

УДК 624.26:666.97

Поступила в редакцию 12.10.2018  
Received 12.10.2018

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ТОРФО-ДРЕВЕСНОГО И ТОРФЯНОГО ТОПЛИВА В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

Г. Д. Ляхевич<sup>2</sup>, И. И. Лиштван<sup>1</sup>, А. Г. Ляхевич<sup>2</sup>, В. А. Гречухин<sup>2</sup>,  
В. М. Дударчик<sup>1</sup>, В. М. Крайко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

**Аннотация.** Одним из основных путей улучшения физико-механических свойств цементобетона является введение в бетонную смесь торфяной золы и микрокремнезема. Обязательным условием при изготовлении высокопрочных бетонов является использование пластификаторов в качестве химических добавок.

В представленной работе для изготовления высокопрочных бетонов использована зола, полученная от сжигания торфо-древесных смесей, фрезерного торфа на энергопредприятиях Брестское РУП электроэнергетики «Брестэнерго»; Минское РУП «Минскэнерго», Жодинская ТЭЦ Республики Беларусь, а также микрокремнезем МК-85 и суперпластификатор С-3, которые производятся в промышленных условиях.

Использование исследованной золы совместно с микрокремнеземом МК-85 и суперпластификатором С-3 для производства бетонных и железобетонных конструкций будет способствовать расширению сырьевой базы для изготовления строительных конструкций с одновременным уменьшением расхода дорогостоящего компонента – цемента, а также защите окружающей среды от дисперсной золы, загрязняющей воздушный бассейн, поверхностные и подземные воды, землю.

**Ключевые слова:** зола; торфо-древесные смеси; цементобетон; физико-механические свойства; бетонные; железобетонные конструкции; эффективность использования.

**Для цитирования.** Ляхевич Г. Д., Лиштван И. И., Ляхевич А. Г., Гречухин В. А., Дударчик В. М., Крайко В. М. Использование золы от сжигания торфо-древесного и торфяного топлива в качестве компонента высокопрочного бетона // Природопользование. – 2018. – № 2. – С. 119–127.

## USE OF ASH FROM BURNING PEAT-WOOD AND PEAT FUEL AS THE COMPONENT OF HIGH-STRENGTH CONCRETE

G. D. Lyakhevich<sup>2</sup>, I. I. Lishtvan<sup>1</sup>, V. A. Grechukhin<sup>2</sup>, A. G. Lyakhevich<sup>2</sup>,  
U. M. Dudarchyk<sup>1</sup>, V. M. Kraiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Abstract.** One of the main ways to improve the physical and mechanical properties of cement is to introduce peaty ash and microsilica into the concrete mixture. The obligatory condition for the production of high-quality concrete is the use of plasticizers as chemical additives.

In the presented work for the production of high-strength concretes, ashes were used from the combustion of torpho-wood mixtures, milled peat at the energy enterprises Brest RUE electric power industry “Brestenergo”; The Minsk Republican Unitary Enterprise “Minskenergo” Zhodinskaya CHPP of the Republic of Belarus, as well as microsilica МК-85 and the superplasticizer S-3, which are manufactured in industrial conditions.

Factors of the positive influence of high-dispersion additives on the structure and physicomachanical characteristics of cementitious compositions, namely: decrease in the total porosity of the cement stone in concrete with increasing volume concentration and the dispersity of the filler, binding of calcium hydroxide Ca (OH)<sub>2</sub> amofiizovannym cream of pozzolanovyh fillers. The use of the investigated sols together with microsilica МК-85, superplasticizer S-3 for the production of concrete and reinforced concrete structures will help solve important problems, such as: the extension of the raw material base for the manufacture of building structures with a simultaneous reduction in the consumption of an expensive cement component, as well as a number of advantages associated with high physical and the technical parameters of concretes, which ensure a high durability of structures, long-term operational availability and reliability of their and other; protection of the environment from dispersed ash, polluting the air basin, surface and groundwater, land.

**Key words:** ash; peat-and-wood mixtures; cement concrete; physical and mechanical properties; concrete; reinforced concrete structures; efficiency of use.

**For citation.** Lyakhevich G. D., Lishtvan I. I., Grechukhin V. A., Lyakhevich A. G., Dudarchyk U. M., Kraiko V. M. Use of ash from burning peat-wood and peat fuel as the component of high-strength concrete. *Nature Management*, 2018, no. 2, pp. 119–127.

**Введение.** При сжигании твердого топлива ежегодно образуется до ста тысяч тонн золы и шлаков. Эти промышленные твердые материалы практически не используются, а складываются на отведенных территориях. Поэтому существует большая проблема возрастающего загрязнения окружающей среды. Токсико-гигиеническая оценка этих материалов показала опасность негативного воздействия их на окружающую среду и на здоровье человека.

С одной стороны, с учетом состава, физико-химических свойств, токсического и фитотоксического действия золошлаковые отходы, образующиеся при сжигании твердого топлива, отнесены к промышленным отходам 3–4-го класса опасности.

С другой стороны, зола и шлак представляют ценные сырьевые источники для использования в различных строительных отраслях. Основным требованием, обеспечивающим успешное применение, является стабильность их физико-химических показателей. Важной характеристикой гидравлической активности золы и шлаков является наличие минералов, близких по составу к клинкерным минералам портландцемента –  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ . Рассчитанные гидравлические модули активной золы свидетельствуют о сближении их гидравлической активности с глиноземистым цементом.

Одним из основных путей улучшения физико-механических свойств цементобетона является введение в бетонную смесь торфяной золы и микрокремнезема. Обязательным условием при изготовлении высокопрочных бетонов является использование пластификаторов в качестве химических добавок.

В этой связи в настоящей работе решается задача: с использованием золы, образующейся при сжигании торфо-древесного и торфяного топлив на промышленных предприятиях Республики Беларусь, а также микрокремнезема и суперпластификатора получить сверхпрочные бетоны, которые жизненно необходимы для создания, прежде всего, мостовых и тоннельных конструкций.

**Теоретические аспекты использования высокодисперсных зольных материалов в бетоне.** Введение зольных добавок в бетонные смеси производится двумя принципиально различными способами: добавка вводится взамен части цемента (содержание дисперсных частиц в смеси не меняется) и взамен части мелкого заполнителя – кварцевого песка (вся вводимая добавка идет на увеличение содержания дисперсных частиц в смеси). Имеются также промежуточные варианты, когда добавка частично заменяет цемент, а частично – песок. При этом пуццолановая активность проявляется при любых способах введения добавок, а микронаполняющий эффект – лишь при росте содержания дисперсных частиц в смеси. Однако при высокой степени наполнения после достижения его максимума происходит уменьшение прочности бетонов, несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня, вследствие ухудшения сцепления наполненного цементного камня с заполнителем. Увеличение количества добавки выше оптимального приводит к разбавлению цементного камня добавками, нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера и уменьшению прочности [1].

При оптимальном количестве высокодисперсной добавки в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента добавкой. Достигается максимально плотная упаковка частиц в тесте, если частицы добавки значительно мельче частиц цемента, или достижение максимального насыщения цемента добавкой без образования контактов частиц добавки между собой, если частицы добавки и цемента соизмеримы. В смешанной системе цемента с ультрадисперсной добавкой важно, чтобы частицы ультрадисперсной добавки не обволакивали поверхность новых фаз и не препятствовали образованию контактов срастания между кристаллогидратами [2]. Для инертной микродобавки 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 ультрадисперсной добавки. Однако увеличение дозировки сверх объема указанных пор в зависимости от гидравлической активности может привести к противоположным результатам. При повышенном объемном содержании микродобавки эффект заполнения пустот и уплотнения структуры не может компенсировать негативного воздействия микродобавки на контакты срастания, поэтому прочность снижается [1, 3]. На высокодисперсных субмикроскопических частицах кремнеземистой пыли происходит осаждение продуктов гидратации, причем эти частицы служат центрами нуклеации и кристаллизации.

Через одни сутки гидратационного процесса на поверхности частиц происходит хемосорбция  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  из жидкой фазы, что препятствует кристаллизации этtringита, а через трие суток начинается пуццолановая реакция. Этими же авторами в работах [4, 5] проводились исследования цементного теста с добавлением высокодисперсного песка. Установлено, что при повышении дисперсности песка и росте его содержания в композиции скорость выделения  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

повышается. Это объяснено тем, что частицы песка служат подложкой для кристаллизации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  из поровой жидкости. При росте водосодержания композиций перемещение ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$  к поверхности частиц песка облегчается, что приводит к интенсификации процесса образования и роста кристаллов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Явление повышения прочности вяжущих при введении в их состав микронаполнителей помимо гидравлической активности также может быть объяснено образованием наиболее мелкими зернами микронаполнителя (коллоидных размеров) центров кристаллизации в контактной зоне цемента [6].

В основе «эффекта микронаполнителя» лежат как химические процессы (взаимодействие с продуктами гидратации цемента), так и физико-химические явления (влияние поверхностной энергии частиц добавок и др. [7]). В присутствии тонкодисперсной добавки происходит упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителем в бетонах. В обычных портландцементных бетонах зона контакта обычно менее плотная, чем массивное тесто, и включает большое количество пластинчатых кристаллов гидроксида кальция, у которых продольная ось перпендикулярна поверхности заполнителя [3]. Следовательно, она более подвержена образованию микротрещин при растягивающих усилиях, возникающих при изменениях обычных условий температуры и влажности. Таким образом, контактная зона из-за своей структуры является наиболее слабой зоной в бетоне и поэтому оказывает большое влияние на его прочность. Введение пуццолановых наполнителей в значительной степени снижает (но не исключает) капиллярную пористость контактной зоны за счет резкого уменьшения общего содержания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В то же время рост содержания  $\text{CSH}$  в непосредственной близости от поверхности заполнителя положительно сказывается на свойствах контактной зоны.

Зола удельной поверхности 4000–6000  $\text{см}^2/\text{г}$  обеспечивает разрушение агломератов зольных частиц, обнажает активные поверхности стекловидных глобулитов [8], что способствует повышению активности золы в цементных системах. Введение тонких частиц минеральных добавок, имеющих размеры 1–20 мкм, усиливает влияние портландцементных зерен на снижение пористости в бетонной смеси [9]. При введении в бетон взамен части цемента золы-уноса, состоящей из сферических частиц с гладкой остеклованной фактурой поверхности, подвижность бетонной смеси возрастает благодаря уменьшению внутреннего трения бетонной смеси [10]. Чем дисперснее зола, а следовательно, чем больше в ней остеклованных шарообразных частиц, тем большее пластифицирующее действие оказывает она на бетонную смесь. Частицы коллоидных размеров создают на своей поверхности сольватную оболочку, состоящую из воды, адсорбционно связанной на поверхности твердой фазы, что придает им смазочные функции, облегчая скольжение твердых частиц одна по другой за счет действия отталкивающих сил и образования ориентированными молекулами воды плоскостей скольжения по местам более слабых водородных связей [11]. Однако бетонная смесь содержит частицы различных размеров, и мельчайшие частицы, осаждаваясь и прилипая к поверхности более крупных зерен, теряют подвижность, и для ее увеличения необходимо введение дополнительного количества воды, что приводит к увеличению водопотребности. На частицах ультрадисперсных добавок образуется слой адсорбционно связанной воды, по объему сопоставимый с объемом частицы [2].

Таким образом, с одной стороны, количество свободной воды, предопределяющей текучесть, сокращается на величину, сравнимую с объемом ультрадисперсного материала, а вязкость системы, соответственно, повышается по мере увеличения в ней объемной концентрации микронаполнителя. Однако, с другой стороны, адсорбционная пленка уменьшает межмолекулярное взаимодействие твердой фазы и, снижая силу сцепления между частицами на два порядка, ослабляет коагуляционные контакты, придавая им обратимый характер. Поэтому смешанная система с ультрадисперсной добавкой из-за ослабленных коагуляционных контактов при получении вибрационного импульса разжижается. После прекращения вибрационного воздействия коагуляционные контакты восстанавливаются, система может быстро структурироваться и снова становиться вязкой. При дозировке ультрадисперсной добавки в количестве до 5 % массы цемента вязкость системы существенно не увеличивается, поэтому для обеспечения необходимой текучести суспензий не требуется дополнительного количества воды затворения.

При невысоких дозировках добавки создается баланс между факторами, влияющими на текучесть: сокращение объема свободной воды в системе и незначительное увеличение количества коагуляционных контактов компенсируется слабостью этих контактов из-за оболочки адсорбционно связанной воды вокруг частиц. Повышенные дозировки ультрадисперсной добавки уже приводят к увеличению водопотребности, величина которой зависит от удельной поверхности микронаполнителя и его объемного содержания в системе. Гранулы добавки, размещаясь между частицами цемента, существенно корректируют исходную дифференциальную пустотность водовязущей пасты в сторону меньших по размеру пустот, что обуславливает формирование цементного

камня с меньшими размерами капиллярных пор, диспергированной капиллярной пористостью по сравнению со структурой без наполнителя. В качестве минеральных добавок к бетону применяли микрокремнезем, золу, в которой содержание частиц крупностью менее 7 мкм превышало 90 %. Зола вместе с микрокремнеземом отличалась повышенной активностью.

Введение в бетон добавки – высокодисперсной золы, заметно влияет на его свойства. Рассматриваемая добавка снижает водопотребность бетонных смесей. При осадке конуса бетонных смесей, равной 165–210 мм, добавка высокодисперсной золы снижает расход суперпластификатора на 10 % и расход воды – на 8 % по сравнению с бездобавочными бетонными смесями.

Добавка высокодисперсной золы оказывает также положительное влияние на удобоукладываемость бетонных смесей. При этом с ростом количества золы снижается расход суперпластификатора (в отличие от микрокремнезема, наличие которого в бетонных смесях требует увеличения количества суперпластификатора). Добавка высокодисперсной золы способствует повышению сульфатостойкости бетона (при использовании добавки в сочетании с высокоалюминатным цементом). При содержании в бетоне золы в количестве 8 % от массы цемента он отличается высокой, а при содержании золы 12 и 16 % – очень высокой сульфатостойкостью.

#### **Цели и задачи исследования.**

*Цель* – изучить возможность изготовления высокопрочного бетона с использованием высокодисперсных зольных материалов, микрокремнезема и суперпластификатора С-3.

*Задачи:* с использованием фундаментальных и специальных методов исследования изучить характеристику исходных, промежуточных и конечных материалов – золы, микрокремнезема, цемента, суперпластификатора, бетонных смесей. Показать возможность использования золы, микрокремнезема МК-85 и суперпластификатора С-3 для получения бетона с повышенными физико-механическими свойствами.

#### **Материалы и методы исследования.**

##### *Материалы:*

– зола от сжигания торфо-древесных смесей, фрезерного торфа энергопредприятий (Брестское РУП электроэнергетики «Брестэнерго»; Минское РУП «Минскэнерго» Жодинская ТЭЦ) Республики Беларусь, характеристики которых представлены в табл. 1, 2. Строение и состав золы зависит 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.;

– портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, ОАО «Кричевцементношифер», с тонкостью помола 95,1 %, истинной плотностью 3,1054 г/см<sup>3</sup>, величиной удельной поверхности 3287 см<sup>2</sup>/г, активностью 49,8 МПа;

– песок кварцевый для строительных работ, ГОСТ 8736, с модулем крупности Мк, равным 2,08;

– суперпластификатор С-3 с характеристикой: массовая доля сухих веществ – 64,7 %, плотность при 20 °С – 1,2794 г/см<sup>3</sup>, показатель активности водородных ионов – 8,12;

– щебень с максимальной крупностью зерен до 20 мм. Физико-механические свойства гранитного щебня: плотность – 2697 кг/м<sup>3</sup>; влажность – 0,23 мас.%; содержание, мас.%; глинистых и пылеватых частиц – 0,19; марка щебня – 1200 (соответствует ГОСТ 8267);

– микрокремнезем марки МК-85 (ТУ5743-048-02495332);

– для затворения бетонных смесей применяется водопроводная вода, которая отвечает требованиям СТБ 1114.

##### *Методы.*

Определение оксидов исследуемых образцов золы проводили по ГОСТ 10538-87. Определение плотности, водопоглощения бетона осуществляли по ГОСТ 12730.1, ГОСТ 12730.3; а предела прочности при осевом сжатии, предела прочности при осевом растяжении бетонов, насыпной плотности, удельной поверхности, влажности цемента, зол и других высокодисперсных материалов по методикам, представленным в источнике [12]. Определение водонепроницаемости бетона осуществлялось по ГОСТ 12730.5 ускоренным методом. При определении водонепроницаемости бетона используют устройство типа «Агама-2Р», в котором герметизирующая мастика удовлетворяет ГОСТ 14791.

Промышленные образцы золы, полученной при сжигании торфо-древесных смесей, фрезерного торфа энергопредприятий (Брестское РУП электроэнергетики «Брестэнерго»; Минское РУП «Минскэнерго» Жодинская ТЭЦ) Республики Беларусь, подсушивали при температуре 105 ± 5 °С, подвергали помолу в шаровой мельнице, а затем испытывали. Результаты испытаний золы представлены в табл. 1, 2.

**Таблица 1. Физические свойства золы****Table 1. Physical properties of ash**

№ п/п	Физические свойства	Показатели золы, отобранной на промышленных предприятиях Беларуси	
		Зола получена при сжигании торфо-древесных смесей* на Брестском РУП электроэнергетики «Брестэнерго»	Зола получена при сжигании фрезерного торфа на Минском РУП «Минскэнерго» Жодинская ТЭЦ
1	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2203,2	2245,9
2	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	736,1	732,6
3	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	3159,7	3211,5
4	Влажность, мас. %	0,45	0,39

\*Смесь, мас. %: щепы топливная – 60; торф – 40.

**Таблица 2. Химический состав золы****Table 2. Chemical content of ash**

№ п/п	Оксиды и потери при прокаливании (ППП)	Химический состав золы, мас. %	
		Зола получена при сжигании торфо-древесных смесей на Брестском РУП электроэнергетики «Брестэнерго»	Зола получена при сжигании фрезерного торфа на Минском РУП «Минскэнерго» Жодинская ТЭЦ
1	SiO <sub>2</sub>	51,53	45,06
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,11	6,65
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,84	10,97
4	CaO	22,36	27,41
5	MgO	0,48	1,28
6	SO <sub>3</sub>	2,85	2,09
7	Na <sub>2</sub> O	0,47	0,47
8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,34	1,95
9	MnO <sub>2</sub>	0,19	0,14
10	TiO <sub>2</sub>	0,28	0,42
11	K <sub>2</sub> O	1,43	1,53
12	ППП	1,12	2,03

**Активность золы, полученной при сжигании торфо-древесных смесей, фрезерного торфа энергопредприятий (Брестское РУП электроэнергетики «Брестэнерго»; Минское РУП «Минскэнерго» Жодинская ТЭЦ) Республики Беларусь.**

Основные критерии, определяющие активность золы [1–3]:

– модуль основности (гидросиликатный модуль)  $M_o$ , который представляет собой отношение суммы основных оксидов к сумме кислотных оксидов:

$$M_o = (CaO + MgO + K_2O + Na_2O) : (SiO_2 + Al_2O_3); \quad (1)$$

– силикатный (кремнеземистый) модуль  $M_c$ , показывающий отношение оксида кремния, вступающего в реакцию с другими оксидами, к суммарному содержанию оксидов алюминия и железа:

$$M_c = SiO_2 : (Al_2O_3 + Fe_2O_3); \quad (2)$$

– коэффициент качества  $K$ , показывающий отношение оксидов, повышающих гидравлическую активность к оксидам, снижающим ее:

$$K = (CaO + Al_2O_3 + MgO) : (SiO_2 + TiO_2). \quad (3)$$

На основании исследований топливных отходов электростанций, сжигающих топливо различных месторождений, золошлаковые материалы разделены на группы: активные, скрыто активные и инертные [2] (табл. 3).

**Таблица 3. Активность золошлаковых материалов****Table 3. Activity of ash-and-slag materials**

Химические свойства		Золошлаковые материалы		
		активные	скрыто активные	инертные
Показатель качества	Мо	0,5–2,8	0,1–0,5	< 0,1
	Мс	1,5–7,8	1,4–3,6	1,3–3,2
	К	1,0–3,6	0,5–1,3	0,4–0,9
Возможные области использования		Самотвердеющий материал. Местное вяжущее	Требуется интенсификация твердения. Дорожное строительство	Сырье для производства зольного гравия и др.

Результаты расчетов модуля основности (гидросиликатный модуль) Мо, силикатного (кремнеземистого) модуля Мс, коэффициента качества К, показали, что зола, полученная при сжигании торфо-древесных смесей на Брестском РУП электроэнергетики «Брестэнерго», относится к скрыто активным золошлаковым материалам и требует интенсификации твердения; а зола, полученная при сжигании фрезерного торфа на Минском РУП «Минскэнерго» Жодинская ТЭЦ, относится к активным золошлаковым материалам и не требует интенсификации твердения.

**Технология приготовления бетонных смесей.** Зола подвергают помолу в мельнице, затем вводят цемент, микрокремнезем МК-85, суперпластификатор С-3 и смесь подвергают домолу с получением высокодисперсной массы. В мешалку вводят мелкий и крупный заполнители, смесь диспергированных золы, микрокремнезема, суперпластификатора и цемента. Смесь перемешивают в течение 10–15 минут. Добавляют расчетное количество воды и содержимое перемешивают до получения однородной массы. Полученной смесью заполняют формы и после отверждения образцы бетона испытывают.

Составы бетонных смесей и физико-механические показатели бетонов, содержащих золу, предприятий Республики Беларусь приведены в табл. 4, 5.

**Таблица 4. Составы бетонных смесей и физико-механические показатели бетонов, содержащих золу от сжигания торфо-древесных смесей на Брестском РУП электроэнергетики «Брестэнерго»****Table 4. Compositions of concrete mixtures and the physical and mechanical markers of concretes, containing ash from peat and wood mixtures burning on Brest RUE of electroenergetics "Brestenergo"**

Наименование	Номер состава					
	1	2	3	4	5	6
Составы бетонных смесей, мас. %						
Щебень	43,2	51,3	51,3	51,3	51,3	51,3
Песок	20,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
Цемент ЦЕМ I 42,5 Н	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1
Вода	12,3	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2
Добавки, % от массы цемента						
Зола	–	4,0	6,0	10,0	12,0	14,0
Микрокремнезем МК-85	–	14,0	12,0	8,0	6,0	4,0
Суперпластификатор С-3	–	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Физико-механические показатели образцов бетона						
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2256	2327	2324	2319	2313	2304
Предел прочности, МПа:						
при осевом сжатии	56,0	118,0	104,0	94,0	82,0	73,0
на растяжение при изгибе	4,8	10,4	9,6	8,3	6,9	6,2
Водопоглощение, %	2,6	1,5	1,5	1,9	2,1	2,3
Марка по водонепроницаемости	W6	W20	W16	W12	W12	W10

**Таблица 5. Составы бетонных смесей и физико-механические показатели бетонов, содержащих золу, полученную при сжигании фрезерного торфа на Жодинской ТЭЦ****Table 5. Compositions of concrete mixtures and the physical and mechanical markers of concrete, containing ash, obtained from milling peat burning on Minsk RUE "Minskenergo" Zhodino CHPP**

Наименование	Номер состава					
	1	2	3	4	5	6
Составы бетонных смесей, мас. %						
Щебень	43,2	51,3	51,3	51,3	51,3	51,3
Песок	20,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
Цемент ЦЕМ I 42,5 Н	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1
Вода	12,3	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2
Добавки, % от массы цемента						
Зола	–	4,0	6,0	10,0	12,0	14,0
Микрокремнезем МК-85	–	14,0	12,0	8,0	6,0	4,0
Суперпластификатор С-3	–	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Физико-механические показатели образцов бетона						
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2256	2328	2327	2320	2314	2306
Предел прочности, МПа: при осевом сжатии на растяжение при изгибе	56,0	119,0	106,0	98,0	83,0	75,0
	4,8	10,8	10,1	8,7	7,0	6,3
Водопоглощение, %	2,6	1,4	1,6	1,9	1,9	2,1
Марка по водонепроницаемости	W6	W20	W18	W14	W14	W10

Анализ данных табл. 4, 5 показывает, что предел прочности бетона при осевом сжатии находится в пределах 73–119 МПа, а для контрольного образца 56 МПа (состав 1), т. е. этот показатель в 1,3–2,1 раза больше, чем для контрольного образца. Водонепроницаемость бетонов, полученных по составам 2–5, лучше, чем у контрольного образца: так, марки по водонепроницаемости заявляемых бетонов были W10–W20 против W6 для контрольного образца, не содержащего добавки. Таким образом, бетонные смеси, содержащие золы, полученные от сжигания торфо-древесных смесей, фрезерного торфа на энергопредприятиях Брестское РУП электроэнергетики «Брестэнерго», Минское РУП «Минскэнерго» Жодинская ТЭЦ Республики Беларусь, а также содержащие микрокремнезем МК-85 и суперпластификатор С-3, имеют существенные преимущества перед известным контрольным составом 1. Разработанные технология и составы высокопрочных бетонов будут востребованы при изготовлении мостовых и тоннельных конструкций.

#### **Выводы.**

1. При рассмотрении теоретических аспектов введения высокодисперсных материалов в бетон необходимо отметить:

– факторы положительного влияния высокодисперсных добавок на структуру и физико-механические характеристики цементных композиций, а именно: 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  $\text{SiO}_2$  пуццолановых наполнителей, повышение пуццоланической активности наполнителя при его тонком измельчении; ускорение начальной стадии химического твердения цементных систем с частицами наполнителя, служащими центрами кристаллизации; образование кластеров «вяжущее–наполнитель» за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя; упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями в бетонах;

– высокодисперсная зола, оказывает положительное влияние на изготавливаемые из бетона изделия и конструкции. Она повышает физико-механические свойства бетона (прочность, стойкость к агрессивным воздействиям окружающей среды и др.).

2. В представленной работе для изготовления высокопрочных бетонов использована зола, полученная от сжигания торфо-древесных смесей, фрезерного торфа на энергопредприятиях Брестское РУП электроэнергетики «Брестэнерго»; Минское РУП «Минскэнерго» Жодинская ТЭЦ, а также микрокремнезем МК-85 и суперпластификатор С-3, которые производятся в промышленных условиях. Приобретение их не представляет технической сложности, а, стало быть, и внедрение технологии, и составов бетонных смесей на предприятиях стройиндустрии возможно в ближайшее время.

3. Использование исследованной золы совместно с микрокремнеземом МК-85, суперпластификатором С-3 для производства бетонных и железобетонных конструкций будет способствовать решению важных задач, таких как:

– расширение сырьевой базы для изготовления строительных конструкций, а также целого ряда преимуществ, связанных с высокими физико-техническими параметрами бетонов, обеспечивающих высокую долговечность конструкций, продолжительную эксплуатационную пригодность и надежность их и др.

– защиту окружающей среды от дисперсной золы, загрязняющих воздушный бассейн, поверхностные и подземные воды, землю.

#### Список использованных источников

1. Власов, В. К. Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя / В. К. Власов // Бетон и железобетон. – 1988. – № 10. – С. 9–11.
2. Красный, И. М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей / И. М. Красный // Бетон и железобетон. – 1987. – № 5. – С. 10–11.
3. Malhotra, V. M. Pozzolan and Cementitious Materials Text / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. – Gordon and Breech Publishers, 1996. – 191 p.
4. Matsufuji, Y. The Strength Characteristics of Solutions Containing Ultrafine Particles The Strength Characteristics of Solutions Containing Ultrafine Particles / Y. Matsufuji, H. Kohhata, S. Harada // Semento konkurito ronbunshu = CAJ Proc. Cem. And Concr. – 1991. – № 45. – P. 264–269.
5. Соломатов, В. И. Композиционные строительные материалы и конструкции повышенной материалоемкости / В. И. Соломатов. – Киев : Будивельник, 1991. – 144 с.
6. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – 2-е изд., перераб. — М. : Стройиздат, 1973. – 480 с.
7. Данилович, И. Ю. Использование топливных шлаков и зол для производства строительных материалов / И. Ю. Данилович, Н. А. Сканави. – М. : Высшая школа, 1988. – 72 с.
8. Высоцкий, С. А. Минеральные добавки для бетонов / С. А. Высоцкий // Бетон и железобетон. – 1994. – № 2. – С. 7–10.
9. Зоткин, А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне / А. Г. Зоткин // Бетон и железобетон. – 1994. – № 3. – С. 7–9.
10. Баженов, Ю. М. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин // Изв. вузов. Строительство. 1996. – № 7. – С. 55–58.
11. Леонович, И. И. Испытание дорожно-строительных материалов / И. И. Леонович, В. А. Стрижевский, К. Ф. Шумчик. – Минск : Вышэйшая школа, 1991. – 226 с.

#### References

1. Vlasov V. K. *Mekhanizm povysheniya prochnosti betona pri vvedenii mikronapolnitelya* [The mechanism of concrete strength increasing with microfiller implementation]. *Beton I zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, 1988, no. 10, pp. 9–11 (in Russian).
2. Krasnyy I. M. *O mekhanizme povysheniya prochnosti betona pri vvedenii mikronapolniteley* [About the mechanism of concrete strength increasing with microfiller implementation]. *Beton I zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, 1987, no. 5, pp. 10–11 (in Russian).
3. Malhotra V. M., Malhotra V. M., Mehta P. K. *Pozzolan and cementitious materials text*. Gordon and Breech Publ., 1996, 191 p.
4. Matsufuji Y., Kohhata H., Harada S. *The Strength characteristics of solutions containing ultrafine particles*. Semento konkurito ronbunshu = CAJ Proc. Cem. And Concr., 1991, no. 45, pp. 264–269.
5. Solomatov V. I. *Kompozitsionnyye stroitelnyye materialy I konstruktsii povyshennoy materialoyemkosti* [Composite building materials and the structures of increased material consumption]. Kiyev, 1991, 144 p. (in Russian).
6. Volzhenskiy A. V., Burov Yu. S., Kolokolnikov V. S. *Mineralnyye vyazhushchiye veshchestva* [Mineral and astringents substances]. Moscow, 1973, 480 p. (in Russian).
7. Danilovich Yu. I., Skanavi N. A. *Ispolzovaniye toplivnykh shlakov I zol dlya proizvodstva stroitelnykh materialov* [The use of fuel dross and fuel ashes for building materials production]. Moscow, High School Publ., 1988, 72 p. (in Russian).
8. Vysotskiy S. A. *Mineralnyye dobavki dlya betonov* [Mineral additives for concretes]. *Beton I zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, 1994, no. 2, pp. 7–10 (in Russian).
9. Zotkin A. G. *Mikronapolnyayushchiy 12ffect mineralnykh dobavok v betone* [Microfilling effect of mineral additives in concrete]. *Beton I zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*, 1994, no. 3, pp. 7–9 (in Russian).
10. Bazhenov Yu. M., Alimov L. A., Voronin V. V. *Razvitiye teorii formirovaniye struktury I svoystv betonov s tekhnogennymi otkhodami* [Various theories of the structure and peculiarities formation of concretes with technogenic wastes]. *Izvestiye vuzov. Stroitelstvo = News of Universities. Building*, 1996, no. 7, pp. 55–58 (in Russian).
11. Leonovich I. I., Strizhevskiy V. A., Shumchik K. F. *Ispytaniye dorozhno-stroitelnykh materialov* [The study of road construction materials]. Minsk, 1991, 226 p. (in Russian).

**Информация об авторах**

*Ляхевич Генрих Деонисьевич* – профессор, д-р техн. наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ifidi@hotmail.com

*Лиштван Иван Иванович* – академик, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by

*Ляхевич Александр Генрихович* – доцент, канд. эконом. наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ifidi@hotmail.com

*Гречухин Владимир Александрович* – доцент, канд. техн. наук, зав. кафедрой, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mit\_ftk@bntu.by

*Дударчик Владимир Михайлович* – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dudwm@tut.by

*Крайко Валентина Михайловна* – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: vvkraiko@gmail.com

**Information about the authors**

*Genrich D. Lyakhevich* – Professor, D.Cs. (Technical), Professor, Belarusian National Technical University (Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ifidi@hotmail.com

*Ivan I. Lishtvan* – Academician, D.Cs. (Technical), Professor, Chief researcher, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by

*Aleksandr G. Lyakhevich* – Assistant Professor, Ph.D. (Economics), Assistant Professor, Belarusian National Technical University (Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ifidi@hotmail.com

*Vladimir A. Grechuhin* – Assistant Professor, Ph.D. (Technical), Head Department, Belarusian National Technical University (Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mit\_ftk@bntu.by

*Uladimir M. Dudarchyk* – Ph.D. (Technical), Senior researcher, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dudwm@tut.by

*Valiantsina M. Kraiko* – Ph. D. (Technical), Senior researcher, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vvkraiko@gmail.com