

9. Вяжущие гипсовые. Технические условия : ГОСТ 125-79 / Госстрой ССР. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 5 с.
10. Мука известняковая (доломитовая). Технические условия : ГОСТ 14050-93. – Взамен ГОСТ 14050 – 78; введен 01.01.1995. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 10 с.
11. Песок для строительных работ. Методы испытаний: ГОСТ 8735-88 .- Взамен ГОСТ 8735-75, ГОСТ 25589-83; введ.01.07.1989.- М.: Изд-во стандартов, 1988. -22с.
12. Методы испытаний по определению механических и физических характеристик гранулометрических фракций горных пород. Часть 3. Определение насыпной плотности и пустотности: СТБ ЕН 1097-3-2007; введ.01.10.98.- Минск: Госстандарт, 1998. – 3 с.

## THE INFLUENCE OF COMPLEX MODIFIERS ON THE PROPERTIES OF GYPSUM BINDERS

A. KATULSKAYA, L. PARFENOVA

*The article presents the results of the study of the physico-mechanical properties of gypsum binders modified with complex additives using sludge water treatment Novopolotsk CHP, dolomite flour and plasticizing additives. It is shown that the modification of gypsum binders allows you to adjust the setting time, the normal density of the gypsum dough, helps to increase the strength and water resistance of the gypsum stone.*

**Keywords:** *sludge of water treatment, dolomitic flour, complex modifier, plasticizer, compressive strength, bending strength, water absorption, total porosity.*

УДК 691.335

## ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ЗОЛЫ НА ВЫБОР КОНЦЕНТРАЦИИ ЩЕЛОЧНОГО АКТИВАТОРА

канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЁНОВА, Е.А. РАЗУЕВА  
(Полоцкий государственный университет)

*В статье предложено использование геополимеров на основе золошлаковой смеси БелГРЭС г.п.Ореховск в качестве альтернативы портландцементу. Приведена краткая характеристика физико-механических свойств золы, а также химический состав зольной составляющей золошлаковой смеси. Приведены результаты исследования влияния продолжительности механической активации золы на выбор концентрации щелочного активатора. Представлена морфология не обработанной золы и золы механоактивированной в течении 60 минут. Установлено, что при использовании в качестве щелочного активатора гидроксида натрия (NaOH) с увеличением времени механоактивации концентрация раствора щелочи снижается.*

**Ключевые слова:** *геополимер, золошлаковая смесь, гидроксид натрия, щелочная активация, химический состав, вяжущее, механическая активация.*

Строительным материалом, который является основой всего современного строительства является портландцемент. Благодаря технологическим и эксплуатационным свойствам этот материал является практически безальтернативным вяжущим при производстве бетона и железобетона [1]. Объемы производства портландцемента намного превышают объемы производства других строительных материалов. Однако, при производстве цемента наблюдаются такие недостатки как потребление большого количества энергии (от 750 до 1450°C для производства клинкера) и выброс большого объема CO<sub>2</sub> в атмосферу [2, с.236]. Наиболее перспективной основой для разработки альтернативы портландцемента являются геополимерные вяжущие.

Геополимеры представляют собой вяжущие системы на основе тонкомолотых силикатных и алюмосиликатных материалов, затворяемых растворами щелочей [3]. Благодаря простоте, энергоэффективности, экологически чистой обработке строительные материалы на основе геополимеров вызывают большой интерес у ученых разных стран.

Для получения геополимерных вяжущих используют минеральное сырье геологического происхождения, а также промышленные отходы – шлаки, золы и другие материалы [4]. Перспективным является использование золы в геополимерах, т.к. зола является легко доступным отходом, обладает хорошей обрабатываемо-

стью и повышенной долговечностью в геополимербетоне [4-6]. Фактором, ограничивающим использование золы в геополимерах, является низкое содержание активного оксида кальция (менее 10%), способствующего твердению и набору прочности материала, что приводит к необходимости вводить его дополнительно. Для повышения активности зол применяют различные виды химических активаторов: гашеную и негашеную известь [7], гидроксида натрия [8], смеси гидроксида натрия и силиката натрия [9].

Исследуя минералогический состав зол, авторы работы [10] предлагают несколько морфологических категорий золы: 1) большинство частиц золы-уноса представлены в виде твердых стеклянных сфер, большая часть из них прозрачные, которые могут быть частично расстеклованы; 2) неравномерные массы большого размера, которые существуют в виде агломератов небольших сфер силикатных стекол или в виде пористых частиц не полностью сгоревшего углеродистого вещества; 3) встречаются магнетит и гематит в виде непрозрачных сфер; 4) содержится небольшое количество полых сфер, пустых (ценосферы) или упакованных внутри меньшими сферами (плеросферы).

Исследованиями [11] показано, что зола представлена тремя основными группами веществ: кристаллической, стекловидной и органической. Кристаллическое вещество представлено первичными минералами топлива и новообразованиями, полученными при термической обработке. Отмечается, что в основном встречаются муллит, магнетит, гематит, а также, часто встречается кварц в агрегатах, приплавленных друг другу зерен. Объясняется это характером исходного топливного сырья (торф). Стеклофаза представляет продукт незавершенного равновесного состояния и представлена четырьмя видами, отличающимися по цвету и показателю преломления. И последняя группа представляет собой недожог – частицы не полностью прореагировавшего топлива.

Известно, что использование механической активации изменяет реакционную способность зол, повышает химическую активность материала [12, с.81]. Результаты, представленные в статье [13] показывают, что полная гидратация гранулированного доменного шлака возможна при использовании только механической активации, без использования химического активатора. В [14] исследовано влияние реакционной способности золы-уноса на геополимеризацию зольного камня. Золу-уноса механически измельчали в вибрационных и истирающих мельницах, вводили жидкое стекло, а затем образцы твердели при различных режимах твердения. Установлено, что механическая активация улучшает процесс набора прочности на сжатие, что связано с улучшенной реакционной способностью и способствует образованию компактной микроструктуры. Также было установлено, что на процесс геополимеризации и кинетику набора прочности влияет не только улучшение реакционной способности, но и режимы твердения.

Целью настоящего исследования было определение концентрации щелочного активатора для золы Белорусской ГРЭС г.п. Ореховск Витебской области, которая была механически активирована в шаровой мельнице.

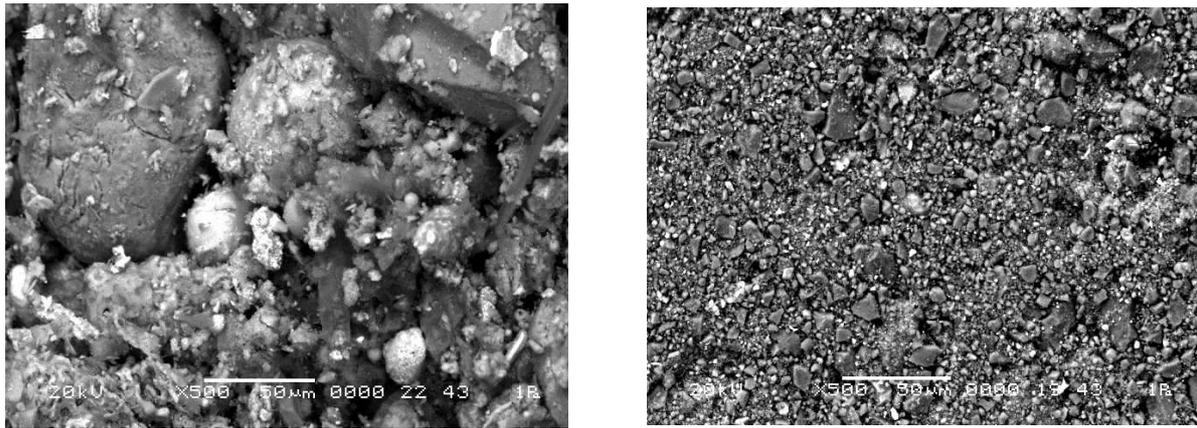
Для проведения экспериментальных исследований использовалась золошлаковая смесь, образующаяся при сжигании топливной смеси из 50% древесной щепы и 50 % торфа. Золошлаковую смесь высушивали при температуре 120°C. В экспериментах использовалась фракция, прошедшая через сито № 008, т.е. по ГОСТ 25592 – зольная составляющая (далее зола) со следующими характеристиками: насыпная плотность 960 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность 2100 кг/м<sup>3</sup>, удельная поверхность 1490,8 см<sup>2</sup>/г. Химический состав золы (мас. %) по ГОСТ 10538-87 представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав зольной составляющей (мас. %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
72,56	5,52	10,23	8,59	0,4	0,73	1,98

По химическому составу зола состоит в основном из оксидов кремния и алюминия (более 75%). По модулю основности золошлаковая смесь относится к кислым, содержание оксида кальция составляет около 9%.

Механическую активацию проводили на шаровой мельнице, где мелющими телами являлись шары различного диаметра. Золу измельчали в течение 60 и 120 мин. В качестве контрольного использовалась необработанная зола. Морфология необработанной золы и золы, измельченной в течение 60 мин, представлена на рис. 1а и б соответственно. Микросферы необработанной золы представляют собой спекшиеся стекловидные алюмосиликатные образования правильной сферической формы с гладкой поверхностью. После измельчения в мельнице крупноразмерные золосферы разбиваются на части неправильной формы.



**Рисунок 1. – Морфология необработанной золы (а) и золы, измельченной в течение 60 мин (б)**

Удельную поверхность вяжущих материалов определяли на приборе NOVA2200. Определение удельной поверхности на приборе основано на методе БЭТ и включает две стадии: оценку по изотерме адсорбции емкости монослоя и расчет удельной поверхности с использованием молекулярной площади газа.

В качестве щелочного активатора использовался гидроксид натрия (NaOH) СТО 00203275-206-2007. Геополимерное вяжущее получали путем смешивания механоактивированной золы с щелочным активатором и воды в течение 10-25 минут. Из полученной пластичной массы формовали образцы кубиков с размером ребра 20 мм. Образцы без предварительной выдержки помещали в сушильный шкаф SNOL, где они твердели в течение 24 часов при температуре 80°C. Прочность образцов на сжатие определяли через 24 часа после температурной обработки. Выбор концентрации щелочного активатора для необработанной и механоактивированной золы выполнялся с применением метода математического планирования эксперимента на основе трехфакторного плана второго порядка. Полученные результаты представлены в таблице 2.

**Таблица 2. – Влияние продолжительности механической активации золы на концентрацию щелочного активатора и прочность геополимерного камня**

№ п/п	Время механо-активации, мин	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Концентрация NaOH, %	В/З	Прочность на сжатие, МПа, через 24 ч после термообработки
1	-	1490,8	51	0,168	5,1
2	60	2000	28	0,276	5
3	120	2300	28	0,276	5

Согласно полученным данным, при механоактивации в течении 60 минут значение удельной поверхности увеличивается в 1,3 раза. Дальнейшее увеличение времени помола до 120 минут увеличивает значение удельной поверхности в 1,15 раза. Это свидетельствует об увеличении дефектности золы, а также о повышении реакционной способности.

Полученные результаты показали, что увеличение удельной поверхности с 1490,8 см<sup>2</sup>/г до 2300 см<sup>2</sup>/г позволяет снизить концентрацию щелочного активатора с 51% до 28%, что подтверждается значением прочности на сжатие геополимерного камня 5 МПа до и после механообработки. После механоактивации в течении 120 минут значения концентрации щелочного активатора и прочности на сжатие геополимерного камня не изменились по сравнению с механоактивацией в течении 60 минут. Необходимо отметить, что механическая активация не может полностью заменить химическую активацию геополимерного камня на основе золы Белорусской ГРЭС, но может быть применена как альтернатива для снижения концентрации щелочного активатора.

Таким образом можно сделать следующие выводы:

1. Реакционная способность летучей золы зависит от размера и морфологии частиц и состава стекла.
2. При использовании в качестве щелочного активатора гидроксида натрия (NaOH) с увеличением времени механоактивации концентрация раствора щелочи снижается.

3. Время механоактивации в шаровой мельнице должно составлять около 60 мин., последующее твердение должно осуществляться при температуре 80°C в течение 24 часов.
4. Время механоактивации более 60 минут не влияет на прочность геополлимерного камня и не влияет на концентрацию щелочного активатора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективы развития технологии бетона с высоким содержанием золы-уноса / А. В. Петухов // Молодежный научный вестник [Электронный ресурс]. – 2018. – №3. – Режим доступа: <http://www.mnvnauka.ru/2018/03/Petukhov.pdf>. – Дата доступа : 01.11.2018.
2. Парфенова, Л.М. Оптимизация концентрации щелочного активатора для геополлимерного вяжущего [Электронный ресурс] / Л.М. Парфенова, Е.А. Разуева, М.Н. Высоцкая // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 5-6 апр. 2018 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: А.А. Бакатович, Л.М. Парфенова. – Новополоцк, 2018. – Режим доступа: <http://elib.psu.by/handle/123456789/22236>. – Дата доступа : 01.11.2018.
3. Davidovits, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials [Электронный ресурс] / J. Davidovits // J. Thermal Analysis. – 1991. – Vol. 37 – Режим доступа: [https://www.geopolymer.org/fichiers\\_pdf/J\\_THERMAL.pdf](https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/J_THERMAL.pdf). – Дата доступа: 05.11.2018.
4. Alkali activated fly ashes: a cement for the future [Электронный ресурс] / A. Palomo [et al.] // J. Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884698002439>. – Дата доступа: 27.10.2018.
5. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material [Электронный ресурс] / J.C. Swanepoel [et al.] // Applied Geochemistry. – 2002. – Vol. 17. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292702000057>. – Дата доступа: 05.11.2018.
6. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions [Электронный ресурс] / T. Bakharev // J. Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/240402872\\_Durability\\_of\\_Geopolymer\\_Materials\\_in\\_Sodium\\_and\\_Magnesium\\_Sulfate\\_Solutions](https://www.researchgate.net/publication/240402872_Durability_of_Geopolymer_Materials_in_Sodium_and_Magnesium_Sulfate_Solutions). – Дата доступа : 05.11.2018.
7. Вяжущее: пат. 2312084 РФ : МПК6 С 04 В 7/28 [Электронный ресурс] / Н.Ф. Косенко, В.В. Макаров ; заявл. 05.05.06 ; дата публ. 10.12.07. – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2312084>. – Дата доступа: 03.11.2018.
8. Кожухова, Н.И. Геополлимерное вяжущее на золах-уноса ТЭС и мелкозернистый бетон на его основе [Электронный ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Н.И. Кожухова. – Электрон., текстовые дан. и прогр. (848,2 KB) – Белгород, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
9. Ерошкина, Н.А. Использование золы ТЭС в технологии геополлимерных строительных материалов [Электронный ресурс] / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, И.В. Коровченко // Молодой ученый. – Электрон., текстовые дан. и прогр. (848,2 KB) – Казань, 2015. – № 7. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
10. Промышленные отходы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://betony.ru/dobavki/promishlennye-othody.php>. – Дата доступа: 27.10.2018.
11. Салчак, Ч.М. Стеновой материал на основе на основе золы Кызылский ТЭЦ [Электронный ресурс] : дис. ... магистра техн. наук : 05.23.05 / Ч.М. Салчак. – Кызыл, 2015. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/78471597-Soderzhanie-raboty-vvedenie-primenenie-zol-tec-dlya-proizvodstva-stroitelnyh-materialov-6.html>. – Дата доступа: 27.10.2018.
12. Парфенова, Л.М. Щелочная реакционная способность механоактивированной золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС [Электронный ресурс] / Л.М. Парфенова, Е.А. Разуева // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XXI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 25-26 окт. 2018 г. / БрГТУ ; редкол.: Н.Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – Ч. 2. –Режим доступа: <http://www.bstu.by/news/2972/123/itogi-XXI-mezhdunarodnogo-nauchno-metodicheskogo-seminara>. – Дата доступа: 01.11.2018.
13. Hydration of mechanically activated granulated blast furnace slag [Электронный ресурс] / R. Kumar [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2005. – Vol. 36. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-005-0089-x>. – Дата доступа: 27.10.2018.
14. Influence of reactivity of fly ash on geopolymerisation [Электронный ресурс] / S. Kumar [et al.] // Advances in Applied Ceramics. – 2007. – Vol. 106. – Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/174367607X159293>. – Дата доступа: 27.10.2018.

**THE EFFECT OF THE MECHANICAL ACTIVATION OF THE ASH ON THE CHOICE OF THE ALKALINE ACTIVATOR CONCENTRATION****L. PARFENOVA, K. RAZUEVA**

*The article proposes the use of geopolymers based on the ash-and-slag mixture of the Belorusskaya state district power station of the urban settlement Orekhovsk as an alternative to Portland cement. A brief description of the physical and mechanical properties of the ash, as well as the chemical composition of the ash component of the ash-and-slag mixture is given. The results of the study of the effect of the mechanical activation of ash on the choice of the alkaline activator concentration are given. The morphology of raw and mechanically activated ash within 60 minutes is presented. It was established that when using sodium hydroxide (NaOH) as an alkaline activator with an increase in the time of mechanical activation, the concentration of the alkali solution decreases.*

**Keywords:** geopolymer, ash-and-slag mixture, sodium hydroxide, alkaline activation, chemical composition, binder, mechanical activation.

УДК 691.322

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА****Е.А. ТРАМБИЦКИЙ, В.А. ХВАТЫНЕЦ, канд. техн. наук, доц. Д.Н. ШАБАНОВ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Для получения достоверной информации об остаточном ресурсе конструкций, исходные данные необходимо определять по результатам натурных испытаний. Однако, для большинства конструкций получение достоверных исходных данных затруднено, что естественно снижает точность расчетов. Величины напряжений, возникающих в конструкциях, как правило, принимаются по результатам формализованных расчетов, что не отражает действительной работы конструкции. В связи с этим возникает необходимость в достоверных оперативных способах получения исходных данных для расчетов. В этом случае, целесообразно применять компьютерное моделирование напряжённно-деформированного состояния бетона.*

**Ключевые слова:** бетон, компьютерное моделирование, напряжённно-деформированное состояние, глубинный датчик.

Компьютерное моделирование напряжённно-деформированного состояния бетона, позволит достоверно определять характеристики изделий, без проведения натурных испытаний. Это снижает трудоёмкость при исследованиях остаточного ресурса конструкций, а, следовательно, экономит не только время, но и финансовые ресурсы.

Однако прежде чем создавать модель напряжённно-деформированного состояния, требуется изучить характеристики материала. Причём для более достоверных данных недостаточно одного метода исследования [1]. Поэтому, для более детального изучения развития деформаций в бетоне были разработаны и смоделированы глубинные датчики [2, 3] и собрано лабораторное оборудование для считывания получаемой информации.

Для дальнейшего моделирования, экспериментальным путём определялось напряжённно-деформированное состояние мелкозернистого бетона и цементных образцов [4, 5].

Для определения напряжённно-деформированного состояния бетона в качестве опытного образца использовалась бетонная призма с размерами 100x100x200 мм. Состав бетонной смеси из расчета на 1м<sup>3</sup>: портландцемент марки 400 – 1500 кг, песок – 500 кг, вода – 300 л.

Для фиксации датчиков в металлической форме использовалась натянутая проволока малого диаметра. Два датчика размещались взаимно перпендикулярно друг другу (по направлениям развития главных деформаций) с зазором, чтобы они не соприкасались. Схема расположения глубинных тензодатчиков в образце-призме представлена на рисунке 1

Результаты испытаний бетонной призмы фиксировались как с поверхности, при помощи гидравлического пресса ПГМ-500МГ4А (рисунок 2), так и изнутри (при помощи вольтметра и глубинных датчиков). Полученные данные представлены в таблице 1