

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33

*\*Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

*\*E-mail: markovandrey11@gmail.com*

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА В ПРИСУТСТВИИ ТОПЛИВНЫХ ЗОЛ

**Аннотация.** *Снижение количества потребления наиболее широко распространенного и дорогостоящего в строительстве неорганического вяжущего гидратационного типа твердения – портландцемента – является одной из важнейших задач для строительной отрасли. В свете сложившейся тенденции ресурсо- и энергосбережения, а также снижения экологического прессинга большой интерес представляет использование отходов топливно-энергетических предприятий в виде зол различных типов (кислая, основная), представляющих собой тонкодисперсное сырье преимущественно алюмосиликатного состава, скопившегося в отвалах топливоперерабатывающих предприятий. В работе произведен анализ влияния минеральных добавок в виде топливных зол, использование которых предусматривает замену части портландцемента (15–30 % от общей массы портландцемента, с шагом 5 %), на кинетику твердения вяжущего. На основании результатов испытаний на прочность образцов вяжущего с добавками произведен расчет прогнозирования прочности, на основе теории переноса. Проведен анализ кинетики набора прочности портландцемента как на ранних, так и на поздних сроках твердения; установлена эффективность и оптимальная концентрация применения топливных зол в зависимости от типа.*

**Ключевые слова:** *топливная зола, минеральная добавка, неорганическое вяжущее, портландцемент.*

**Введение.** Вопросы применения отходов топливно-энергетических предприятий в строительной индустрии имеют богатую историю, но актуальны и в настоящее время. Согласно анализу проведенных исследований, наиболее распространенным направлением использования топливных зол является получение композиционных материалов различного назначения на основе вяжущего гидратационного типа твердения – портландцемента [1–4]. При этом, интерес представляют, как кислые (или низкокальциевые), так и основные (или высококальциевые) топливные золы, в силу того, что первые обладают пуццолановой активностью, а вторые, как правило, имеют в составе компоненты, которые наравне с клинкерными минералами активно участвуют в процессе гидратации.

Кроме особенностей по составу данный вид сырья при переходе от одного типа к другому имеет различие в морфологии поверхности частиц, гранулометрическом составе, донорно-акцепторной способности и т.п., что обусловлено видом сжигаемого угля, технологией его сжигания и удаления образовавшихся остатков в виде зол («мокрая» или «сухая»). Опыт исследований влияния топливных зол на цементные системы показывает положительные результаты [5–10]. Так применение золы позволяет получать, например, жаропрочные или гидротехнические (в некоторых случаях количество золы достигает 50 %) бетоны [11–13]. При этом, золы в составе

цементного вяжущего могут проявлять пластифицирующую и водоудерживающую способность [14–16]. Установлено, что прочность бетонов с применением зол напрямую зависит от ее площади удельной поверхности [17–18].

Несмотря на накопленный опыт исследований, прочность цементного вяжущего с использованием зол определяется практически, что требует больших временных затрат. Однако, учитывая физико-механические, физико-химические и структурные особенности топливных зол при подборе типа и количества зол для получения модифицированного вяжущего с оптимальным набором прочностных характеристик, возможно применение расчетной методики, разработанной д.т.н., профессором Рахимбаевым Ш.М. [19], которая предполагает расчет коэффициента торможения процесса гидратации цемента на основании данных о кинетике набора прочности материала в течении 28 суток. Расчет прогнозируемой прочности был разработан для классических цементных систем [20, 21], но применялся и для композиционных вяжущих [22].

Таким образом, учитывая высокую точность прогнозирования прочности вяжущих с применением указанной методики, а также ее экспрессность, представляется актуальным ее использование по отношению к цементам с применением топливных зол различных типов.

**Методология.** Расчет прогнозируемой прочности вяжущего предусматривает изучение кинетики набора прочности в течении 28 суток. Для

этого на основе исследуемых сырьевых материалов были подготовлены образцы-балочки размером  $4 \times 4 \times 16$  см и определена их прочность при сжатии на 1, 3, 7 и 28 сутки. Полученные результаты испытаний явились исходными данными для дальнейших расчетов.

С целью изучения кинетики набора прочности и дальнейшего расчета прогнозируемой прочности модифицированного вяжущего в качестве сырьевых материалов применялись:

– портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ЗАО «Белгородский цемент»;

– основная (или высококальциевая) топливная зола Назаровской ТЭС (Красноярская обл.), полученная при сжигании бурого угля Ирша-Бородинского месторождения;

– кислая (или низкокальциевая) топливная зола Троицкой ГРЭС (Челябинская обл.), полученная при сжигании каменного угля Экибастузского месторождения.

Следует отметить, что топливные золы использовались в качестве активной минеральной добавки к цементу в интервале от 15 до 30 % от общей массы цемента с шагом 5 %. Количество воды для затворения принимали в соответствии с определенной ранее водопотребностью топливных зол по расплыву конуса. Так для вяжущего с использованием высококальциевой топливной золы Назаровской ТЭС при всех концентрациях водовяжущее отношение (В/В) составило 0,39, для вяжущего с использованием низкокальциевой топливной золы В/В увеличивалось с ростом ее количества в составе вяжущего. При использовании 15, 20, 25 и 30 % низкокальциевой топливной золы Троицкой ГРЭС В/В составило соответственно 0,39, 0,40, 0,41 и 0,42.

В основу используемого в работе расчета положена теория переноса. На основе анализа кинетики ряда важных процессов при производстве и эксплуатации строительных материалов, изделий и конструкций выделяют два частных случая, которые представляются следующими уравнениями:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_1 \times \sigma, \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_2 \times \tau, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время твердения (гидратации), сут;  $\sigma$  – предел прочности при сжатии, МПа;  $(\tau/\sigma)_0$  – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации), сут/МПа;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты торможения процесса твердения (гидратации).

На основании уравнений, характеризующих частные случаи, с учетом начальной скорости набора прочности и коэффициента ее торможения для определения прогнозной прочности вяжущих была выведена следующая формула:

$$\sigma = \frac{\tau \times U_0}{1 + \tau \times U_0 \times K_{tor}}, \quad (3)$$

где  $U_0$  – начальная скорость;  $K_{tor}$  – коэффициент торможения.

**Основная часть.** Анализ кинетики твердения портландцемента с использованием минеральных добавок в виде топливных зол в первые 28 суток показывает, что при использовании кислой (или низкокальциевой) золы Троицкой ГРЭС прочность вяжущего при всех концентрациях превышает этот же показатель для контрольного образца (табл. 1). Следует отметить, что в первые сутки при использовании кислой золы в количестве 15 и 30 % прочность образцов при сжатии превышает контрольное значение практически на 2 МПа. При использовании этой же золы в количестве 20 и 25 % прочность образцов вяжущего близка к прочности контрольного образца.

Примерно такая же тенденция сохраняется и на 3 сутки. Однако, значения прочности при всех концентрациях минеральной добавки ниже, чем у образца без нее (на 15,5–45,5 %).

При испытании образцов модифицированного вяжущего на 7 сутки ситуация существенно меняется. Так при использовании кислой золы в количестве 15, 20 и 30 % прочность в среднем на 27,5 % ниже, у образцов без добавки. Обращают на себя внимание образцы с использованием золы Троицкой ГРЭС в количестве 25 %. Среднее значение прочности образцов в этом случае составляет 29 МПа, что лишь на 8,3 % ниже контрольного значения.

Так же существенно выделяются значения прочности при сжатии в результате испытания образцов с концентрацией кислой топливной золы в количестве 25 % и на 28 сутки. При этом прочность образцов модифицированного вяжущего превышает прочность образцов без добавки на 2 %.

В случае с высококальциевой золой Назаровской ТЭС (табл. 1) на первые сутки испытаний среди образцов модифицированного вяжущего наибольшими значениями прочности отличаются образцы, содержащие 15 и 30 % добавки. Однако, это на 31,1 и 19,2 % соответственно ниже, чем прочность контрольного образца, что весьма существенно. Данный факт свидетельствует о том, что использование основной топливной золы Назаровской ТЭС тормозит процесс твердения портландцемента на начальном этапе.

На 3 сутки прочность образцов портландцемента с использованием всех концентраций высококальциевой золы существенно возрастает и превышает контрольное в среднем на 12 %.

При испытании образцов на 7 сутки максимальными значениями отличаются образцы с ис-

пользование основной топливной золы Назаровской ТЭС с содержанием 15 %. В данном случае

значение прочности лишь на 0,5 % ниже контрольного.

Таблица 1

### Кинетика твердения портландцемента с добавками топливных зол

№ п/п	Наименование и количество добавки	Прочность на сжатие, МПа			
		1 сут	3 сут	7 сут	28 сут
1	без добавки	8,30	20,80	31,20	43,10
2	зола Троицкой ГРЭС 15 %	10,04	17,57	22,66	37,27
3	зола Троицкой ГРЭС 20 %	8,47	14,19	22,16	31,19
4	зола Троицкой ГРЭС 25 %	8,50	11,96	28,63	43,99
5	зола Троицкой ГРЭС 30 %	10,23	15,39	23,10	33,98
6	зола Назаровской ТЭС 15 %	5,72	24,02	31,03	41,09
7	зола Назаровской ТЭС 20 %	2,52	23,03	24,26	28,11
8	зола Назаровской ТЭС 25 %	3,81	23,59	27,17	36,93
9	зола Назаровской ТЭС 30 %	6,71	22,75	24,69	31,73

Наиболее высоким значением прочности на сжатие на 28 сутки отличаются образцы на основе портландцемента с использованием 15 % основной топливной золы. Однако, значение прочности более чем на 3 % отличается от значения, регламентируемого ГОСТ (42,5 МПа), и почти на 5 % – от фактического значения прочности образцов без добавки.

Таким образом, на основании анализа кинетики набора прочности образцов вяжущего на основе портландцемента с использованием минеральных добавок в виде топливных зол различных типов можно сделать вывод, что наиболее эффективной сточки зрения достижения марочной прочности модифицированного вяжущего показывает себя кислая топливная зола Троицкой ГРЭС, что не противоречит сложившимся представлениям о влиянии зол на цементные системы. Однако, для достижения необходимой прочности требуется 25 % добавки. При использовании высококальциевой золы, в силу содержания клинкерных минералов, процесс набора прочности идет гораздо быстрее на 3 и 7 сутки, при этом требуется лишь 15 % процентов добавки. Однако, на 28 сутки прочность образцов на основе модифицированного вяжущего ниже требуемой.

На основании полученных данных о кинетике набора прочности цемента произведен расчет кинетических констант (табл. 2, 3):  $U_0$  – начальная скорость;  $K_{\text{тор}}$  – коэффициент торможения;  $K_{\text{кор}}$  – коэффициент корреляции.

Из таблиц видно, что использование кислой топливной золы Троицкой ГРЭС в любом количестве снижает начальную скорость, тогда как при использовании основной топливной золы Назаровской ТЭС, в частности при использовании 30 %, этот коэффициент возрастает по отношению к данному коэффициенту для контрольного контрольного состава на 5 %. Соответ-

ственно, в связи со снижением начальной скорости твердения возрастает коэффициент торможения в обоих случаях. Исключением, является лишь 25 %-ная концентрация кислой топливной золы. Это позволяет сделать вывод о том, что в присутствии топливных зол снижается интенсивность процесса гидратации портландцемента ввиду существенного снижения его количества.

Таблица 2

### Результаты расчёта по уравнениям теории переноса для вяжущего, модифицированного кислой топливной золой Троицкой ГРЭС

№ п/п	Наименование и концентрация добавки	Значения кинетических констант при расчёте		
		$U_0$	$K_{\text{тор}}$	$K_{\text{кор}}$
1	без добавки	11,18	0,198	0,999
2	зола Троицкой ГРЭС 15 %	9,59	0,0234	0,995
3	зола Троицкой ГРЭС 20 %	9,03	0,0282	0,999
4	зола Троицкой ГРЭС 25 %	7,19	0,0178	0,9823
5	зола Троицкой ГРЭС 30 %	9,86	0,0260	0,9976

Таблица 3

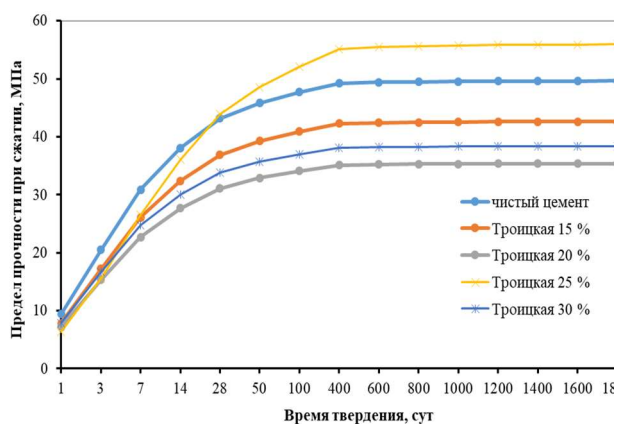
### Результаты расчёта по уравнениям теории переноса для вяжущего, модифицированного основной топливной золой Назаровской ТЭС

№ п/п	Наименование и концентрация добавки	Значения кинетических констант при расчёте		
		$U_0$	$K_{\text{тор}}$	$K_{\text{кор}}$
1	без добавки	11,18	0,198	0,999
2	зола Назаровской ТЭС 15 %	9,73	0,0204	0,9881
3	зола Назаровской ТЭС 20 %	5,61	0,0282	0,9247
4	зола Назаровской ТЭС 25 %	7,08	0,0216	0,9646
5	зола Назаровской ТЭС 30 %	11,76	0,0284	0,9963

Таблица 4  
**Расчетные прочности цементного камня, модифицированного кислой топливной золой Троицкой ГРЭС, в возрасте 28 суток**

№ п/п	σ <sub>расчетн</sub> , МПа	σ <sub>эксперим</sub> , МПа	Отклонение Δ, МПа	Отклонение Δ, %
1	36,87	37,27	0,40	1,08
2	31,10	31,19	0,09	0,29
3	43,92	43,99	0,07	0,15
4	33,76	33,98	0,22	0,65

В результате расчета прогнозируемой прочности на 28 сутки с использованием полученных кинетических констант было установлено, что экспериментальные и расчетные значения имеют высокую сходимость (табл. 4, 5).



На основании полученных данных был произведен расчет по прогнозированию набора прочности на длительный срок (рис. 1).

Таблица 5  
**Расчетные прочности цементного камня, модифицированного основной топливной золой Назаровской ТЭС, в возрасте 28 суток**

№ п/п	σ <sub>расчетн</sub> , МПа	σ <sub>эксперим</sub> , МПа	Отклонение Δ, МПа	Отклонение Δ, %
1	41,54	41,09	0,45	1,11
2	28,93	28,11	0,82	2,92
3	37,53	36,93	0,60	1,63
4	31,81	31,73	0,08	0,25

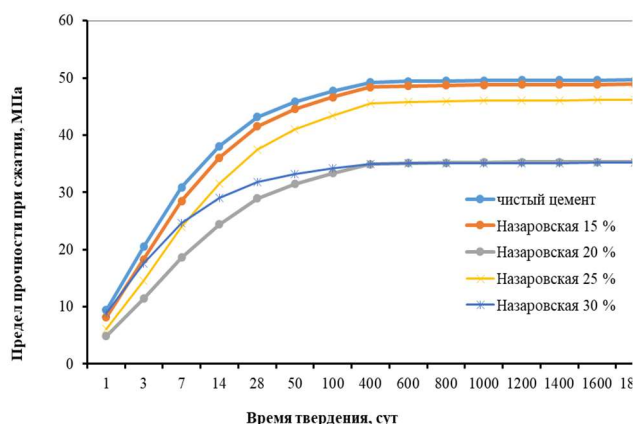


Рис. 1. Расчетная кинетика набора прочности вяжущих в зависимости от состава: а) с использованием кислой топливной золы; б) с использованием основной топливной золы

Анализ кинетики набора прочности образцов модифицированного цемента в течении первых 28 суток свидетельствует о схожести характера процессов твердения не зависимо от типа применяемой золы в качестве добавки и ее концентрации. Из графиков (рис. 1) видно, что наиболее интенсивный рост прочности приходится на первые 7 суток, а выполаживание кривых после отметки 400 суток свидетельствует о завершении процессов гидратации как модифицированного, так и портландцемента без добавки. При этом расчетная прогнозируемая прочность при использовании добавок как низко-, так и высококальциевой золы в большинстве случаев ниже чем у образцов цемента без добавки. Однако, прогнозируемая прочность цемента с использованием 25 % кислой топливной золы Троицкой ГРЭС характеризуется приростом прочности после 28 суток на 10 % по сравнению с прочностью образцов контрольного состава (рис. 1, а). Практически совпадают по значениям с контрольным составом расчетные данные по определению прогнозируемой прочности вяжущего с использованием 15 % высококальциевой топливной золы (рис. 1, б).

**Выводы.** Таким образом, в результате анализа расчетных данных по кинетике набора прочности на длительный срок установлено, что наиболее эффективной с точки зрения модифицирования цемента, подразумевающего замену его части, является кислая (или низкокальциевая) топливная зола Троицкой ГРЭС в силу своей пуццолановой активности. А оптимальная ее концентрация в составе вяжущего гидратационного типа твердения составляет 25 % от массы цемента. При этом, оптимальной концентрацией основной (или высококальциевой) топливной золы Назаровской ТЭС является 15 %, а увеличение количества, несмотря на содержание клинкерных минералов в составе, приводит к значительному снижению набора прочности как на начальных, так и поздних сроках твердения в среднем на 10–30 %.

*Источник финансирования. Грант Президента Российской Федерации НШ–2584.2020.8.*

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Баженов Ю.М., Воронин В.В., Алимов Л.А., Бахрах А.М., Ларсен О.А., Соловьев В.Н.,

- Нгуен Д.В.К. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1385–1391. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391.
2. Калашников В.И., Тараканов О.В., Белякова Е.А., Мороз М.Н. Новые направления использования зол ТЭЦ в порошково-активированных бетонах нового поколения // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 22–27.
3. Hanif A., Lu Z., Li Z. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review // Construction and Building Materials. 2017. No. 144. Pp. 373–384. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188.
4. Zhang, T., Du, Y., Sun, Y., He, Z., Wu, Z. Development of magnesium-silicate-hydrate cement by pulverized fuel ash // Key Engineering Materials. 2016. No. 709. P. 61–65. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.709.61.
5. Ерофеев В.Т., Калашников В.И., Смирнов В.Ф., Карпушин С.Н., Родин А.И., Красноглазов А.М., Челмакин А.Ю. Стойкость цементных композитов на биоцидном портландцементе с активной минеральной добавкой в условиях воздействия модельной среды бактерий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 11–17.
6. McCarthy M.J., Tittle P.A.J., Dhir R.K. Corrosion of reinforcement in concrete containing wet-stored fly ash // Cement & concrete composites. 2019. No. 102. P. 71–83. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.003.
7. Oproiu C., Voicu G., Nicoara A.I., Badanoiu A.I. The Influence of Partial Substitution of Raw Materials with Heavy Ash on the Main Properties of Portland Cements // Revista de chimie. No. 69. R. 4. P. 860–863.
8. Kipkemboi B., Zhao T., Miyazawa S., (...), Nito N., Hirao H. Effect of  $C_3S$  content of clinker on properties of fly ash cement concrete // Journal of Building Engineering. 2020. 29,101107. DOI: 10.1016/j.job.2019.101107.
9. Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume // Construction and Building Materials. 2020. 239,117888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117888.
10. Hamzaoui R., Guessasma S., Abahri K., Bouchenafa O. Formulation of Modified Cement Mortars Using Optimal Combination of Fly Ashes, Shiv, and Hemp Fibers // Journal of materials in civil engineering. 2020. 04019354. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002918.
11. Лам Т.В., Хунг Н.С., Зиен В.К., Чык Н.Ч., Булгаков Б.И., Баженова О.Ю., Гальцева Н.А. Влияние водовяжущего отношения и комплексной органоминеральной добавки на свойства бетона для морских гидротехнических сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 11–21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21.
12. Бондаренко Д.О., Строкова В.В., Тимошенко Т.И., Роздольская И.В. Плазмохимическое модифицирование облицовочного композиционного материала на основе полых стеклянных микросфер с защитно-декоративным покрытием // Перспективные материалы. 2018. № 8. С. 72–80. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-8-72-80.
13. Oliva M., Vargas F., Lopez M. Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems // Journal of cleaner production. 2019. No. 223. P. 1029–1041. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.147.
14. Нетеса Н.И., Паланчук Д.В., Нетеса А.Н. Легкие бетоны с золой-уноса приднепровской ТЭС // Наука та прогрес транспорту. 2013. № 5 (47). С. 137–145.
15. Gołaszewski J., Ponikiewski T., Kostrzanowska-Siedlarz A. Influence of Cements Containing Calcareous Fly Ash on Rheological Properties of Fresh Mortars and Its Variability // RILEM Bookseries. 2020. No. 23. P. 87–96. DOI: 10.1007/978-3-030-22566-7\_11.
16. Mukilan K., Chithambar Ganesh A., Azik A. Investigation of utilization of Flyash in Self Compacting Concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 154495. DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012056.
17. Харченко А.И., Алексеев В.А., Харченко И.Я., Баженов Д.А. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 3 (126). С. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.
18. Quan H., Kasami H. Experimental study on effects of type and replacement ratio of fly ash on strength and durability of concrete // Open Civil Engineering Journal. 2013. No. 7(1). P. 93–100. DOI: 10.2174/1874149520130708004.
19. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов // Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций. Белгород: Везелица, 1993. С. 8.
20. Кафтаева М.В. Регулирование свойств мелкозернистых бетонов с пониженным содержанием золы: дис. ... канд. техн. наук. Кафтаева М.В.; БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2000. 184 с.

21. Поспелова М.А. Регулирование кинетики твердения цементных систем химическими добавками: дис. ... канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г.Шухова. Белгород, 2003. 130 с.

22. Фоменко Ю.В. Мелкозернистый бетон для тротуарной плитки с пониженным высолообразованием: авторефер. дис. ... канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г.Шухова. Белгород, 2007. 22 с.

*Информация об авторах*

**Макров Андрей Юрьевич**, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: markovandrey11@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Безродных Андрей Александрович**, аспирант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: andron93@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Маркова Ирина Юрьевна**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: irishka-31.90@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Строкова Валерия Валерьевна**, доктор технических наук, профессор. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Дмитриева Татьяна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: tdmtrieva-bel@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Степаненко Маргарита Андреевна**, магистрант кафедры материаловедения и технологий материалов. E-mail: stepanenko.rita2017@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

*Поступила в декабре 2019 г.*

© Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А., 2020

**\*Markov A.Y., Bezrodnykh A.A., Markova I.Y., Strokov V.V., Dmitrieva T.V., Stepanenko M.A.**  
*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova*  
*\*E-mail: markovandrey11@gmail.com*

## FORECASTING STRENGTH OF PORTLAND CEMENT IN THE PRESENCE OF FUEL ASHES

---

**Abstract.** Reducing the consumption of the most widespread and expensive in construction inorganic binder of hydration hardening type – Portland cement – is one of the most important tasks for the construction industry. With the current trend of resource- and energy-saving, as well as a decrease in environmental pressure, it is of great interest to use wastes from fuel and energy enterprises in the form of various types of ash (acidic, basic), which are finely dispersed raw materials of mainly aluminosilicate composition that have accumulated in large quantities on our country territories. The paper analyzes the effect of mineral additives in the form of fuel ashes, the use of which provides replacement of part of Portland cement (15–30 % of the total mass of Portland cement, in increments of 5 %), on the kinetics of hardening of the binder. Based on the results of the strength tests of binder samples with additives, calculation of predicted strength was carried out according to the methodology by Sh.M. Rakhimbayev based on transfer theory. As a result, the analysis of the kinetics of the Portland cement hardening was carried out both at early and late hardening periods; efficiency and optimal concentration of fuel ashes depending on type have been established.

**Keywords:** fuel ash, mineral additive, inorganic binder, Portland cement.

---

### REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Voronin V.V., Alimov L.A., Bahrah A.M., Larsen O.A., Solov'ev V.N., Nguen D.V.K. High-quality self-compacting concrete using coal combustion wastes [Vysokokachestvennyye samouplotnyayushchiesya betony c

ispol'zovaniem othodov szhiganiya uglya]. Vestnik of MGSU. 2017. Vol. 12. Vol. 12 (111). Pp. 1385–1391. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391. (rus)

2. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Moroz M.N. New directions in the use of ashes of thermal power plants in powder-activated

concrete of a new generation [Novye napravleniya ispol'zovaniya zol TEC v poroshkovo-aktivirovannyh betonah novogo pokoleniya]. Regional Architecture and Engineering. 2013. Vol. 3. Pp. 22–27. (rus)

3. Hanif A., Lu Z., Li Z. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 144. Pp. 373–384. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.188.

4. Zhang T., Du Y., Sun Y., He Z., Wu Z. Development of magnesium-silicate-hydrate cement by pulverized fuel ash. Key Engineering Materials. 2016. Vol. 709. Pp. 61–65. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.709.61.

5. Erofeev V.T., Kalashnikov V.I., Smirnov V.F., Karpushin S.N., Rodin A.I., Krasnoglazov A.M., Chelmakin A.Yu. Resistance of cement composites on biocidal Portland cement with an active mineral additive under the influence of a model environment of bacteria [Stojkost' cementnyh kompozitov na biocidnom portlandcemente s aktivnoj mineral'noj dobavkoj v usloviyah vozdejstviya model'noj sredy bakterij]. Industrial and civil engineering. 2016. Vol. 1. Pp. 11–17. (rus)

6. McCarthy M.J., Tittle P.A.J., Dhir R.K. Corrosion of reinforcement in concrete containing wet-stored fly ash. Sement & concrete composites. 2019. Vol. 102. Pp. 71–83. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.003.

7. Oproiu C., Voicu G., Nicoara A.I., Badanoiu A.I. The Influence of Partial Substitution of Raw Materials with Heavy Ash on the Main Properties of Portland Cements. Revista de chimie. Vol. 69. R. 4. Pp. 860–863.

8. Kipkemboi B., Zhao T., Miyazawa S., (...), Nito N., Hirao H. Effect of C3S content of clinker on properties of fly ash cement concrete. Journal of Building Engineering. 2020. 29,101107. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101107.

9. Choudhary R., Gupta R., Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. Construction and Building Materials. 2020. 239,117888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117888.

10. Hamzaoui R., Guessasma S., Abahri K., Bouchenafa O. Formulation of Modified Cement Mortars Using Optimal Combination of Fly Ashes, Shiv, and Hemp Fibers. Journal of materials in civil engineering. 2020. 04019354. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002918.

11. Lam T.V., Hung N.S., Zien V.K., CHyk N.CH., Bulgakov B.I., Bazhenova O.Yu., Gal'ceva N.A. Vliyanie vodovyazhushchego otnosheniya i kompleksnoj organomineral'noj dobavki na svojstva

betona dlya morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2019. Vol. 3. Pp. 11–21. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.11-21.

12. Bondarenko D.O., Strokova V.V., Timoshenko T.I., Rozdol'skaya I.V. [Plazmohimicheskoe modifizirovanie oblicovochnogo kompozicionnogo materiala na osnove polyh steklyannyh mikrosfer s zashchitno-dekorativnym pokrytiem]. Promising materials. 2018. Vol. 8. Pp. 72–80. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-8-72-80. (rus)

13. Oliva M., Vargas F., Lopez M. Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems. Journal of cleaner production. 2019. Vol. 223. Pp. 1029–1041. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.147.

14. Netesa N.I., Palanchuk D.V., Netesa A.N. Legkie betony s zoloy-unosa pridneprovskoj TES. Nauka ta progres transportu. 2013. Vol. 5 (47). Pp. 137–145. (rus)

15. Gołaszewski J., Ponikiewski T., Kostrzanowska-Siedlarz A. Influence of Cements Containing Calcareous Fly Ash on Rheological Properties of Fresh Mortars and Its Variability. RILEM Bookseries. 2020. Vol. 23. Pp. 87–96. DOI: 10.1007/978-3-030-22566-7\_11.

16. Mukilan K., Chithambar Ganesh A., Azik A. Investigation of utilization of Flyash in Self Compacting Concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 154495. DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012056.

17. Harchenko A.I., Alekseev V.A., Harchenko I.Ya., Bazhenov D.A. The structure and properties of fine-grained concrete based on composite binders [Struktura i svojstva melkozernistykh betonov na osnove kompozicionnykh vyazhushchih]. Vestnik MGSU. 2019. Vol. 14. No. 3 (126). Pp. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331. (rus)

18. Quan H., Kasami H. Experimental study on effects of type and replacement ratio of fly ash on strength and durability of concrete. Open Civil Engineering Journal. 2013. Vol. 7(1). Pp. 93–100. DOI: 10.2174/1874149520130708004.

19. Rahimbaev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building materials. Resource-saving technologies of building materials, products and structures [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov]. Resource-saving technologies of building materials, products and structures. Belgorod: Weselitz, 1993. Pp. 8. (rus)

20. Kaftaeva M.V. Regulation of the properties of fine-grained concrete with a decreased content of ash [Regulirovanie svojstv melkozernistykh betonov s ponizhennym soderzhaniem zoly]: thesis for the degree of candidate of sciences. Kaftaeva M.V.;



BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod, 2000. 184 p. (rus)

21. Pospelova M.A. Regulation of the kinetics of cement systems hardening with chemical additives [Regulirovanie kinetiki tverdeniya cementnyh sistem himicheskimi dobavkami]: thesis for the degree of candidate of sciences. Pospelova M.A.: BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod, 2003. (rus)

22. Fomenko Yu.V. Fine-grained concrete for paving slabs with low efflorescence [Melkozernistyj beton dlya trotuarnoj plitki s ponizhennym vysolobrazovaniem]: abstract of a thesis for the degree of candidate of sciences. Fomenko Yu.V.: BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod, 2007. 22 p. (rus)

*Information about the authors*

**Markov, Andrew Y.** Postgraduate student. E-mail: markovandrey11@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Bezrodnykh, Andrew A.** Postgraduate student. E-mail: andron93@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Markova, Irina Y.** PhD, Senior lecturer. E-mail: irishka-31.90@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Strokova, Valeria V.** DSc, Professor. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Dmitrieva, Tatyana V.** PhD, Assistant professor. E-mail: tdmtrieva-bel@yandex.ru. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Stepanenko, Margarita A.** Bachelor student. E-mail: stepanencko.rita2017@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in Desember 2019*

**Для цитирования:**

Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А. Прогнозирование прочности портландцемента в присутствии топливных зол // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33

**For citation:**

Markov A.Y., Bezrodnykh A.A., Markova I.Y., Strokova V.V., Dmitrieva T.V., Stepanenko M.A. Forecasting strength of portland cement in the presence of fuel ashes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 25–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-26-33