berry, V. M. Malhotra // ACI Journal. 1980. Vol. 77, No 2. P. 59–73.
10. Composite Cementless Binder from Mechanical Active Industrial Wastes Text / Yu. M. Bazhenov [et al.] // Proceedings of the 5 International Symposium on the Cement and Concrete Shanghai, China, 2002, Oct. 28–Nov. 1. P. 832–840.
11. Feng, Nai-Qian. High-Strength and Flowing Concrete with a Zeolitic Mineral Admixture / Nai-Qian Feng, Li Gui-Zhi, Zang Xuan-Wu // Cements, Concrete and Aggregates. 1990. Vol. 12, No 2. P. 61–69.
12. Larbi, J. A. The Chemistry of the Pole Fluid of Silica Fume-Blended Cement Systems / J. A. Larbi, J. M. Bijen // Cem. and Concr. Res. 1990. Vol. 20, No 4. P. 506–516.
13. Malhotra, V. M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice and Case Histories / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. Ottawa, Canada: Printed by Marguardt Printing Ltd., 2002. P. 101.
14. Matsufuji, Y. Прочностные характеристики растворов, содержащих сверхтонкие частицы / Y. Matsufuji, H. Kohhata, S. Harada // Semento Konkurito Ronbunshu = CAJ Proc. Cem. and Concr. 1991. No 45. P. 264–269.

15. Sarkar Shondeep, L. Microstructure of a Very Low Water/Cement Silica Fume Concrete / L. Sarkar Shendeep // *Microscope*. 1990. Vol. 38, No 2. P. 141–152.
16. Xu, Ziyi. Research on Super Fine Fly Ash and its Activity / Ziyi Xu, Liu Linzhy // *Proc. Beijing Int. Symp. Cem. and Concr.*, Beijing, May 14–17, 1985. 1985. Vol. 1. P. 493–507.
17. Бабков, В. В. Аспекты формирования высокопрочных и долговечных цементных связок в технологии бетонов / В. В. Бабков, И. Ш. Каримов, П. Г. Комохов // *Известия вузов. Строительство*. 1996. № 4. С. 41–48.
18. Зоткин, А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне / А. Г. Зоткин // *Бетон и железобетон*. 1994. № 3. С. 7–9.
19. Каприелов, С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С. С. Каприелов // *Бетон и железобетон*. 1995. № 6. С. 16–20.
20. Красный, И. М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей / И. М. Красный // *Бетон и железобетон*. 1987. № 5. С. 10–11.
21. Леонович, И. И. Испытание дорожно-строительных материалов / И. И. Леонович, В. А. Стрижевский, К. Ф. Шумчик. Минск: Высш. шк., 1991. 233 с.
22. Горшков, В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. М.: Высш. шк., 1981. 335 с.
8. Bastian S. (1971) Wodoszczelnosc Betonow z Popiolow Lotnych. *Przeglad Budowlany*, (6), 319–329 (in Polish).
9. Berry E. E., Malhotra V. M. (1980) Fly Ash for Use in Concrete – a Critical Review. *Journal of the American Concrete Institute*, 77 (2), 59–73.
10. Bazhenov Yu. M., Magdejev U. Kh, Pavlenko S. I., Kulagin N. M., Aksenov A. V., Tkachenko V. V., Dobretsov N. L., Lyakhov N. Z., Avvakumov, E. G. (2002) Composite Cementless Binder from Mechanical Active Industrial Wastes Text. *Proceedings of the 5 International Symposium on the Cement and Concrete Shanghai, China, Oct. 28.–Nov. 1*, 832–840.
11. Feng Nai-Qian, Li Gui-Zhi, Zang Xuan-Wu (1990) High-Strength and Flowing Concrete with a Zeoitic Mineral Admixture. *Cements, Concrete and Aggregates*, 12 (2), 61–69. DOI: 10.1520/CCA10273J.
12. Larbi J. A., Bijen J. M. (1990) The Chemistry of the Pole Fluid of Silica Fume-Blended Cement Systems. *Cement and Concrete Research*, 20 (4), 506–516. DOI:10.1016/0008-8846(90)90095-F.
13. Malhotra V. M., Mehta P. K. (2002) High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice and Case Histories. Ottawa, Canada: Printed by Marguardt Printing Ltd. 101.
14. Matsufuji Y., Kohhata H., Harada S. (1991) Strength Characteristics of Solutions Containing Superfineparticles. *Semento Konkurito Ronbunshu = CAJ Proc. Cem. and Concr.*, 45, 264–269.
15. Sarkar Shondeep L. (1990) Microstructure of a Very Low Water/Cement Silica Fume Concrete. *Microscope*, 38 (2), 141–152.
16. Xu Ziyi, Liu Linzhy (1985) Research on Super Fine Fly Ash and its Activity. *Proc. Beijing Int. Symp. Cem. and Concr.*, Beijing, May 14–17, 1, 493–507.
17. Babkov V. V., Karimov I. Sh., Komokhov P. G. (1996) Aspects for Formation of Highly-Strong and Durable Cement Binding Material in Concrete Technology. *Izvestia Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Education Institutions. Construction], (4), 41–48 (in Russian).
18. Zotkin A. G. (1994) Micro-Filling Effect of Mineral Additives in Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (3), 7–9 (in Russian).
19. Kaprielov S. S. (1995) General Regularities in Formation Cement Stone Structure and Concrete with Additive of Ultra-Disperse Materials. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (6), 16–20 (in Russian).
20. Krasny I. M. (1987) On Mechanism for Improving Concrete Strength while Introducing Micro-Fillers. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (5), 10–11 (in Russian).
21. Leonovich I. I., Strizhevsky V. A., Shumchik K. F. (1991) *Testing of Road-Construction Materials*. Minsk, Vysshaya Shkola. 233 (in Russian).
22. Gorshkov V. S., Timashev V. V., Saveliev V. G. (1981) *Methods for Physical and Chemical Analysis of Binders*. Moscow, Vysshaya Shkola. 335 (in Russian).

Поступила 24.03.2016

Подписана в печать 27.05.2016

Опубликована онлайн 28.03.2017

REFERENCES

1. Geopolymer Concrete with Pulverized Fuel Ash. *Stroitelny Mir* [Construction World]. Available at: <http://www.stroinauka.ru/dl9dr5492m2.html>. (Accessed 11 January 2006) (in Russian).
2. Volzhensky A. V., Ivanov I. A., Vinogradov B. N. (1984) *Application of Ash and Furnace Clinker for Production of Construction Materials*. Moscow, Stroyizdat. 247 (in Russian).
3. Rybiev I. A., Zhdanov A. A. (2003) Development of Construction Materials with Prescribed Properties. *Izvestia Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Education Institutions. Construction], (3), 45–48 (in Russian).
4. Bazhenov Yu. M., Alimov L. A., Voronin V. V. (1996) Development of Theory for Formation of Structure and Properties of Concrete with Technogenic Waste. *Izvestia Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Education Institutions. Construction], (7), 55–58 (in Russian).
5. Vlasov V. K. (1993) Regularities on Optimization of Composition for Concrete with Disperse Mineral Additives. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (4), 10–12 (in Russian).
6. Vlasov V. K. (1988) Mechanism for Improving Concrete Strength While Introducing Micro-Filler. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (10), 9–11 (in Russian).
7. Vysotsky S. A. (1994) Mineral Additives for Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (2), 7–10 (in Russian).

Received: 24.03.2016

Accepted: 27.05.2016

Published online: 28.03.2017