



ISSN 1993-3495 online

СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО  
СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО  
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

2022, ТОМ 18, НОМЕР 4, 157–165

EDN: XIUYON

УДК 666.972.5

## СВОЙСТВА ОБОГАЩЕННОЙ ЗОЛЫ ТЭС ДЛЯ ВИСОКОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЕТОНОВ

Н. М. Зайченко<sup>1</sup>, И. Ю. Петрик<sup>2</sup>, В. Н. Губарь<sup>3</sup>

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.

E-mail: <sup>1</sup>n.m.zaichenko@donnasa.ru, <sup>2</sup>i.y.petrik@donnasa.ru, <sup>3</sup>v.n.gubar@donnasa.ru

Получена 08 ноября 2022; принята 25 ноября 2022.

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования свойств обогащенной золы ТЭС для высокофункциональных бетонов. Для улучшения характеристик золы ТЭС, соответствующих техническим требованиям для замены части цемента в бетоне, разработана технология электростатического обогащения. Данная технология позволяет получить материал с низким содержанием несгоревшего углерода (потери при прокаливании 2,52 % в этом исследовании) для высокого уровня замены цемента (45 % в составе вяжущего) в бетонах. Обогащённая зола имеет улучшенный гранулометрический и фазовый состав и пониженное содержание несгоревшего углерода. Применение обогащенной золы ТЭС в составе вяжущего взамен части цемента может обеспечивать ускорение процесса гидратации цемента, повышение реологических свойств цементного теста, а также способность воздухововлекающей добавки удерживать необходимый объем вовлечённого воздуха.

**Ключевые слова:** зола ТЭС, электростатическая сепарация, потери при прокаливании, фазовый анализ, индекс пены.

## ВЛАСТИВОСТІ ЗБАГАЧЕНОЇ ЗОЛИ ТЕС ДЛЯ ВИСОКОФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЕТОНІВ

М. М. Зайченко<sup>1</sup>, І. Ю. Петрик<sup>2</sup>, В. М. Губарь<sup>3</sup>

ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,  
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.

E-mail: <sup>1</sup>n.m.zaichenko@donnasa.ru, <sup>2</sup>i.y.petrik@donnasa.ru, <sup>3</sup>v.n.gubar@donnasa.ru

Отримана 08 листопада 2022; прийнята 25 листопада 2022.

**Анотація.** У статті наведено результати дослідження властивостей збагаченої золи ТЕС для високофункціональних бетонів. Для покращення характеристик золи ТЕС, які відповідають технічним вимогам для заміни частини цементу в бетоні, розроблено технологію електростатичного збагачення. Дана технологія дозволяє отримати матеріал з низьким вмістом вуглецю, що не згорів (втрати при прожарюванні 2,52 % у цьому дослідженні) для високого рівня заміни цементу (45 % у складі в'язучого) в бетонах. Збагачена зола має покращений гранулометричний і фазовий склад і знижений вміст вуглецю, який не згорів. Застосування збагаченої золи ТЕС у складі в'язучого замість частини цементу може забезпечувати прискорення процесу гідратації цементу, підвищення реологічних властивостей цементного тіста, а також здатність добавки, що залучає повітря, утримувати необхідний об'єм залученого повітря.

**Ключові слова:** зола ТЕС, електростатична сепарація, втрати при прожарюванні, фазовий аналіз, індекс піни.



## PROPERTIES OF ENRICHED THERMAL POWER PLANT ASH FROM FOR HIGH-PERFORMANCE CONCRETES

Nikolai Zaichenko<sup>1</sup>, Irina Petrik<sup>2</sup>, Victor Gubar<sup>3</sup>

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.*

*E-mail: <sup>1</sup>n.m.zaichenko@donnasa.ru, <sup>2</sup>i.y.petrik@donnasa.ru, <sup>3</sup>v.n.gubar@donnasa.ru*

*Received 08 November 2022; accepted 25 November 2022.*

**Abstract.** The article presents the results of a study of the properties of enriched thermal power plant ash for high-performance concretes. In order to improve the characteristics of the thermal power plant ash that meet the technical requirements for replacing part of the cement in concrete, an electrostatic separation technology has been developed. This technology produces a material with a low unburned carbon content (loss on ignition 2,52 % in this study) for a high level of replacement of cement (45 % in the binder composition) in concretes. Enriched ash has an improved granulometric and phase composition and a reduced content of unburned carbon. The use of enriched thermal power plant ash in the composition of the binder instead of a part of the cement can provide an acceleration of the cement hydration process, an increase in the rheological properties of the cement paste, as well as the ability of the air-entraining admixture to retain the required volume of entrained air.

**Key words:** thermal power plant ash, electrostatic separation, loss on ignition, phase analysis, foam index.

### Актуальность

Зола составляет значительную часть отходов тепловых электрокомплексов, работающих на твердом энергетическом топливе. В большинстве своем данный побочный продукт не находит дальнейшего применения, накапливаясь в золоотвалах [1].

Наиболее перспективным направлением утилизации с учетом экономической выгоды является применение золы в качестве пуццоланы при частичной замене цемента [2]. В составе вяжущего зола оказывает положительное влияние на свойства высокофункциональных бетонных смесей и бетонов [3–5]: снижение усадки в результате водоредуцирующего эффекта, что обеспечивает снижение водоцементного отношения бетона; снижение риска термического трещинообразования в результате уменьшения тепловыделения (при замене части цемента золой температурный градиент между центром и поверхностью массивных бетонных конструкций не превышает 25 °С); повышение водонепроницаемости и долговечности бетона (повышение степени упаковки частиц, сниже-

ние расхода воды, модифицирование состава продуктов гидратации); повышение когезии бетонной смеси и её удобоукладываемости, снижение расслаиваемости, улучшение прокачиваемости.

Основными свойствами, характеризующими качество золы, являются её дисперсность и granulometricкий состав. Фракции золы имеют различную истинную и среднюю плотности. Это можно объяснить химико-минералогическим составом и формой частиц. Также уменьшением дисперсности золы содержание несгоревших угольных частиц возрастает.

Для повышения качества золы исследованы различные способы обогащения. Наибольшее практическое значение имеет способ электростатической сепарации несгоревшего углерода из предварительно подготовленной золы [6].

### Цель работы

Изучить свойства обогащенной электростатической сепарацией золы ТЭС, применяемой для высокого уровня замены цемента (45 %) в бетонах.

### Основной материал

**Материалы.** Для выполнения программы экспериментальных исследований в качестве исходных материалов приняты:

- зола Зуевской ТЭС (удельная поверхность по Блэйну 290 м<sup>2</sup>/кг; потери при прокаливании 6,92 %);
- портландцемент первого типа (ПЦ) ЦЕМ I 42,5 Н (удельная поверхность по Блэйну 365 м<sup>2</sup>/кг);
- воздухововлекающая добавка на основе композиции синтетических поверхностно-активных веществ Sika® Aer Pro-100 (плотность 0,995–1,005 г/см<sup>3</sup>; рН 10,0–11,0).

**Методики эксперимента.** Обогащению золы предшествовали предварительное просушивание при 105±5 °С, а затем просеивание через сито 315 мкм. Частицы золы в основном состоят из кремнезёма и глинозёма, которые имеют более высокую работу выхода (SiO<sub>2</sub> = 5,0 эВ, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 4,7 эВ), чем углерод (С = 4,0 эВ). Поэтому, когда они контактируют друг с другом или с поверхностью медного питателя (Cu = 4,38 эВ), частицы углерода будут заряжаться положительно, а частицы золы – отрицательно, вследствие различий в значениях работы выхода [7, 8].

Заряженные частицы попадают в камеру сепаратора (рис. 1), оборудованную электродами из двух медных пластин, прикреплённых к её противоположным боковым стенкам. Под действием постоянного электрического поля, создаваемого источником высокого напряжения, за-

ряженные частицы отклоняются к электродам в соответствии с их полярностью. Напряжённость электрического поля варьировалась в пределах от –2 до +2 кВ/см.

Распределение частиц золы по размерам выполнено с помощью лазерного анализатора размера частиц ANALYSETTE 22.

Определение величины потерь при прокаливании золы проводили на образцах массой 1 г, предварительно высушенных в лабораторной печи при 130 °С в течение 2 часов в соответствии с ГОСТ 11022-95 (ISO 1171-97). После сушки, охлаждения и повторного взвешивания образцы помещали в вентилируемую воздухом лабораторную печь при 815±10 °С на 2 часа, чтобы выжечь остаточный углерод. Потеря массы при 815 °С была зафиксирована как потери при прокаливании (ППП) и принята как масса несгоревшего углерода в исходном образце.

Индекс пенообразования (ИП) первоначально был разработан для оценки влияния вяжущих материалов на воздухововлекающую способность в бетоне [10]. Вначале 20 г портландцемента помещали в стеклянную ёмкость объёмом 125 мл. Затем в ёмкость добавляли 50 мл воды, накрывали крышкой и встряхивали в течение минуты. Разбавленный раствор ВВД (50 мл ВВД : 50 мл воды) добавляли небольшими порциями по 2–5 капель за раз. После каждого добавления ёмкость энергично встряхивали в течение 15 секунд. Наблюдали за стабильностью пены. Минимальное количество разбавленной воздухововлекающей

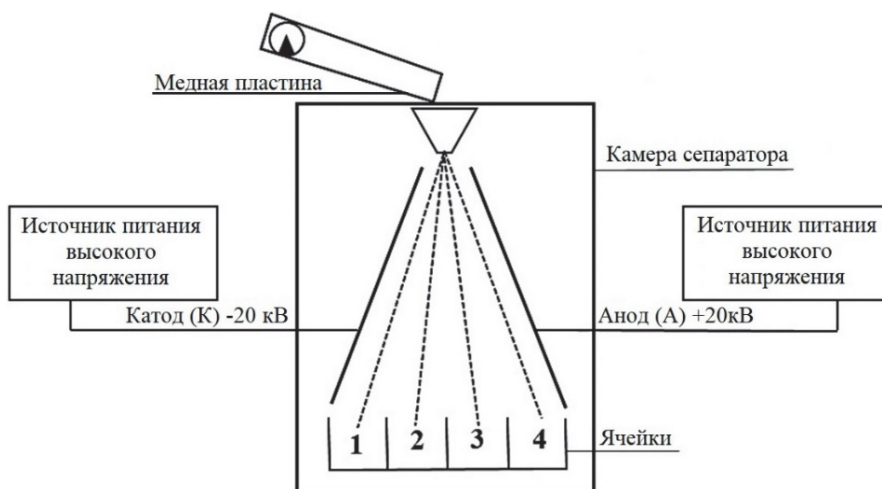


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

добавки, необходимое для получения устойчивой пены (пузырьки присутствуют по всей поверхности) в течение 45 секунд, является индексом пены цементной смеси. После этого указанный алгоритм повторяли с использованием различных соотношений цемента и золы для получения индекса пены смеси цемента и золы [11].

Дифракционные исследования образцов золы выполнены с помощью РФА-дифрактометра 26 ARL X'TRA (ARL, Switzerland), используя  $\text{CuK}\alpha$  излучение ( $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ ) при напряжении 40 кВ и токе 20 мА. Сканирование проводилось в диапазоне 4–70 градусов (2-theta) с шагом 0,02 градуса.

#### Результаты экспериментов и обсуждение

**Распределение частиц по размерам и потери при прокаливании.** Кривые распределения частиц по размерам для шести образцов золы, отобранных после электростатической сепарации из каждой ячейки бункера (1–4) и пластинчатых электродов (А, К) экспериментальной установки (рис. 1), приведены на рис. 2.

Кривые образцов из ячеек бункера показывают примерно одинаковое распределение частиц по размерам в диапазоне от 0,3 до 300 мкм, в то время как кривые образцов из электродов находятся в более узком диапазоне: 0,3–100 мкм (анод) и 0,3–200 мкм (катод). Кроме того, гранулометрический анализ показывает, что массовый медианный диаметр является наименьшим для образцов, собранных с пластинчатых электродов: 19,89 мкм (катод), 17,93 мкм (анод) и снижается при переходе от ячеек катодной зоны к анодной (табл. 1).

Наибольшее содержание частиц размером менее 2 мкм наблюдается вблизи анодной зоны, соответственно. С другой стороны, ячейки 3 и 4, которые находятся вблизи зоны анода, содержат частицы с максимальным размером  $d_{98} = 151,1$  и 142,3 мкм, соответственно. Очевидно, как указывалось ранее, крупные частицы золы в основном содержат несгоревший материал. Теоретически, принимая во внимание положительный электрический заряд углерода, его частицы должны отклоняться к электроду в соответствии с их полярностью, то есть к катоду. Однако данные, представленные в табл. 1, свидетельствуют о существовании довольно высокого содержания ППП (17,8 % от общего выхода золы после сепарации) в зоне действия положительного электрического поля (анод, ячейки 4–3). Это можно объяснить из следующих соображений. Электростатическая сепарация должна проводиться на сухом материале, поскольку зола и несгоревший углерод не могут быть заряжены и разделены во влажном состоянии вследствие наличия капиллярных сил. Исследованиями, выполненными по сепарированию углерода из золы, хранящейся во влажном состоянии с последующей сушкой, установлено изменение заряда углерода [12–14]. При этом механизм изменения относительной работы выхода электрона, и, следовательно, поведение материала при контактной зарядке, тем не менее, ещё не установлен. Одним из предложенных механизмов является перераспределение растворимых ионов на поверхности углеродных частиц, что, возможно, дополнительно зависит от рН водного раствора золы.

**Таблица 1.** Размер частиц и потери при прокаливании для навесок, полученных после электростатической сепарации золы

| Образец – зона сепаратора | Навеска |      | Размер частиц, мкм    |                  | Частицы менее 2 мкм, % | ППП  |              |               |
|---------------------------|---------|------|-----------------------|------------------|------------------------|------|--------------|---------------|
|                           | г       | %    | максимальный $d_{98}$ | средний $d_{50}$ |                        | г    | % от навески | % общей массы |
| Катод (К)                 | 15      | 1,5  | 76,461                | 19,891           | 7,64                   | 3,3  | 22,0         | 4,8           |
| 1                         | 45      | 4,5  | 123,972               | 27,302           | 6,17                   | 21,5 | 47,8         | 31,1          |
| 2                         | 113     | 11,3 | 134,805               | 28,592           | 5,89                   | 19,2 | 17,0         | 27,7          |
| 3                         | 276     | 27,6 | 151,125               | 26,546           | 5,75                   | 11,4 | 4,1          | 16,5          |
| 4                         | 482     | 48,2 | 142,337               | 25,859           | 6,96                   | 12,3 | 2,6          | 17,8          |
| Анод (А)                  | 69      | 6,9  | 66,576                | 17,930           | 8,01                   | 1,5  | 2,2          | 2,1           |
| Всего                     | 1000    | 100  |                       |                  |                        | 69,2 |              | 100           |

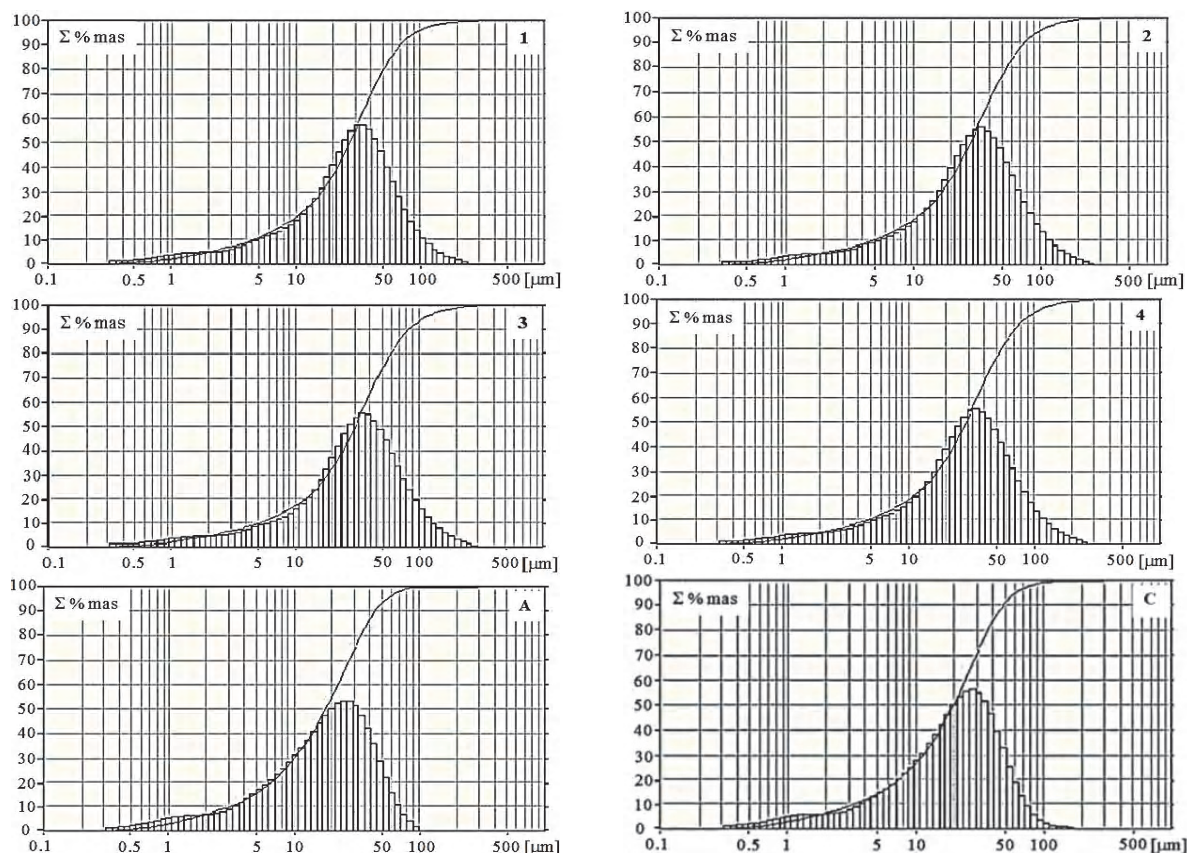


Рисунок 2. Дифференциальные и интегральные кривые распределения частиц по размерам.

**Фазовый анализ.** Состав кристаллических фаз золы установлен по данным рентгенофазового анализа (рис. 3).

Основными кристаллическими компонентами являются кварц ( $\text{SiO}_2$ ) ( $d = 0,334 \text{ нм}$ ,  $2\theta = 26,64^\circ$ ;  $d = 0,228 \text{ нм}$ ,  $2\theta = 39,49^\circ$ ;  $d = 0,165 \text{ нм}$ ,  $2\theta = 55,65^\circ$ ) и гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ( $d = 0,240 \text{ нм}$ ,  $2\theta = 37,44^\circ$ ;  $d = 0,184 \text{ нм}$ ,  $2\theta = 49,49^\circ$ ). Широкое «галло» на рентгенограммах, центрированное примерно в области  $2\theta = 26,5^\circ$ , свидетельствует о присутствии большого количества аморфного материала.

Соотношения каждой кристаллической фазы и объёмного аморфного материала, определённые для шести образцов золы, отобранных из разных зон электростатического сепаратора, приведены в табл. 2.

Данные рентгеноструктурного анализа показывают, что все образцы золы идентичны в объёмном аморфном материале. Различия в содержании кристаллических фаз незначительны. В частности наибольшее количество кварца на-

ряду с наименьшим количеством гематита приходится на материал в ячейках, расположенных в рабочей зоне анодного электрода. Это обеспечивает улучшение качества золы, как пуццолановой добавки, поскольку ультрадисперсные частицы кварца могут проявлять пуццоланические свойства, а также служить центрами зародышеобразования.

**Индекс пены.** Когда добавка золы содержит большое количество углерода, адсорбция поверхностно-активного вещества воздухововлекающей добавки углеродом разрушает способность бетона удерживать необходимый объём вовлечённого воздуха. Эта проблема адсорбции ограничивает высокий расход золы в бетоне [15]. Таким образом, снижение содержания ППП является одним из ключевых факторов обогащения низкокачественной золы.

В табл. 3 представлены данные по изменению содержания воздухововлекающей добавки при исследовании индекса пены. Соотношения между цементом и золой были подобраны таким

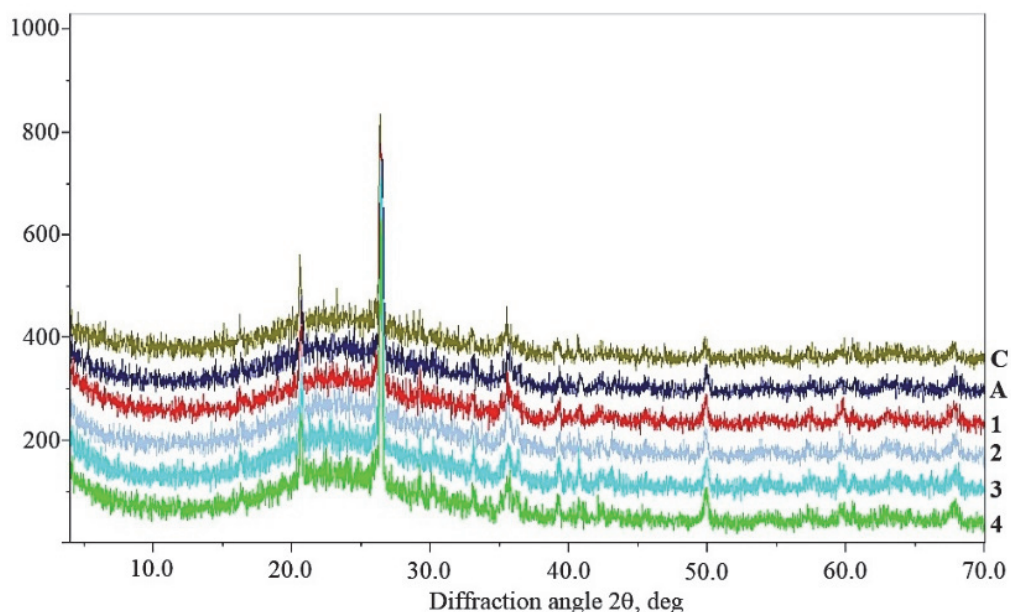


Рисунок 3. Рентгенограммы золы после электростатической сепарации.

Таблица 2. Соотношения кристаллических фаз и объёмного аморфного материала в составе золы

| Образец – зона сепаратора | Содержание, % |         |               |
|---------------------------|---------------|---------|---------------|
|                           | кварц         | гематит | аморфная фаза |
| Катод (К)                 | 19,7          | 5,3     | 75,0          |
| 1                         | 20,9          | 4,1     | 75,0          |
| 2                         | 19,0          | 6,0     | 75,0          |
| 3                         | 20,0          | 5,0     | 75,0          |
| 4                         | 21,2          | 3,8     | 75,0          |
| Анод (А)                  | 21,9          | 3,1     | 75,0          |

Таблица 3. Соотношения цементно-зольных смесей и индекс пены

| Образец      | ПЦ |    | З  |    |        | Вода, мл | Раствор ВВД, мл |
|--------------|----|----|----|----|--------|----------|-----------------|
|              | %  | г  | %  | г  | ППП, г |          |                 |
| Анод (А)     | 40 | 8  | 60 | 12 | 0,264  | 50       | 0,20            |
| 4            | 45 | 9  | 55 | 11 | 0,286  | 50       | 0,25            |
| 3            | 50 | 10 | 50 | 10 | 0,410  | 50       | 0,33            |
| Исходная (И) | 55 | 11 | 45 | 9  | 0,621  | 50       | 0,55            |
| 2            | 65 | 13 | 35 | 7  | 1,190  | 50       | 0,96            |
| Катод (К)    | 70 | 14 | 30 | 6  | 1,320  | 50       | 1,62            |
| 1            | 85 | 17 | 15 | 3  | 1,434  | 50       | 1,82            |

образом, что при содержании золы в диапазоне от 15 до 60 % количество несгоревшего углерода в образцах золы, отобранных из разных зон электрического сепаратора, составляло от 1,32 до 7,17 %.

Из данных табл. 3 следует, что не высокое содержание золы, а большое количество несгоревшего углерода (ППП) значительно влияет на требуемую дозу воздухововлекающей добавки. Чем выше содержание ППП в образце золы, тем

большее количество разбавленной воздуховлекающей добавки необходимо для получения стабильной пены.

### Выводы

По результатам исследования можно сделать вывод, что электростатическое обогащение золы с повышенным содержанием несгоревшего углерода (ППП = 6,92 %) может обеспечить получение низкоуглеродистой золы (ППП = 2,52 %),

отвечающей техническим требованиям для высокого уровня замены цемента (45 %) в бетонах. Обогащённая зола характеризуется улучшенным гранулометрическим и фазовым составом, пониженным содержанием несгоревшего углерода, что может обеспечивать ускорение процесса гидратации цемента, повышение реологических свойств цементного теста и способность воздуховлекающей добавки удерживать необходимый объем вовлечённого воздуха.

### Литература

1. Бариева, Э. Р. Состав и строение золы-уноса ТЭЦ / Э. Р. Бариева, Э. А. Королев, Е. В. Серазеева. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2012. – № 5-6. – С. 109–113.
2. High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste / S. Donatello, C. Kuenzel, A. Palomo [et. al.]. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Composites. – 2014. – Volume 45. – P. 234–242.
3. Li, G. Properties of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-SiO<sub>2</sub> / G. Li. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Research. – 2004. – Volume 34, Issue 6. – P. 1043–1049.
4. Siddique, R. Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete / R. Siddique. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Research. – 2004. – Volume 34, Issue 3. – P. 487–493.
5. Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash / Q. Zeng, K. Li, T. Fen-Chong [et. al.]. – Текст : непосредственный // Cement and Concrete Research. – 2012. – Volume 42, Issue 1. – P. 194–204.
6. Петрик, И. Ю. Морозостойкость и коррозионная стойкость тяжелого бетона с повышенным содержанием обогащенной золы ТЭС / И. Ю. Петрик, Н. М. Зайченко, В. Н. Губарь. – Текст : электронный // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2021. – Том 17, № 4. – С. 225–234. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/spgs/2021-4/03\\_petrik\\_zaichenko\\_gubar.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2021-4/03_petrik_zaichenko_gubar.pdf) (дата обращения 25.10.2022).
7. Significance of surface moisture removal on triboelectrostatic beneficiation of fly ash / F. Cangialosi, M. Notarnicola, L. Liberti [et. al.]. – Текст : непосредственный // Fuel. – 2006. – Volume 85, Issue 16. – P. 2286–2293.
8. Modelling Of Tribo-electrostatic Separation For Industrial By-products Recycling / F. Cangialosi, F. Crapulli, G. Intini [et. al.]. – Текст : непосредственный // WIT Transactions on Ecology and

### Reference

1. Barieva, E. R.; Korolev, E. A.; Serazeeva, E. V. Composition and structure of fly ash from thermal power station. – Text : direct. – In: *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. – 2012. – № 5-6. – P. 109–113. (in Russian)
2. Donatello, S.; Kuenzel, C.; Palomo, A. [et. al.]. High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Composites*. – 2014. – Volume 45. – P. 234–242. (in English)
3. Li, G. Properties of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-SiO<sub>2</sub>. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Volume 34, Issue 6. – P. 1043–1049. (in English)
4. Siddique, R. Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Volume 34, Issue 3. – P. 487–493. (in English)
5. Zeng, Q.; Li, K.; Fen-Chong, T. [et. al.]. Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2012. – Volume 42, Issue 1. – P. 194–204. (in English)
6. Petrik, I. Yu.; Zaichenko, N. M.; Gubar, V. N. Frost resistance and corrosion resistance of heavy concrete with a high content of enriched TPP ash. – Text : electronic. – In: *Modern industrial and civil construction*. – 2021. – Volume 17, № 4. – С. 225–234. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/spgs/2021-4/03\\_petrik\\_zaichenko\\_gubar.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2021-4/03_petrik_zaichenko_gubar.pdf) (date of the application 25.10.2022) (in Russian)
7. Cangialosi, F.; Notarnicola, M.; Liberti, L. [et. al.]. Significance of surface moisture removal on triboelectrostatic beneficiation of fly ash. – Text : direct. – In: *Fuel*. – 2006. – Volume 85, Issue 16. – P. 2286–2293. (in English)
8. Cangialosi, F.; Crapulli, F.; Intini, G. [et. al.]. Modelling Of Tribo-electrostatic Separation For Industrial By-products Recycling. – Text : direct. – In: *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. – 2006. – Volume 92. – P. 101–110. (in English)

- the Environment. – 2006. – Volume 92. – P. 101–110.
9. ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97). Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности = Solidmineralfuels. Methods for determination of ash : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 12 марта 1996 г. № 160 : взамен ГОСТ 11022-90 : дата введения 1997-01-01 / разработан МТК 179 «Уголь и продукты его переработки», Комплексным научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом обогащения твердых горючих ископаемых Минтопэнерго Российской Федерации (ИОТТ). – Минск : Издательство стандартов, 1996. – 6 с. – Текст : непосредственный.
  10. Baltrus, J. P. Measurement of adsorption of air-entraining admixture on fly ash in concrete and cement / J. P. Baltrus, R. B. LaCount. – Текст : непосредственный // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Volume 31, Issue 5. – P. 819–824.
  11. The Foam Index Test: A Rapid Indicator of Relative AEA Demand / Tech Bulletin. – USA : GCP Applied Technologies Inc. – 2016. – 2 p. – Текст : непосредственный.
  12. Baker, L. Fly Ash Reclamation and Beneficiation Using a Triboelectric Belt Separator / L. Baker, A. Gupta, F. Hrach. – Текст : непосредственный // *EuroCoalAsh 2019 : Proceedings VI International conference in the series – EuroCoalAsh (Scotland, UK 10–12 June 2019)*. – Scotland : University of Dundee. – 2019. – P. 376–385.
  13. The role of weathering on fly ash charge distribution during triboelectrostatic beneficiation / F. Cangialosi, M. Notarnicola, L. Liberti [et. al.]. – Текст : непосредственный // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Volume 164 (2-3). – P. 683–688.
  14. Innovative processing of stockpile fly ash : Working Draft Report / M. J. McCarthy, M. R. Jones, T. A. Hope [et. al.]. – Scotland : University of Dundee, 2019. – 228 p. – Текст : непосредственный.
  15. Adsorption of surfactants on unburned carbon in fly ash and development of a standardized foam index test / I. Külaots, A. Hsu, R. H. Hurt, [et. al.]. – Текст : непосредственный // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Volume 33 (12). – P. 2091–2099.
  9. GOST 11022-95 (ISO 1171-97). Solidmineralfuels. Methods for determination of ash. – Minsk : Standards Publishing House, 1996. – 6 p. – Text : direct. (in Russian)
  10. Baltrus, J. P.; LaCount, R. B. Measurement of adsorption of air-entraining admixture on fly ash in concrete and cement. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2001. – Volume 31, Issue 5. – P. 819–824. (in English)
  11. The Foam Index Test: A Rapid Indicator of Relative AEA Demand / Tech Bulletin. – USA : GCP Applied Technologies Inc. – 2016. – 2 p. – Text : direct. (in English)
  12. Baker, L.; Gupta, A.; Hrach, F. Fly Ash Reclamation and Beneficiation Using a Triboelectric Belt Separator. – Text : direct. – In: *EuroCoalAsh 2019 : Proceedings VI International conference in the series – EuroCoalAsh*. – Scotland : University of Dundee. – 2019. – P. 376–385. (in English)
  13. Cangialosi, F.; Notarnicola, M.; Liberti, L. [et. al.]. The role of weathering on fly ash charge distribution during triboelectrostatic beneficiation. – Text : direct. – In: *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Volume 164 (2-3). – P. 683–688. (in English)
  14. McCarthy, M. J.; Jones, M. R.; Hope, T. A. [et. al.]. Innovative processing of stockpile fly ash : Working Draft Report. – Scotland : University of Dundee, 2019. – 228 p. – Text : direct. (in English)
  15. Külaots, I.; Hsu, A.; Hurt, R. H. [et. al.]. Adsorption of surfactants on unburned carbon in fly ash and development of a standardized foam index test. – Text : direct. – In: *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Volume 33 (12). – P. 2091–2099. (in English)

**Зайченко Николай Михайлович** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология и свойства модифицированных высокопрочных бетонов.

**Петрик Ирина Юрьевна** – ассистент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: бетоны с обогащенной золой-уноса ТЭС.



**Губарь Виктор Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: неразрушающий контроль бетона строительных конструкций.

**Зайченко Микола Михайлович** – доктор технических наук, профессор; завідувач кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: технологія та властивості модифікованих високоміцних бетонів.

**Петрик Ирина Юрьевна** – ассистент кафедры технологий будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетони із збагаченою золою-віднесення ТЕС.

**Губар Віктор Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: неруйнівний контроль бетону будівельних конструкцій.

**Zaichenko Nikolai** – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technology and properties of modified high-strength concrete.

**Petrik Irina** – Assistant, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: concrete with enriched fly ash from TPP.

**Gubar Victor** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: non-destructive testing of concrete of building structures.