

¹Шеховцова Ю.А., PhD,²Жерновский И.В., канд. геол.-мин. наук, проф.,²Кожухова Н.И., канд. техн. наук, доц.,¹Ковтун М.Н., PhD,¹Керсли Э., PhD, проф.,²Жерновская И.В., ст. преп.¹Университет Претории, ЮАР²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПРЕССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ЗОЛ-УНОСА КИСЛОГО СОСТАВА

Возможность контроля качества сырья при производстве строительных композитов является одним из ключевых преимуществ, позволяющих получать конечные продукты с заранее прогнозируемыми характеристиками. Оценку пригодности того или иного сырьевого компонента принято осуществлять на ранних этапах производственного процесса, а не в результате определения свойств конечного материала с целью оптимизации временного и сырьевого ресурсов. В рамках данного исследования предложена и апробирована экспресс-методика оценки реакционной активности зол-уноса кислого состава в геопалимерных вяжущих системах. В основе этой методики лежит ранее предложенная авторами методика прогнозной оценки. В качестве определяющего параметра введен фактор K , который представляет собой комплекс параметров зол-уноса, таких как химический состав, удельная поверхность, морфология частиц, содержание стеклофазы и ее структурные особенности, которые в совокупности позволяют оценить качество техногенного алюмосиликата с высокой степенью достоверности.

Установлено, что коэффициент корреляции между параметром K и пределом прочности при сжатии геопалимерного камня в возрасте 1 суток характеризуется более высоким значением по сравнению с аналогичным показателем для геопалимерных образцов в возрасте 91 суток.

Установленная закономерность позволяет говорить о более высокой эффективности применения предложенной экспресс-методики оценки реакционной активности зол-уноса для геопалимерных вяжущих систем на более ранних сроках твердения.

Ключевые слова: золы-уноса кислого состава, оценка реакционной активности, расчётная экспресс-методика, предел прочности при сжатии геопалимеров.

Введение. Среди наиболее масштабных индустриальных источников, производящих твердофазные крупнотоннажные побочные продукты производства, являются энергетические и топливные электростанции, работающие на угольном сырье. При этом, львиная доля образующихся отходов преимущественно алюмосиликатного состава не имеет практического применения, находя свое последнее пристанище в открытых отвалах, зачастую, плохо оборудованных, инициируя негативное экологическое воздействие на прилегающие земельные территории, водные и воздушный бассейны. Наиболее остро стоит проблема утилизации отходов, содержащих в своем составе малое количество оксидов щелочноземельных металлов (CaO , MgO) и, поэтому, не проявляющих вяжущие свойства в водной среде по сравнению с традиционными гидравлическими вяжущими системами [1–5]. В то же время на основании существующего отечественного и зарубежного опыта [6–8] этот тип побочного продукта в виде зол-уноса эффективно

работает в геопалимерах. Однако, с учетом особенностей использования техногенного сырья, а также слабой изученности этих вяжущих, которые являются относительно новыми, существует ряд задач исследовательского характера, ориентированных на получение высококачественных строительных композитов. К одной из стратегических задач для геопалимерных вяжущих систем на основе кислого алюмосиликатного сырья техногенного происхождения следует отнести разработку методики оценки пригодности сырьевых компонентов с точки зрения их реакционной активности под действием щелочной активации. Актуальность решения отмеченной задачи обоснована комплексностью контроля качества зол-уноса, вызванной варьированием их свойств в широком диапазоне благодаря различию характеристик исходного угольного сырья, а также нестабильности технологических параметров процесса его сжигания. Как следствие, отсутствие четкого контроля качества исходного сырья объ-

ясняет невозможность получения геополимерных систем с необходимыми и заранее установленными эксплуатационными показателями.

Формирование структуры геополимеров зол-уноса кислого состава является сложным и малоизученным процессом, в котором кинетика и особенности новообразований зависят от ряда факторов, таких как фазово-минеральный и химический составы алюмосиликатного компонента, гранулометрия и морфология частиц зол-уноса, вида щелочного активирующего агента и его концентрации в вяжущей системе. Среди технологических факторов следует выделить порядок введения и смешения сырьевых компонентов, а также вид и режим термической обработки свежеприготовленной сырьевой смеси. На основании имеющегося зарубежного опыта, выделены основные критерии эффективности зол-уноса для производства геополимеров, среди которых: содержание оксидов щелочноземельных металлов (CaO, MgO) – до 20 %; концентрация железистого компонента (Fe_xO_y) – до 10 %; содержание силикатного компонента в форме стеклофазы – не менее 50 %; доля тонкодисперсной фракции (d ≤ 45 мкм) – от 80 до 90 %; содержание несгоревшего углеродного остатка – до 5 % [7–10]. Учитывая многолетний интерес к геополимерным системам, зарубежными и отечественными учеными проведен довольно большой объем исследований, ориентированных на изучение минерально-химических, а также фазовых и структурных характеристик зол-уноса кислого состава [10–12]. Однако вопросы оценки реакционной активности зол-уноса под действием высокощелочного воздействия в системе геополимерных вяжущих с использованием расчетных методик освоены весьма слабо.

Ранее было установлено, что одним из ключевых параметров, определяющих степень активности взаимодействия кислого алюмосиликата с

щелочным компонентом и последующего формирования прочного каркаса, является степень SiO₂-связности элементарных единиц – кремнекислородных тетраэдров – в составе стеклофазы зол-уноса [13].

В рамках данного исследования предложена расчетная методика оценки реакционной активности зол-уноса кислого состава в геополимерной системе с учетом расширенного спектра их генетических характеристик.

Методы и материалы. Для определения химического и фазово-минерального составов образцов зол-уноса был осуществлен рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализ зол-уноса на спектрометре ARL9400XP с использованием излучения Си-анода (Ni-фильтр для ослабления β-компоненты излучения). Шаг сканирования 0,05°, время измерения интенсивности в точках сканирования – 1 с.

Содержание кристаллической и аморфной фаз, а также качественный анализ их компонент в составе зол-уноса (табл. 3) были определены с использованием количественного полнопрофильного РФА с внутренним эталонированием (10% вес. металлического Si), а также с использованием расчётной программы DDM v.1.95e [14].

Гранулометрический анализ осуществлялся с использованием лазерного анализатора частиц Mastersizer 2000, Malvern Instruments. Измерение удельного веса зол-уноса осуществлялось с использованием пикнометра AccuPyc II 1340 Pycnometer (Micrometrics).

Удельная поверхность по методу Блейна зол-уноса была измерена на приборе ПСХ-12.

Для проведения исследований в рамках данной работы были использованы золы-уноса кислого состава с 8 предприятий углесжигания ЮАР, работающих на каменном угле (табл. 1).

Таблица 1

Физические характеристики зол-уноса

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8
Удельный вес, г/см ³	2,22	2,26	2,35	2,30	2,31	2,31	2,27	2,14
Удельная поверхность по Блейну (м ² /кг)	232,2	316,2	452,4	368,0	303,6	292,7	247,1	171,6
Удельная поверхность по РРЧ* (м ² /кг)	183,6	304,5	445,8	303,4	192,9	178,1	158,9	79,3
Фактор формы (ξ)	1,26	1,04	1,01	1,21	1,57	1,64	1,56	2,16
<45 мкм, %	51,96	83,02	97,98	86,39	86,02	73,43	51,19	38,22
d ₁₀ , мкм	2,6	1,3	0,8	1,9	3,2	3,2	3,5	8,6
d ₅₀ , мкм	42	11	5	14	14	21	42	62
d ₉₀ , мкм	168	62	21	51	51	76	168	226

*РРЧ – распределение размеров частиц согласно данным лазерной гранулометрии

Более подробное описание такого параметра как фактор формы и пример его расчета отражены в работе С. Хопкинса и др. [15]. В рамках

данного исследования под реакционной активностью зол-уноса принято понимать способность, а

также интенсивность растворения в условиях высокощелочного воздействия. Логично предположить, что наиболее важными параметрами, определяющими реакционную активность зол-уноса, как любого минерального компонента, являются его генетические, т.е. химические, морфологические и физико-механические характеристики, к которым следует отнести, содержание основных оксидов их соотношение; содержание стеклофазы и ее структурный характер, наличие кристаллических минеральных образований и их концентрацию; дисперсность, характер гранулометрического распределения, а также форму твердофазных частиц компонента.

Так, концентрация стеклофазы и ее структурные особенности (степень полимеризации

или SiO₂-связности) определяет степень растворимости золы-уноса под действием щелочного активатора [16]. Морфология (фактор формы) и дисперсность твердофазных частиц оказывает значительное влияние на водопотребность геополлимерной вяжущей системы [15]. Опираясь на выше отмеченное предположение в рамках этого исследования были подобраны и применены необходимые измерительно аналитические методики, позволяющие получить и проанализировать характер влияния исходных характеристик зол-уноса на их реакционную активность, представленную в виде компрессионной прочности геополлимерных вяжущих.

Химический состав образцов зол-уноса представлен в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав зол-уноса (вес.%)

	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	57,30	54,90	53,40	50,80	51,90	47,10	51,50	57,80
TiO ₂	1,57	1,62	1,69	1,74	1,60	1,72	1,72	1,24
Al ₂ O ₃	29,60	31,50	31,80	31,10	29,20	32,80	30,50	27,30
Fe ₂ O ₃	3,89	3,53	3,69	3,50	3,05	3,22	4,70	6,13
MnO	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,04	0,05	0,08
MgO	0,89	1,00	1,12	1,49	1,41	1,90	1,49	0,68
CaO	4,79	4,55	4,59	5,78	7,55	7,67	6,49	3,45
Na ₂ O	0,20	0,40	0,26	0,11	0,31	<0,01	<0,01	<0,01
K ₂ O	0,86	0,83	0,92	1,06	1,19	0,59	0,91	0,98
P ₂ O ₅	0,28	0,37	0,67	0,80	0,54	0,61	0,61	0,36
Cr ₂ O ₃	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02
V ₂ O ₅	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,04	0,00	0,04
ZrO ₂	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05
SrO	0,12	0,13	0,15	0,32	0,27	0,22	0,20	0,08
WO ₃	0,08	0,04	<0,01	<0,01	0,05	0,06	0,03	0,06
BaO	0,14	<0,01	0,16	0,22	0,16	0,14	0,14	<0,01
п.п.п	0,16	0,96	1,38	2,83	2,67	3,73	1,51	1,63
Σ	100,02	99,98	99,98	99,92	100,04	99,92	99,94	99,92

Методика определения содержания окислов в составе стеклофазы зол-уноса более подробно представлена в [17]. В данном исследовании использован аналогичный алгоритм, суть которого

заключается в вычитании из значений молекулярных количеств химических компонентов зол-уноса соответствующих компонентов, входящих в состав кристаллических фаз (табл. 3).

Таблица 3

Фазово-минеральный состав исследуемых зол-уноса

Зола-уноса	1	2	3	4	5	6	7	8
Минерал/фаза								
Кварц	10,0	9,4	8,5	7,2	10,6	5,5	9,9	9,0
Муллит	16,0	22,2	18,3	16,4	23,9	27,6	24,0	19,5
Магнетит	0,9	1,3	1,1	1,2	0,9	1,3	2,1	2,1
Гематит	-	-	-	1,0	1,2	0,8	1,2	1,6
Известь	-	0,5	0,5	0,6	1,0	0,7	0,4	-
Периклаз	-	-	-	0,8	0,8	0,9	0,7	-
Стеклофаза	73,1	66,6	71,6	72,8	61,6	63,2	61,7	67,8

Используя информацию о содержании оксидов в составе стеклофазы зол-уноса был произведен расчет значений степени полимеризации или

степень SiO₂-связности кремнекислородного тетраэдра стеклофазы по формуле (1), ранее предложенной А. Аппеном [18, 19]:

$$f_{SiO_2} = \frac{\gamma_{SiO_2}}{\gamma_{Me_2O} + \gamma_{MeO} + 3\gamma_{Me_2O_3} + 2\gamma_{MeO_2} + 5\gamma_{Me_2O_5} + 3\gamma_{MeO_3}} \quad (1)$$

где γ – молярные доли оксидов SiO_2 и Me_xO_y в составе стеклофазы. Полученные результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4

Степень SiO_2 -связности кремнезема в стеклофазе зол-уноса

	1	2	3	4	5	6	7	8
f_{Si}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
o_2	27	32	26	11	32	20	23	56

Для реализации возможности учета влияния комплекса генетических характеристик золы-уноса на ее реакционную активность в геополлимерной вяжущей системе на данном этапе исследования был введен некий параметр K , который связывает между собой ранее упомянутые ключевые характеристики золы-уноса как минерального компонента и может быть выражен формулами (2) и (3):

$$K = \frac{S^{Блейн}}{\xi} \cdot C_{аморфн.} \cdot \exp(f_{SiO_2}), \quad (2)$$

или

$$K = S^{PPЧ} \cdot C_{аморфн.} \cdot \exp(f_{SiO_2}) \quad (3)$$

где ξ – фактор формы частиц золы-уноса, представляющий собой соотношение экспериментальной и расчетной значений удельной поверхности; $S^{Блейн}$ – экспериментальное значение удельной поверхности золы-уноса, определяемое по методу воздухопроницаемости (метод Блейна); $S^{PPЧ}$ – теоретическое значение удельной поверхности золы-уноса, рассчитываемое на основании данных лазерного анализатора частиц (гранулометрический анализ); $C_{аморфн.}$ – содержание стеклофазы в составе золы-уноса (%); f_{SiO_2} – коэффициент степени полимеризации/связности, рассчитываемый с использованием формулы (1).

Расчетные значения параметра K для исследуемых зол-уноса представлены в таблице 5.

Таблица 5

Расчетные значения параметра K для исследуемых зол-уноса

Зола-уноса	1	2	3	4	5	6	7	8
Значение параметра K	185,7	286,5	427,5	296,1	174,0	158,0	136,6	80,8

Для оценки реакционной активности используемой подборки зол-уноса были заформованы образцы-балочки геополлимерных вяжущих из смесей равной подвижности – расплав конуса находится в диапазоне 170–180 мм. После формовки образцы были подвержены термической

обработке при температуре 60 °С в сушильном шкафу в течение 24 часов.

Полученные результаты прочностных характеристик затвердевших образцов геополлимерных вяжущих представлены в таблице 6.

Таблица 6

Прочностные характеристики геополлимерных вяжущих

Предел прочности при сжатии, МПа	1	2	3	4	5	6	7	8
1 сутки	28,8	35,9	60,3	42,3	22,2	18,4	8,6	3,5
91 сутки	67,1	71,3	88,9	67,8	36,1	27,1	31,7	16,5

С использованием данных таблиц 5 и 6 были построены графические зависимости между расчетным значением параметра K и прочностными значениями геополлимерных вяжущих в различном возрасте. Для возможности оценки степени корреляции между выбранными параметрами подобрана оптимальная в данном случае аппроксимирующая функция – линейная, а также представлены значения коэффициентов степени корреляции (рисунок 1). Кроме того, представлены обозначения относительных размерных параметров зол-уноса.

Согласно данным рисунка 1, при увеличении параметра K наблюдается увеличение предела прочности при сжатии геополлимерных образцов

вяжущих. Кроме того, анализируя полученные графические зависимости, для геополлимерных вяжущих систем на ранних сроках твердения (1 сутки) характерна преимущественно линейная зависимость от параметра K , что подтверждается высоким значением коэффициента корреляции ($R^2=0.9602$). При увеличении срока твердения экспериментальных вяжущих систем коэффициент корреляции смещается в сторону меньших значений (в возрасте 91 суток $R^2=0.8336$), зависимость отклоняется от линейной. Предположительно, это может быть ассоциировано с непрерывными процессами структуро- и фазообразования при дальнейшем твердении геополлимерной системы.

Таким образом, предложенная усовершенствованная экспресс-методика продемонстрировала свою эффективность и может применяться при синтезе геополимерных систем для осуществления расчетной оценки реакционной активности

зол-уноса кислого состава и прогнозирования прочностных характеристик геополимерных вяжущих систем на ранних сроках твердения.

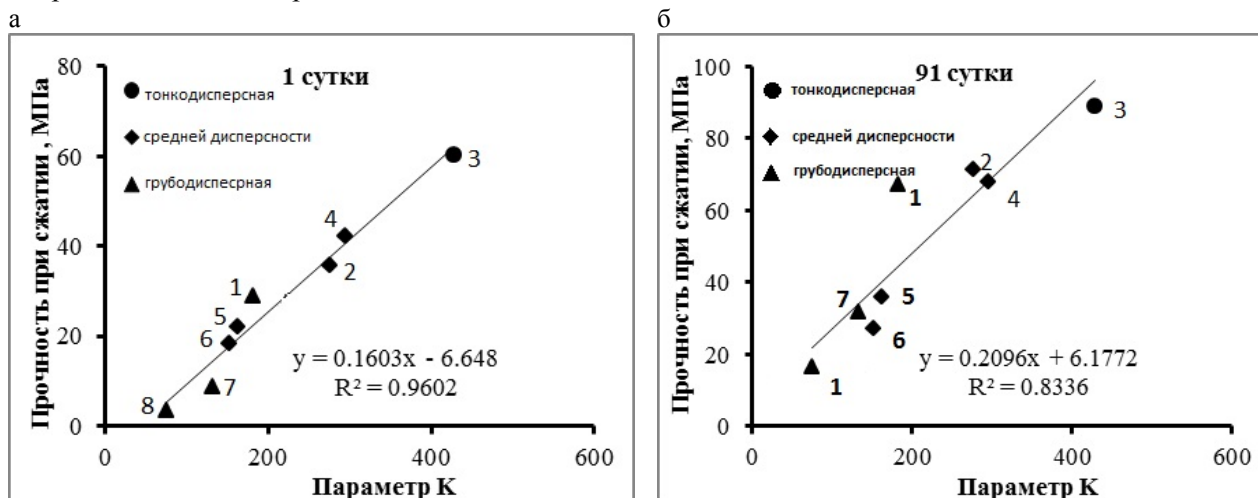


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии геополимерных вяжущих на основе зол-уноса от величины параметра K

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sobolev K. Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag // *Cement and concrete composites*. 2005. № 27(7). P. 848–853.

2. Kozhukhova N., Kadyshev N., Cherevatova A., Voitovich E. Reasonability of application of slags from metallurgy industry in road construction // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. № 692. P. 776–782.

3. Агеева М.С., Боцман Л.Н., Боцман А.Н., Бондаренко А.И. Эффективность использования отходов промышленности в производстве вяжущих веществ // *Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий: Материалы X Межрегиональной научно-технической конференции молодых ученых, специалистов и студентов вузов*. Под редакцией А.И. Николаева, Д.П. Домонова. 2016. С. 6–8.

4. Alfimova N.I., Sheychenko M.S., Karatsupa S.V., Yakovlev E.A., Kolomatskiy A.S., Shapovalov N.N. Features of application of high-mg technogenic raw materials as a component of composite binders // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Т. 9. № 11. С. 779–783.

5. Lesovik V.S., Alfimova N.I., Trunov P.V. Reduction of energy consumption in manufacturing the fine ground cement // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Т. 9. № 11. С. 745–748.

6. Кожухова Н.И., Жерновский И.В., Фомина Е.В. Фазаобразование в геополимерных системах на основе зол-уноса Апатитской ТЭЦ // *Строительные материалы*. 2015. № 12. С. 85–88.

7. Fernández-Jiménez A., Palomo A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements // *Fuel*. 2003. 382. P. 2259–2265.

8. Davidivits J. *Geopolymer. Chemistry & Application*. 3rd edition. Institut Geopolymere. Saint-Quentin, 2011. 612 p.

9. Кожухова Н.И., Жерновский И.В. Геополимерное вяжущее и бетон на основе зол-уноса ТЭС. Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Dudweiler Landstr. 99, 661123 Saarbücken, Germany, 2015. 183 с.

10. Fernández-Jiménez A., Palomo A., Sobrados I., Sanz J. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91, 2006. P. 111–119.

11. Maxim Kovtun, Mateusz Ziolkowski, Julia Shekhovtsova, Elsabe Kearsley Direct electric curing of alkali-activated fly ash concretes: a tool for wider utilization of fly ashes // *Journal of Cleaner Production*. 2016. 133. P. 220–227.

12. Матченко Н.А., Ламов И.В., Гончарова М.А. Исследование влияния мелкозернистых отходов производства на физико-механические свойства геополимерных бетонов // *Тенденции развития современной науки: Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: в 2-х частях*. 2017. С. 432–434.

13. Кожухова Н.И., Жерновский И.В., Соболев К.Г. Влияние различий рентгеноаморфной фазы в составе низкокальциевых алюмосилика-

тов на прочностные характеристики геополимерных систем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. С. 5–12.

14. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference minimization // Journal of Applied Crystallography. 2004. 37. P. 743–749.

15. Hopkins C.J., Cabrera J.G., The shape factor: a parameter to assess the effect of pulverized fuel ash on the flow properties of cement pates and concrete. International symposium on cement and concrete science. Beijing, China. 1984.

16. Dove P.M., Han N., Wallace A.F., De Yoreo J.J. Kinetics of amorphous silica dissolution and the

paradox of the silica polymorphs. PNAS. July 22, 2008. Vol. 105. № 29. P. 9903–9908.

17. Ward C.R., French D. Determination of glass content and estimation of glass composition in fly ash using quantitative X-ray diffractometry. Fuel. 2006. 85. P. 2268–2277.

18. Аппен А.А. Химия стекла. Ленинград: Химия. 1974. 352 с

19. Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M. Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements – A step towards sustainable building material and waste utilization // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33.

Информация об авторах

Шеховцова Юлия Александровна, PhD, научный сотрудник кафедры гражданского строительства.
E-mail: j.shekhovtsova@gmail.com
Университет Претории, Претория 0002, ЮАР.

Жерновский Игорь Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов.
E-mail: zhernovsky.igor@mail.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кожухова Наталья Ивановна, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов.
E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru; kozhuhovana.ni@bstu.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ковтун Максим Николаевич, PhD, кандидат технических наук, профессор кафедры гражданского строительства.
E-mail: maxim.kovtun@gmail.com
Университет Претории, Претория 0002, ЮАР

Керсли Эльсабэ, PhD, профессор кафедры гражданского строительства.
E-mail: elsabe.kearsley@up
Университет Претории, Претория 0002, ЮАР.

Жерновская Ирина Васильевна, старший преподаватель кафедры высшей математики.
E-mail: ZIV_1111@mail.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в июне 2018 г.

© Шеховцова Ю.А., Жерновский И.В., Кожухова Н.И., Ковтун М.Н., Керсли Э., Жерновская И.В., 2018

J.A. Shekhovtsova, I.V. Zhernovsky, N.I. Kozhukhova, M.N. Kovtun, E. Kearsley, I.V. Zhernovskaya EXPRESS-METHOD FOR DETERMINATION OF COMPRESSIVE STRENGTH OF GEOPOLYMER BASED ON LOW-CALCIUM FLY ASH

Capability of quality control for raw materials when construction composite production is one of the key advantages, allowing production the products with forecasted characteristics. Suitability evaluation of raw material is preferred to make at early stage of production process, but not when study of final product. It allows saving a time and material sources. In this paper the express-method of determination of reactivity of low-calcium fly ash in geopolymer system was proposed. This method is based on earlier forecast estimation method proposed by the authors. As a main factor the K factor was applied, which consists of such fly ash characteristics as chemical composition, content of vitreous phase and its structure features, specific surface

area, particle shape, those allow estimation a quality of industrial aluminosilicate raw component with high-degree of certainty.

Correlation coefficient between the K parameter and yield compressive strength of geopolymer paste in 1-day age was higher than for geopolymer pastes in 91-days age. This observation demonstrates a high feasibility of the proposed express-method for determination of fly ash reactivity in geopolymer at earlier setting time.

Keywords: low-calcium fly ash, reactivity estimation, calculated express-method, compressive strength of geopolymer paste

REFERENCES

1. Sobolev K. Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag. Cement and concrete composites, 2005, no. 27(7), pp. 848–853.
2. Kozhukhova N., Kadyshchev N., Cherevatova A., Voitovich E. Reasonability of application of slags from metallurgy industry in road construction. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017, no. 692, pp. 776–782.
3. Ageeva M.S., Botsman L.N., Botsman A.N., Bondarenko A.I. Efficiency of using of industrial wastes when binder production. Research and practice problem in chemistry and chemical technology: Proceeding of Xth Interregional scientific-technological Conf. of young scientists, specialists and students edited by A.I. Nikolaev, D.P. Domonov, 2016, pp. 6–8.
4. Alfimova N.I., Sheychenko M.S., Karatsupa S.V., Yakovlev E.A., Kolomatskiy A.S., Shapovalov N.N. Features of application of high-mg technogenic raw materials as a component of composite binders. Research Journal of Applied Sciences, 2014, vol. 9, no. 11, pp. 779–783.
5. Lesovik V.S., Alfimova N.I., Trunov P.V. Reduction of energy consumption in manufacturing the fine ground cement. Research Journal of Applied Sciences, 2014, vol. 9, no. 11, pp. 745–748.
6. Kozhukhova N.I., Zhernovskiy I.V., Fomina E.V. Phase Formation in Geo-Polymer Systems on the Basis of Fly Ash of Apatity TPS. Stroitel'nye Materialy, 2015, no. 12, pp. 85–88.
7. Fernández-Jiménez A., Palomo A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. Fuel, 2003, no 382, pp. 2259–2265.
8. Davidivits J. Geopolymer. Chemistry & Application. 3rd edition. Institut Geopolymere. Saint-Quentin, 2011, 612 p.
9. Kozhukhova N.I., Zhernovskiy I.V. Fly ash-based geopolymer binder and concrete. Monography. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Dudweiler Landstr. 99, 661123 Saarbücken, Germany, 2015, 183 p.
10. Fernández-Jiménez A., Palomo A., Sobrados I., Sanz J. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. Microporous and Mesoporous Materials, 2006, no. 91, pp. 111–119.
11. Maxim Kovtun, Mateusz Ziolkowski, Julia Shekhovtsova, Elsabe Kearsley Direct electric curing of alkali-activated fly ash concretes: a tool for wider utilization of fly ashes. Journal of Cleaner Production, 2016, no.133, pp. 220–227.
12. Matchenko N.A., Lamov I.V., Goncharova M.A. Study of effect of fine-aggregate industrial wastes on physical and mechanical characteristics of geopolymer concrete. Development tendencies in modern science: Proceedings of Scientific Conf. of students and postgraduate students from Lipetsk State Technical University: in two parts, 2017, pp. 432–434.
13. Kozhukhova N.I., Zhernovskiy I.V. Sobolev K.G. Effect of variations in vitreous phase of low-calcium aluminosilicates on strength properties of geopolymer systems. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 4, pp. 5–12.
14. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference minimization. Journal of Applied Crystallography, 2004, vol. 37, pp. 743–749.
15. Hopkins C.J., Cabrera J.G., The shape factor: a parameter to assess the effect of pulverized fuel ash on the flow properties of cement pates and concrete. International symposium on cement and concrete science. Beijing, China, 1984.
16. Dove P.M., Han N., Wallace A.F., De Yoreo J.J. Kinetics of amorphous silica dissolution and the paradox of the silica polymorphs. PNAS. July 22, 2008, vol. 105, no. 29, pp. 9903–9908.
17. Ward C.R., French D. Determination of glass content and estimation of glass composition in fly ash using quantitative X-ray diffractometry. Fuel, 2006, no. 85, pp. 2268–2277.
18. Appen, A.A., Chemistry of Glass. Leningrad: Khimiya, 1974, 352 p.
19. Shekhovtsova J., Zhernovskiy I., Kovtun M. Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements – A step towards sustainable building material and waste utilization. Journal of Cleaner Production, 2018, vol. 178, pp. 22–33.

*Information about the author***Julia A. Shekhovtsova**, PhD.

E-mail: j.shekhovtsova@gmail.com

Department of Civil Engineering, University of Pretoria
Pretoria, 0002, South Africa**Igor V. Zhernovsky**, PhD, Professor.

E-mail: zhernovsky.igor@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, St. Kostukova, 46.**Natalia I. Kozhukhova**, PhD, Assistant professor.

E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, St. Kostukova, 46.**Maxim N. Kovtun**, PhD.

E-mail: maxim.kovtun@gmail.com

Department of Civil Engineering, University of Pretoria.
Pretoria, 0002, South Africa.**Elsabe Kearsley**, Professor.

E-mail: elsabe.kearsley@up

Department of Civil Engineering, University of Pretoria.
Pretoria, 0002, South Africa.**Irina V. Zhernovskaya**, Senior lecturer.

E-mail: ZIV_1111@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, St. Kostukova, 46.

*Received in June 2018***Для цитирования:**

Шеховцова Ю.А., Жерновский И.В., Кожухова Н.И., Ковтун М.Н., Керсли Э., Жерновская И.В. Экспресс-метод определения компрессионных характеристик геополимеров на основе зол-уноса кислого состава // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №8. С. 28–35. DOI: 10.12737/article_5b6d58466ede22.04375827

For citation:

Shekhovtsova J.A., Zhernovsky I.V., Kozhukhova N.I., Kovtun M.N., Kearsley E., Zhernovskaya I.V. Express-method for determination of compressive strength of geopolymer based on low-calcium fly ash. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 8, pp. 28–35. DOI: 10.12737/article_5b6d58466ede22.04375827