

В.В. БЕДАРЕВ, канд. техн. наук (ooo-rigul@mail.ru),
Н.В. БЕДАРЕВ, инженер, А.В. БЕДАРЕВ, инженер
ООО «Ригул» (654080, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 99-318)

Применение золы ТЭС для получения высокопрочных бетонов и снижения расхода цемента

Представлены результаты экспериментальных исследований по применению золы-уноса ТЭС для получения высокопрочных бетонов или замещения части цемента в составе бетонной смеси золой ТЭС. Результаты экспериментальных исследований показывают высокую эффективность разработанного на основе золы-уноса ТЭС полифункционального комплекса АПБ (зола-уноса⁺) при получении бетонов высоких классов и возможности замещения значительной части цемента в составе бетонной смеси. Для получения бетонов повышенной прочности количество АПБ (зола-уноса⁺), дополнительно вводимой в состав бетонной смеси, составляет от 5 до 100% от массы цемента. При этом может быть достигнуто увеличение прочности бетона в 2–2,3 раза в сравнении с прочностью бетона базового состава. Замещение части цемента в составе бетонной смеси полифункциональным комплексом АПБ (зола-уноса⁺) в количестве от 5 до 80% позволяет сохранить прочность бетона на уровне прочности бетона базового состава. Показана возможность утилизации практически неограниченных объемов отходов сжигания углей и снижения расхода цемента в бетонных смесях. При этом снижается антропогенное воздействие на биосферу и величина углеродного следа, как при производстве тепловой и электрической энергии, так и при производстве цемента.

Ключевые слова: зола-уноса, прочность бетона, бетонная смесь, углеродный след.

Для цитирования: Бедарев В.В., Бедарев Н.В. Бедарев А.В. Применение золы ТЭС для получения высокопрочных бетонов и снижения расхода цемента // Бетон и железобетон. 2022. № 2 (610). С. 3–7.
DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-3-7>

V.V. BEDAREV, Candidate of Sciences (Engineering) (ooo-rigul@mail.ru), N.V. BEDAREV, Engineer, A.V. BEDAREV, Engineer
ООО «Rigul» (99-318, Kirova, Novokuznetsk, 654080, Russian Federation)

The use of Thermal Power Plant Ash to Produce High-Strength Concrete and Reduce Cement Consumption

The results of experimental studies on the use of fly ash of thermal power plants for the production of high-strength concrete or the replacement of part of the cement in the concrete mixture with TPP ash are presented. The results of experimental studies show the high efficiency of the multifunctional complex APP (fly ash⁺) developed on the basis of fly ash of thermal power plants in the production of high-grade concretes and the possibility of replacing a significant part of cement in the concrete mixture. To obtain high-strength concretes, the amount of APB (fly ash⁺) additionally introduced into the concrete mixture is from 5% to 100% of the cement mass. At the same time, an increase in the strength of concrete by 2–2.3 times in comparison with the strength of the concrete of the base composition can be achieved. The replacement of a part of cement in the concrete mixture with a multifunctional complex of APB (fly ash⁺) in an amount from 5% to 80% makes it possible to preserve the strength of concrete at the strength level of the concrete base composition. The possibility of utilization of practically unlimited volumes of coal burning waste and reduction of cement consumption in concrete mixtures is shown. At the same time, the anthropogenic impact on the biosphere and the size of the carbon footprint are reduced, both in the production of thermal and electrical energy, and in the production of cement.

Keywords: fly ash, concrete strength, concrete mix, carbon footprint.

For citation: Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V. The use of thermal power plant ash to produce high-strength concrete and reduce cement consumption. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 2 (610), pp. 3–7. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-3-7>

Применение золы-уноса, получаемой при сжигании каменных углей на тепловых электрических станциях, в тяжелых бетонах распространено достаточно широко.

Согласно [1–3] возможность применения сухой золы ТЭС в бетонах марки 400 на портландцементе марки 400 составляет 30–40%, на портландцементе марки 500 составляет 32–44% от массы цемента.

Исследования [4] показали возможность замены 30% портландцемента на АМД, в том числе в виде золы-уноса.

В качестве минеральной добавки золы-уноса применяются в производстве различных модификаторов бетона. Оптимальная дозировка модификатора бетона зависит от требований к бетонам и обычно находится в диапазоне 8–12% от массы цемента [5].

При дозировке модификатора в указанных пределах удастся существенно повысить прочность бетона при сжатии.

Однако в количественном отношении масса золы-уноса в составе бетонной смеси обычно не превышает 30% без снижения прочности бетона при сжатии.

Проведение и результаты исследований

Целью проведенных экспериментов являлась разработка активной минеральной добавки на основе золы-уноса ТЭС и исследование влияния количества добавки в составе смеси на прочность бетона при естественном твердении.

Исследования проводились на экспериментальных образцах, изготовленных из бетона следующего состава:

- портландцемент со шлаком (ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б по ГОСТ 31108–2016) – 1 в. ч.;
- песок мытый фракции 0–5 мм (ООО «Абагурский карьер») – 3 в. ч.;
- полифункциональный комплекс АПБ (зола-уноса⁺) в % от массы цемента;
- вода.

Экспериментальные исследования проводились по двум направлениям:

- исследовалось влияние на прочность бетона при введении в базовый состав дополнительно АПБ

(зола-уноса⁺) в количестве от 10 до 100% от массы цемента. В каждом последующем составе бетона количество АПБ (зола-уноса⁺) увеличивалось на 10% по сравнению с предыдущим;

- исследовалось влияние на прочность бетона при замещении части цемента в базовом составе АПБ (зола-уноса⁺) в количестве от 10 до 100% от массы цемента.

В каждом последующем составе бетона количество цемента снижалось на 10%, а количество АПБ (зола-уноса⁺) увеличивалось на 10% по сравнению с предыдущим. АПБ (зола-уноса⁺) вводилось в бетонную смесь в сухом состоянии с последующим перемешиванием. Перемешивание бетонной смеси производилось до однородного состояния.

При приготовлении бетонной смеси введение воды затворения осуществлялось частями, с перемешиванием бетонной смеси после каждого этапа до однородного состояния.

В качестве экспериментальных образцов использовались образцы-балочки размером 4×4×16 см для определения прочности при изгибе и сжатии и контрольные образцы-кубы размером 7×7×7 см.

Уплотнение бетонной смеси в формах при изготовлении образцов-балочек и образцов-кубов осуществлялось на вибростоле.

Изготовленные образцы укрывались четырьмя слоями полиэтиленовой пленки и выдерживались



Рис. 1. Испытание образцов-балочек при изгибе

Fig. 1. Bending test of beam samples



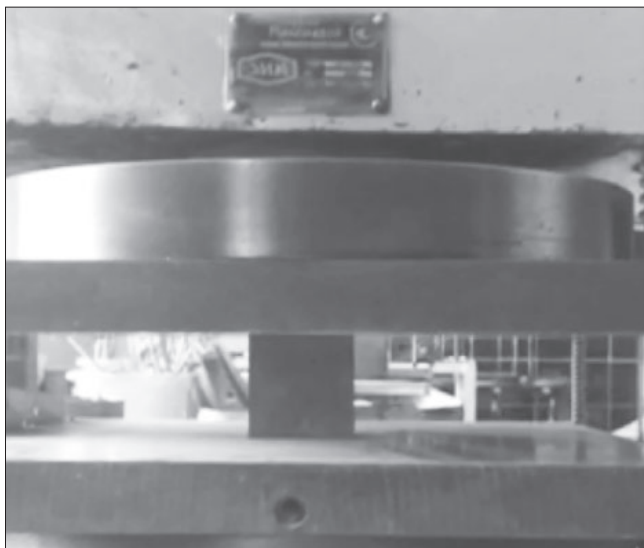


Рис. 2. Испытание образцов-балочек при сжатии
Fig. 2. Compression test of beam samples

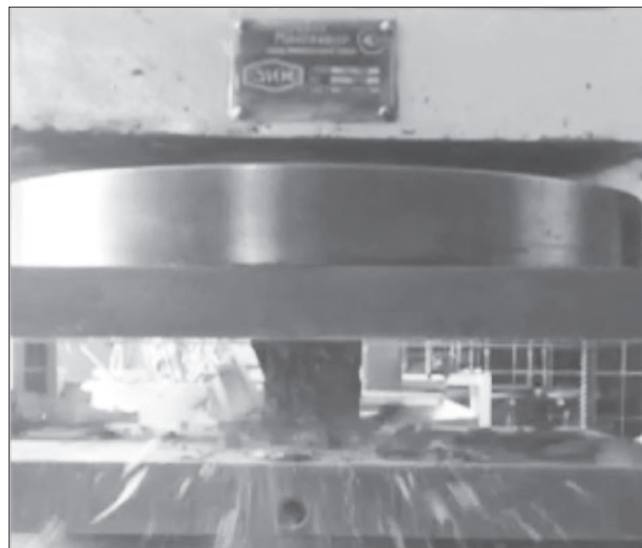
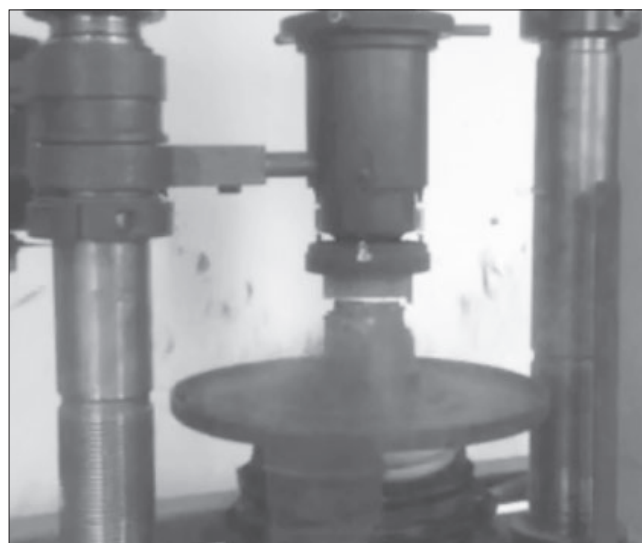


Рис. 3. Испытание образцов-кубов при сжатии
Fig. 3. Compression test of cube samples



при температуре 20°C в течение 24 ч. После выдержки образцы распалубливались и герметично упаковывались четырьмя слоями полиэтиленовой пленки для дальнейшего твердения.

Твердение образцов происходило при температуре 20°C в течение 28 и 90 сут со дня изготовления.

Испытание образцов-балочек и образцов-кубов осуществлялось после твердения в течение 28 и 90 сут со дня изготовления.

Образцы-балочки размером 4×4×16 см испытывались при изгибе (рис. 1) и сжатии (рис. 2). Образцы-кубы испытывались при сжатии (рис. 3).

При испытании образцов-балочек и образцов-кубов при сжатии разрушение бетона происходило хрупко, с разлетом осколков.

На рис. 4 представлен вид бетона в месте излома образца 4×4×16 см после испытания на изгиб.

Бетон поверхности излома имеет плотную структуру, с незначительным количеством пор, свидетельствующих о достаточной подвижности бетонной смеси при вибрации.

Частицы песка крупностью около 3–5 мм в основном разрушены, что указывает на хорошую адгезию заполнителей и вяжущего.

Результаты испытаний образцов при сжатии статистически обрабатывались для построения графических зависимостей.

Графически результаты испытаний при сжатии и результаты статистической обработки представлены на рис. 5.

На рис. 5 представлено изменение прочности бетона при сжатии по результатам испытаний образцов в возрасте 28 и 90 сут в сравнении с прочностью бетона базового состава:

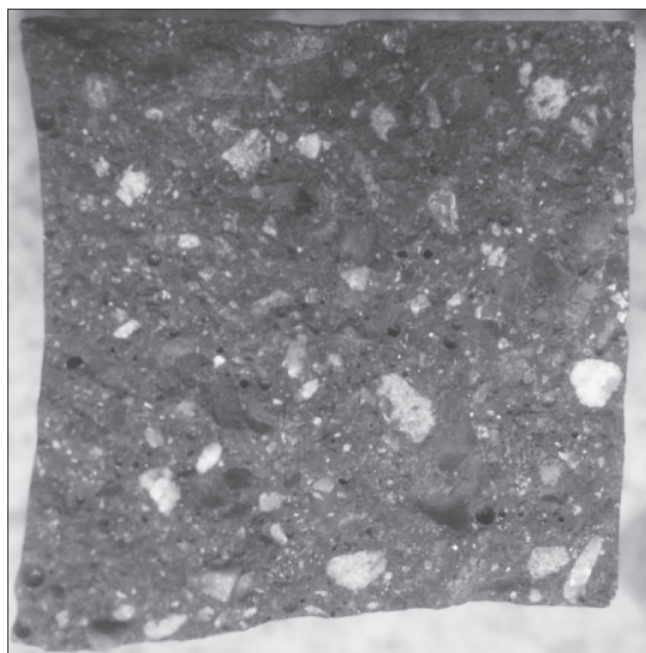


Рис. 4. Структура бетона после испытаний при изгибе
Fig. 4. Concrete structure after bending tests

– портландцемент со шлаком ЦЕМ II/A-Ш 32,5Б (по ГОСТ 31108–2016) – 1 в. ч.;
– песок мытый фракции 0–5 мм (ООО «Абагурский карьер») – 3 в. ч.;
– вода.

Зависимости 1 (28 сут 400+) и 2 (90 сут 400+) на рис. 5 иллюстрируют изменение прочности бетона при увеличении количества АПБ (зола-уноса⁺) в процентах, вводимого дополнительно к массе цемента базового состава бетона в возрасте 28 и 90 сут соответственно.

Увеличение количества АПБ (зола-уноса⁺) в бетонной смеси базового состава в количестве от 10 до 60% от массы цемента приводит к пропорциональному увеличению прочности бетона при сжатии.

Так, максимальная прочность бетона в возрасте 28 сут в сравнении с прочностью бетона базового состава достигнута при дополнительном введении в бетонную смесь АПБ (зола-уноса⁺) в количестве 60% от массы цемента. Прочность бетона при этом в два раза превышает прочность бетона базового состава (зависимость 1 (28 сут 400+), рис. 5).

Увеличение количества АПБ (зола-уноса⁺) в бетонной смеси от 70 до 100% от массы цемента приводит к некоторому снижению прочности бетона при сжатии, однако прочность бетона, даже при введении дополнительно АПБ (зола-уноса⁺) в количестве 100% от массы цемента, превышает прочность бетона базового состава в 1,7 раза.

Максимальное, в 2,3 раза по сравнению с прочностью бетона базового состава, увеличение прочности бетона при сжатии получено при количестве АПБ (зола-уноса⁺) в бетонной смеси в пределах 60% от

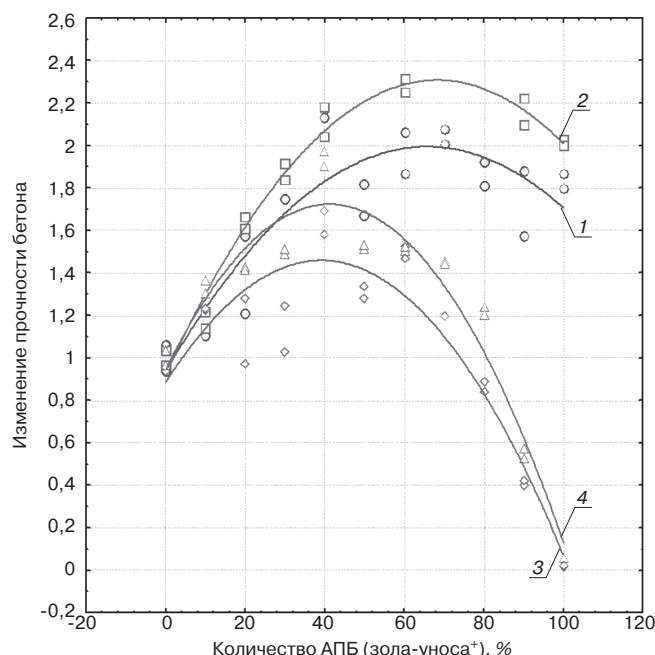


Рис. 5. Изменение прочности бетона относительно прочности бетона базового состава в зависимости от количества АПБ (зола-уноса⁺) в бетонной смеси в % от массы цемента: 1 – 28 сут 400+; 2 – 90 сут 400+; 3 – 28 сут 400–; 4 – 90 сут 400–, где 400+ – введение дополнительного количества АПБ (зола-уноса⁺) к количеству цемента базового состава бетона в %; 400– – замещение части цемента базового состава бетона полифункциональным комплексом АПБ (зола-уноса⁺) в %

Fig. 5. The change in the strength of concrete relative to the strength of the concrete of the base composition, depending on the amount of APB (fly ash⁺) in the concrete mixture in % by weight of cement: 1 – 28 days 400+; 2 – 90 days 400+; 3 – 28 days 400–; 4 – 90 days 400–, where 400+ is the introduction of an additional amount of APB (fly ash⁺) to the amount of cement of the base composition of concrete in %; 400– – replacement of a part of the cement of the base composition of concrete with a multifunctional complex of APB (fly ash⁺) in %

массы цемента. Указанная прочность бетона получена при испытании образцов бетона в возрасте 90 сут.

Дополнительное введение в бетонную смесь АПБ (зола-уноса⁺) в количестве от 40 до 100% от массы цемента базового состава позволяет получить увеличение прочности бетона в возрасте 90 сут в два и более раз в сравнении с прочностью при сжатии бетона базового состава (зависимость 2 (90 сут 400+), рис. 5).

Зависимости 3 (28 сут 400–) и 4 (90 сут 400–) на рис. 5 иллюстрируют изменение прочности бетона при увеличении количества АПБ (зола-уноса⁺), вводимого при замещении части цемента в % от массы цемента базового состава бетона в возрасте 28 и 90 сут.

Увеличение количества АПБ (зола-уноса⁺) в бетонной смеси при замещении части цемента от 10 до 40% также приводит к пропорциональному увеличению прочности бетона при сжатии.

Максимальная прочность бетона в возрасте 28 сут в сравнении с прочностью бетона базового состава достигнута при замещении в составе бетонной смеси части цемента на АПБ (зола-уноса⁺) в количестве 40% от массы цемента. Прочность бетона при этом практи-

чески в 1,5 раза превышает прочность бетона базового состава (зависимость 3 (28 сут 400–), рис. 5).

При замещении части цемента базового состава в количестве от 2% до 70% от массы на АПБ (зола-уноса⁺) прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут превышает не менее чем в 1,2 раза прочность бетона базового состава.

В возрасте 90 сут при замещении части цемента бетона базового состава на АПБ (зола-уноса⁺) в количестве 40% от массы прочность бетона при сжатии в 1,7 раза превышает прочность при сжатии бетона базового состава того же возраста.

При замещении части цемента в количестве от 20 до 70% на АПБ (зола-уноса⁺) прочность бетона при сжатии в возрасте 90 сут увеличивается не менее чем в 1,4 раза в сравнении с прочностью бетона базового состава (зависимость 4 (90 сут 400–), рис. 5).

В целом зависимость 4 (90 сут 400–) на рис. 5 показывает, что при замещении части цемента базового состава в количестве от 10 до 80% от массы на АПБ (зола-уноса⁺) прочность бетона при сжатии в возрасте 90 сут составляет не менее прочности бетона базового состава.

Закключение

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность полифункционального комплекса АПБ (зола-уноса⁺) на основе золы ТЭС, как в целях повышения прочности бетона при сжатии и получения высокопрочных бетонов при использовании низкомарочных цементов и стандартных заполнителей, так и в целях экономии цемента при замещении его части на отходы сжигания углей.

Необходимо отметить существенное достоинство разработанного полифункционального комплекса АПБ (зола-уноса⁺) на основе золы ТЭС, позволяющее получать высокопрочные бетоны при изменении массы вводимой в бетонную смесь АПБ (зола-уноса⁺) в широком диапазоне – практически от 10 до 100% от массы цемента базового состава.

Количество замещаемого в составе бетона цемента на АПБ (зола-уноса⁺) может достигать 80% от массы цемента базового состава без снижения прочности бетона при сжатии.

Универсальность АПБ (зола-уноса⁺) бетона открывает широкие перспективы как в возможности утилизации больших объемов отходов, получаемых при сжигании углей в производстве строительных материалов, так и в возможности применения цементов низких марок при изготовлении высокопрочных бетонов.

Технологически производство АПБ (зола-уноса⁺) и применение его в бетонах существенно проще, нежели производство других видов добавок, применяемых для приготовления высокопрочных бетонов.

Использование АПБ (зола-уноса⁺) позволяет не только производить утилизацию отходов сжигания углей практически в неограниченных объемах, но и существенно снизить антропогенное воздействие на биосферу и величину углеродного следа при производстве тепловой и электрической энергии. Дополнительно появляется возможность добиться снижения углеродного следа и в производстве цемента за счет уменьшения его расхода в бетонных смесях и строительных растворах.

Список литературы

1. Рекомендации по применению золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций в тяжелых бетонах и строительных растворах. НИИЖБ. М.: Стройиздат, 1977. 30 с.
2. ГОСТ 25818–91 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия». М.: Издательство стандартов, 1991. 12 с.
3. Рекомендации по применению в бетонах золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций. НИИЖБ. М.: Стройиздат, 1986. 81 с.
4. Маккечни Д.Р., Шах В., Скотт А. Сравнение прочностных и долговечных характеристик бетона, изготовленного с использованием природных и промышленных минеральных добавок (АМД) // *CPI – Международное бетонное производство*. 2022. № 1. С. 20–26.
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. М.: Парадиз, 2010. 258 с.

References

1. Rekomendacii po primeneniyu zoly, shlaka i zoloshlakovoi smesi teplovykh elektrostantsiy v tyazhelykh betonakh i stroitel'nykh rastvorakh [Recommendations for the use of ash, slag and ash-and-slag mix of thermal power plants in heavy concrete and building mortars] NIIZhB. Moscow: Stroyizdat. 1977. 30 p. (In Russian).
2. GOST 25818–91 Zoly-unosa teplovykh elektrostantsiy dlya betonov. Tekhnicheskiye usloviya. [Thermal plot fly-ashes for concrete. Specifications] Moscow: Izdatel'stvo Standartov, 1991. 12 p. (In Russian).
3. Rekomendacii po primeneniyu v betonakh zoly, shlaka i zoloshlakovoi smesi teplovykh elektrostantsiy [Recommendations for the use of ash, slag and ash-and-slag mix of thermal power plants in concrete] NIIZhB. Moscow: Stroyizdat. 1986. 81 p.
4. Mackechnie J.R., Shah V., Scott A. Comparing the strength and durability performance of concrete made with natural or industrial SCMs. *CPI – Concrete Plant international*. 2022. No. 1, pp. 20–26. (In Russian).
5. Kapriyelov S.S., Sheinfel'd A.V., Kardumyan G.S. Novye modifitsirovannye betony [New modified concrete]. Moscow: Paradiz, 2010. 258 p.