# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-92-103

***Фомина И.В., Капустин Ф.Л.***
*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина*
**E-mail: irina.fomina@urfu.ru*

## БЕЗОБЖИГОВЫЙ ЗОЛЬНЫЙ ГРАВИЙ ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ

***Аннотация.*** *С учетом современных требований к энергоэффективности зданий и сооружений целесообразно использовать при их строительстве несущие конструкции из легких и облегченных бетонов с применением пористых заполнителей, обладающих высокой прочностью и долговечностью. В связи с этим актуальным является научно-техническое обоснование получения высокопрочного безобжигового зольного гравия на основе малоцементных зольных композиций, модифицированных химическими и минеральными добавками. Представлена возможность получения крупного заполнителя для конструкционных бетонов на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС. Разработан состав высокопрочного безобжигового зольного гравия, содержащий в качестве минеральной добавки шлак доменный гранулированный и химическую добавку – сульфат натрия, ускоряющие твердение золоцементного камня. Исследовано влияние шлака доменного гранулированного в качестве минеральной добавки для повышения прочности искусственного заполнителя. Приведены результаты исследований физико-механических свойств безобжигового зольного гравия марки по плотности М1000. С целью установления механизма повышения прочности заполнителя рентгенофазовым анализом и ИК-спектроскопией определены состав и структура гидратных новообразований золоцементного камня. Показано, что применение минеральной добавки в составе золоцементного камня снижает общую пористость и улучшает структуру безобжигового зольного гравия, значительно уменьшая объем микропор за счет заполнения их продуктами гидратации. На полученном безобжиговом зольном гравий подобраны составы и определены физико-механические свойства конструкционных бетонов классов прочности от В20 до В40. Показано, что бетоны на безобжиговом зольном гравии по сравнению с гранитным щебнем при одинаковом расходе цемента характеризуются плотностью меньшей на 19 %.*

***Ключевые слова:*** *зола-уноса, безобжиговый зольный гравий, прочность, конструкционный бетон.*

**Введение**. В современном строительстве одним из востребованных строительных материалов является конструкционный цементный бетон. Важнейшим компонентом, занимающим наибольший объем в составе и во многом определяющим строительно-технические свойства и назначение бетона, является крупный заполнитель из прочных горных пород – щебень или гравий. Добыча и переработка природных каменных материалов относится к числу наиболее ресурсоемких отраслей, оказывающих, в том числе, негативное воздействие на окружающую природную среду. Альтернативной заменой традиционным природным заполнителям может быть применение искусственных, что позволит сократить объемы побочных продуктов, складируемых в отвалах, а также снизить затраты на добычу природных каменных материалов.

Одним из видов техногенного сырья для производства искусственных заполнителей являются золошлаковые отходы, образующиеся на тепловых электростанциях при сжигании каменного и бурого углей и, как правило, складируемых в отвалах сотнями миллионов тонн. В России работают 179 угольных ТЭС, на которых ежегодно образуется до 30 млн. тонн золошлаков, относящиеся к 4 или 5 классам опасности. По состоянию на 2025 год в отвалах накоплено свыше 1,5 млрд. тонн таких отходов, а к 2030 году их объем может достичь 2 млрд. тонн. Однако в переработку вовлечено лишь около 10 % золошлаковых отходов, тогда как в Китае этот показатель достигает 80 %, а в Европейских странах и Японии – до 96–98 % [1].

На перспективность золошлаков теплоэнергетики указывают Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года и утвержденный Правительством России комплексный план утилизации отходов угольных электростанций и котельных, согласно которому к 2035 году должно использоваться в экономике не менее 50 % золы и шлака текущего выхода [2].

Одним из возможных эффективных направлений утилизации золошлаковых отходов может быть производство безобжигового зольного гравия (БЗГ), содержащего до 90 % золы. Безобжиговый зольный гравий − заполнитель для легких и конструкционных бетонов, получаемый в виде гранул из предварительно увлажненной сырьевой смеси состоящей, как правило, из золы-уноса,

портландцемента, добавок, и твердеющий в тепловлажностных или естественных условиях. Данный заполнитель разработан и исследован в Московском государственном строительном университете авторитетным ученым и педагогом Ю.М. Баженовым с учениками [3–5]. Их исследования в основном были направлены на получение БЗГ для легких бетонов.

Искусственные пористые заполнители разрабатываются так же и за рубежом, но предлагаемые технологии получения характеризуются многокомпонентным составом смеси [6-9], использованием высоких температур твердения [10, 11], большим количеством технологических операций [12]. В Индии и Вьетнаме проведены исследования по совместному использованию безобжиговых зольных заполнителей с природными заполнителями для получения самоуплотняющихся и водонепроницаемых бетонов [13, 14].

Для производства БЗГ не используется сложное технологическое оборудование и высокотемпературные установки, специальные условия хранения. Применение такого заполнителя в бетонах особенно актуально может быть для регионов с дефицитом природных каменных материалов и образованием на ТЭС значительных объемов золошлаковых отходов, которые могут быть использованы при его производстве. Так, например, на Рефтинской ГРЭС (АО «Кузбассэнерго») одной из крупнейших электростанций в России, расположенной в Свердловской области, при сжигании каменного угля Экибастузского бассейна (Республика Казахстан) образуется до 5 млн. тонн золошлаков. На электростанции работает система сухого удаления и складирования золы и шлака, предусматривающая отгрузку потребителям до 2 млн. тонн золы-уноса. Однако объем ее утилизации не превышает 10 % и в основном ее применяют в производстве изделий из автоклавного газобетона. Остальную значительную часть золошлаков складируют на отвале, загрязняя окружающую природную среду.

С использованием золы-уноса Рефтинской ГРЭС разработан состав высокопрочного безобжигового зольного гравия, содержащий портландцемент и минеральную добавку, например, шлак доменный гранулированный или основную горную породу, а также химическую добавку – сульфат натрия, ускоряющий твердение золоцементного камня [15]. Установлено, что введение доменного шлака в количестве от 3 до 25 % повышает прочность золоцементного камня с 4,4 до 4,9 МПа.

Цель исследования – получение БЗГ на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС для применения в конструкционных бетонах. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– на основе разработанного состава получить БЗГ и изучить его свойства;

– установить механизм повышения прочности золоцементного камня с добавкой шлака доменного гранулированного;

– подобрать составы конструкционных бетонов на основе разработанного БЗГ.

**Методы исследования.** Химический состав сырьевых материалов, использованных в работе, определяли по ГОСТ 5382-1991 «Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа», истинную плотность золы-уноса и шлака − пикнометрическим методом по ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка», насыпную плотность − ГОСТ 8735-1988 «Песок для строительных работ. Методы испытаний», удельную поверхность − методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ-11М, коэффициент качества рассчитывали по ГОСТ 3476-2019 «Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов». Распределение частиц золы по размеру исследовали на лазерном анализаторе частиц SHIMADZU SALD-2201 (Япония) в диапазоне от 0,03 до 1000 мкм.

Минеральный состав сырьевых материалов и продуктов твердения золоцементного камня определяли рентгенофазовым анализом на дифрактометре XRD 7000 Maxima Shimadzu (Япония) при CuKα излучении в диапазоне углов рассеяния 2θ от 10 до 70°, используя базы данных PDF-4. ИК-спектроскопию образцов золоцементного камня выполняли на ИК-Фурье спектрофотометре Alpha производства «Bruker» (Германия) с применением приставки НПВО (кристалл ZnSe) в области частот 4000–500 $см^{-1}$ в проходящем свете.

Для получения БЗГ в лабораторном смесителе готовили смесь, содержащую 60 % золы-уноса, 20 % портландцемента и 20 % молотого шлака. Для ускорения его твердения вместе с водой затворения в смесь вводили сульфат натрия в количестве 2 % от массы портландцемента. Полученную золоцементную смесь окомковывали на лабораторном грануляторе с диаметром тарели 0,7 м, при скорости ее вращения 26 об./мин и угле наклона 55º. Количество воды на грануляцию подбирали экспериментально в зависимости от требуемого фракционного состава заполнителя. После завершения грануляции, полученные сырцовые зольные гранулы, помещали в пропарочную камеру для ускорения твердения БЗГ.

У сырцовых гранул определяли зерновой состав и насыпную плотность по ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний», а также их

точечную прочность, количество сбрасываний с высоты 0,3 м и предельную высоту сбрасывания на бетонное основание без разрушения согласно методике, предложенной ВНИИИСтромом [16]. Физико-механические свойства заполнителя (средняя и насыпная плотность, прочность при сдавливании в цилиндре, пористость, водопоглощение, силикатный распад, морозостойкость) определяли по ГОСТ 9758-2012. В связи с отсутствием стандарта на БЗГ полученные результаты сравнивали с требованиями ГОСТ 33928-2016 на заполнители искусственные пористые на основе зол и шлаков ТЭС, в частности, на зольный гравий, характеризующийся наиболее высокими значениями плотности и прочности.

Состав бетонной смеси рассчитывали на получение бетона класса прочности В20, В30 и В40 по руководству [17]. Приготовление, формование, определение удобоукладываемости и плотности смеси проводили в соответствии с ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний», марку бетонной смеси по подвижности определяли по ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия». Бетонные образцы-кубы твердели в условиях тепловлажностной обработки по режиму: предварительная выдержка – 2 ч, подъем температуры до 85 °С – 3 ч, изотермическая выдержка – 6 ч, охлаждение – 3 ч. Для полученных бетонов определяли среднюю плотность в сухом состоянии по ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности», прочность на сжатие − ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», класс прочности – ГОСТ 18105-2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

**Состав и свойства материалов.** В исследовании использовали золу-уноса Рефтинской ГРЭС по ТУ 5717-004-79935691-2009, портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ГОСТ 31108-2020 производства ООО «СЛК Цемент» (Свердловская область, г. Сухой Лог), шлак доменный гранулированный молотый по ТУ 0799-001-99126491-2013 ООО «Мечел-Материалы» [18] (г. Челябинск). Для ускорения твердения БЗГ применяли натрий сернокислый технический (далее по тексту сульфат натрия) ГОСТ 6318-1977 «Натрий сернокислый технический. Технические условия», показавшего высокую эффективность [19, 20]. Сульфат натрия – кристаллический порошок белого цвета, растворимый в воде, используется в целлюлозно-бумажной, химической и стекольной промышленности, в строительных бетонах в качестве добавки-ускорителя твердения цемента. По механизму действия он относится к добавкам электролитам 2 класса [21].

Химический состав золы-уноса представлен в таблице 1. В соответствие с ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия» по количеству оксида кальция она является кислой, практически не содержит топливных остатков, имеет истинную плотность 2220 кг/м$^3$, насыпную – 785 кг/м$^3$, удельную поверхность 355 м$^2$/кг, при увлажнении водой самостоятельно не твердеет, но, имея высокое значение t-критерия Стьюдента, равное 46,7, проявляет пуццоланические свойства по отношению к цементу и извести.

*Таблица 1*

**Химический состав золы-уноса Рефтинской ГРЭС**

| $\Delta m_{прк}$, мас. % | Содержание оксидов, мас. % | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | $Na_2O$ | $K_2O$ | Прочие |
| 1,65 | 62,84 | 23,21 | 5,53 | 1,30 | 2,28 | 0,14 | 0,41 | 0,53 | 2,11 |

Гранулометрический состав золы в основном представлен частицами размером от 50 до 300 мкм (около 56 %) и менее 10 мкм (16 %), минеральный состав − стеклофазой в количестве 60–62 %, муллитом – 28–30 %, кварцем – 5–6 % и магнетитом – 3–4 %, что подтверждается рентгенофазовым анализом (рисунок 1).

Для повышения прочности БЗГ в состав золоцементной смеси вводили молотый доменный гранулированный шлак. В соответствие с требованиями ГОСТ 3476-2019 «Шлаки доменные и электро-термофосфорные гранулированные для производства цементов» по коэффициенту качества и химическому составу он относится ко 2 сорту и удовлетворяет требованиям ТУ 0799-001-9912491-2013 [18] (табл. 2).

Минеральный состав шлака доменного представлен в основном стекловидной фазой, что подтверждается значительным гало на его дифрактограмме в области углов 2θ 20-40 градусов (рисунок 2), которая с учетом химического состава шлака и данных [22] имеет мелилитовый состав. Кроме того, шлак содержит минералы окерманит $2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$ и шпинель $MgO{\cdot}Al_2O_3$.

Для изготовления бетонной смеси в качестве мелкого заполнителя применяли песок природный кварцевый мытый, первого класса, средней крупности производства ООО «ИСМ-инвест», в качестве крупного заполнителя использовали щебень гранитный фракции 5–20 мм с карьера «Монетный» Свердловской области.

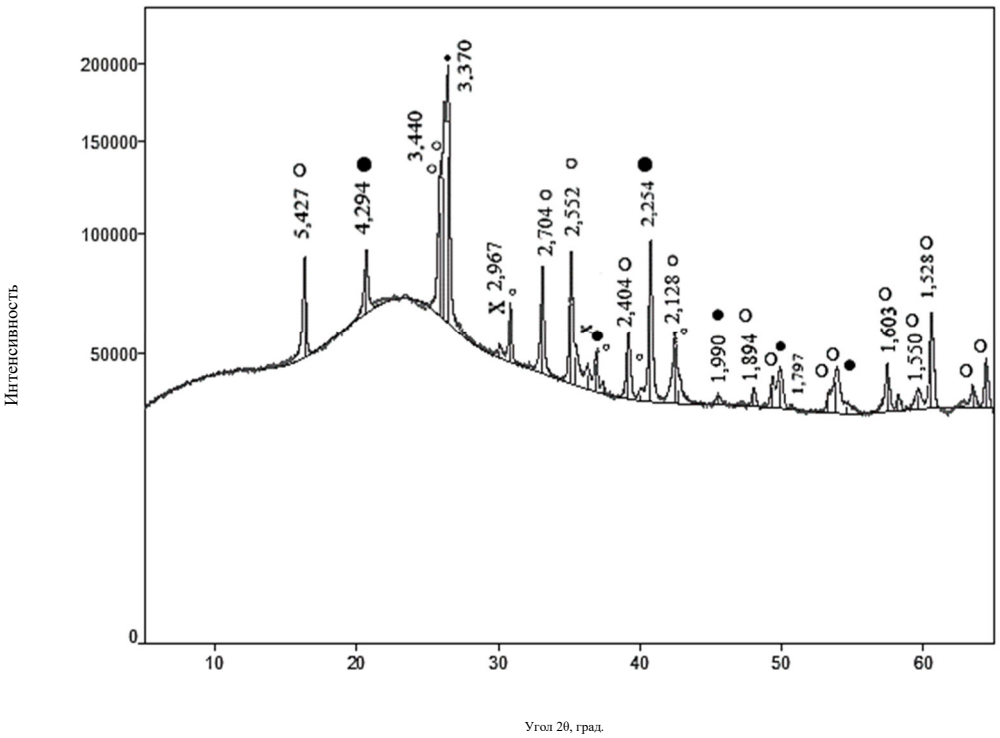



Рис. 1. Дифрактограмма золы-уноса: ○ – муллит; ● – кварц; х – магнетит

*Таблица 2*

**Состав и свойства шлака доменного гранулированного молотого ООО «Мечел-Материалы»**

| Наименование | Содержание оксидов, мас. % | | | | | | | | | Коэффициент качества | Удельная поверхность, $м^2/кг$ | Истинная плотность, $кг/м^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | $Na_2O$ | $K_2O$ | Прочие | | | |
| Фактические значения | 37,75 | 12,85 | 0,46 | 35,24 | 9,10 | 0,80 | 0,01 | 0,87 | 2,02 | 1,49 | 450 | 2850 |
| Требования ТУ 0799-001-99126491-2013 | 35,0–45,0 | ≥8,0 | – | 35,0–45,0 | ≤15 | ≤1,0 | 0,5–1,0 | 1,0-1,5 | – | Не менее 1,45 | Не менее 450 | – |

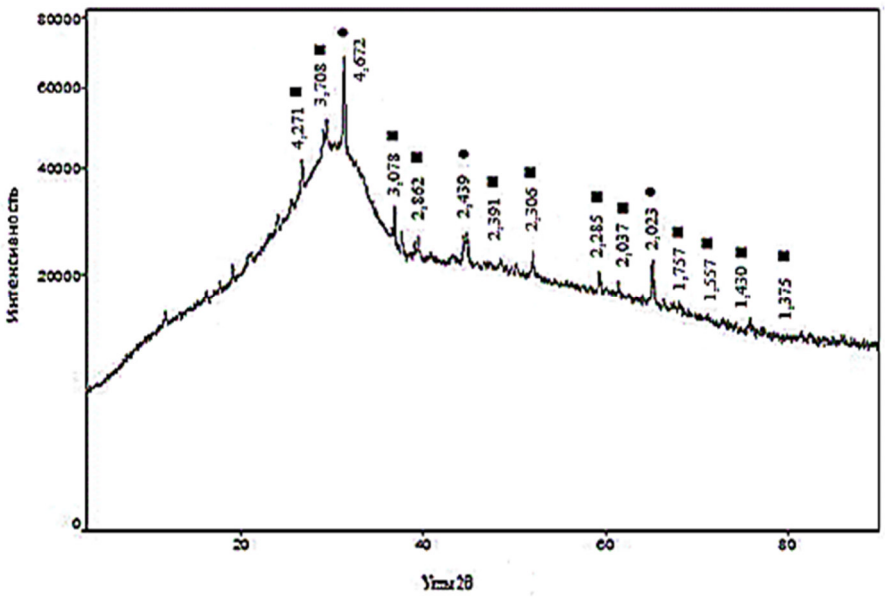



Рис. 2. Дифрактограмма шлака доменного гранулированного: ● – шпинель; ■ – окерманит

Для повышения удобоукладываемости в бетонную смесь вводили суперпластификатор «Полипласт СП-1» производства ООО «Полипласт-УралСиб», рекомендуемый для изготовления строительных конструкций из тяжелого, легкого и ячеистого бетонов.

**Результаты исследования.** С использованием золы-уноса Рефтинской ГРЭС нами разработан состав высокопрочного БЗГ, содержащий, наряду с портландцементом, также шлак доменный гранулированный и добавку сульфата натрия, ускоряющий твердение золоцементного камня [15]. Изменяя некоторые технологические параметры получения (влажность и дисперсность смеси, условия твердения), можно регулировать физико-механические свойства БЗГ, такие как зерновой состав, структуру пористости, плотность и прочность на сжатие.

Для обеспечения хорошей гранулируемости золоцементной смеси и получения наибольшего выхода гранул кондиционных фракций БЗГ для увлажнения экспериментально подбирали оптимальное количество воды с учетом результатов исследований [23–25]. Гранулируемость золоцементной смеси на тарельчатом грануляторе оценивали по выходу зольных гранул размером 5-20 мм. Гравий такой фракции является более предпочтительным для использования в качестве крупного заполнителя в составе бетона [26]. По данным [16] гранулируемость золы считается удовлетворительной, если выход гранул фракции 5–20 мм составляет не менее 75 % по объему.

В таблице 3 приведены результаты исследований по определению оптимального количества воды, обеспечивающего удовлетворительную гранулируемость золоцементной смеси и высокую прочность сырцовым гранулам. Установлено, что с уменьшением количества воды менее 24 % образуются в основном мелкие гранулы, а с ее увеличением свыше 27 % – количество крупных гранул размером более 40 мм увеличивается на 11–16 %, а также снижается их прочность. При оптимальном расходе воды, равном 24–25 %, выход сырцовых гранул фракции 5–20 мм составил 97,7–100 %, их прочность повысилась, особенно значительно при введении в состав золоцементной смеси добавки молотого доменного шлака, с 12 до 18-20 Н/гранула.

*Таблица 3*

**Влияние количества воды на гранулируемость золоцементной смеси**

| № | Вид добавки | Водопотребность, мас. % | Выход фракций, мм, % по объему | | | Прочность сырцовых гранул, Н/гранула |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 5–10 | 10–20 | 20–40 | |
| 1 | Без добавки | 24 | 64,6 | 35,4 | 0 | 13 |
| | | 25 | 48,6 | 51,4 | 0 | 12 |
| | | 26 | 36,0 | 54,1 | 9,9 | 10 |
| | | 27 | 20,6 | 63,3 | 16,1 | 8 |
| 2 | Шлак доменный гранулированный | 24 | 38,7 | 60,1 | 1,2 | 20 |
| | | 25 | 32,0 | 65,7 | 2,3 | 18 |
| | | 26 | 10,3 | 83,9 | 5,8 | 15 |
| | | 27 | 3,0 | 86,2 | 10,8 | 12 |

Для ускорения набора прочности безобжиговых гранулированных заполнителей применяют тепловлажностную обработку, при которой создаются благоприятные условия для интенсификации гидратации цемента и взаимодействия стеклофазы и алюмосиликатных компонентов золы-уноса и доменного шлака с ним. Так авторы работ [27, 28] при получении БЗГ применяли длительную предварительную выдержку зольных гранул в течение 14-16 ч и их тепловую обработку продолжительностью 16 ч. С целью повышения энергоэффективности производства БЗГ нами были исследованы более короткие режимы тепловлажностной обработки: первый − 1,5 ч – подъем температуры, 3 ч – изотермическая выдержка, 1,5 ч – охлаждение; второй – соответственно 3, 6 и 3 ч. Установлено, что пропаривание по второму режиму по сравнению с первым повышает прочность гравия более чем в 3 раза.

В таблице 4 приведены результаты исследования по влиянию добавки молотого доменного шлака на физико-механические свойства БЗГ после пропаривания. Установлено, что введение шлака в состав золоцементной смеси в количестве 20 %, снижает общую пористость БЗГ на 23 %, увеличивая плотность на 10 % и прочность в два раза.

Разработанный БЗГ с добавкой доменного шлака по ГОСТ 33928-2016 имеет марку по плотности М1000, прочности − П350, морозостойкости − F50 и характеризуется пониженными водопоглощением и силикатным распадом.

*Таблица 4*

**Физико-механические свойства БЗГ фракции 10–20 мм**

| Вид добавки | Плотность, кг/м³ | | Марка по насыпной плотности | Прочность на сжатие в цилиндре, МПа | Марка по прочности | Пористость, % | Водопоглощение, мас. % | Силикатный распад, % | Морозостойкость | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Средняя | Насыпная | | | | | | | Потери массы, % | Марка |
| Без добавки | 1420 | 890 | М900 | 5,5 | П200 | 38,6 | 12,1 | 4,0 | 7,2 | F50 |
| Шлак доменный гранулированный | 1554 | 960 | М1000 | 10,3 | П350 | 29,7 | 8,3 | 2,6 | 4,6 | |

Прочность золоцементного камня во многом определяется его структурой и составом кристаллогидратов. В работе [29] показано, что при введении доменного гранулированного шлака основность образующихся гидросиликатов кальция тоберморитовой группы в нем понижается, а их количество увеличивается. С целью уточнения состава низкоосновных гидросиликатов кальция был выполнен рентгенофазовый анализ золоцементного камня (рисунок 3). Установлено, что наряду с минералами золы и шлака (муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, кварца $SiO_2$, магнетита $Fe_3O_4$ и окерманита $2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$), в нем присутствуют гидросульфоалюминат кальция состава $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ (d=2,874; 2,757; 2,440; 2,071; 1,627 Å) и низкоосновные гидросиликаты кальция – тоберморит 14 Å $5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot nH_2O$ (d=5,438; 3,045; 2,977; 2,295; 2,099; 1,984; 1,825 Å), CSH(I) состава (0,8-1,5) $CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ (d=3,045; 2,785; 1,825 Å) и пломбьерит $CaO \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$ (d=5,438; 2,785; 2,071; 1,825 Å), входящие в тоберморитовую группу с разной степенью кристаллизации. Интенсивность рефлексов, характерных для тоберморита 14 Å высокая, что свидетельствует о более полной его закристаллизованности.

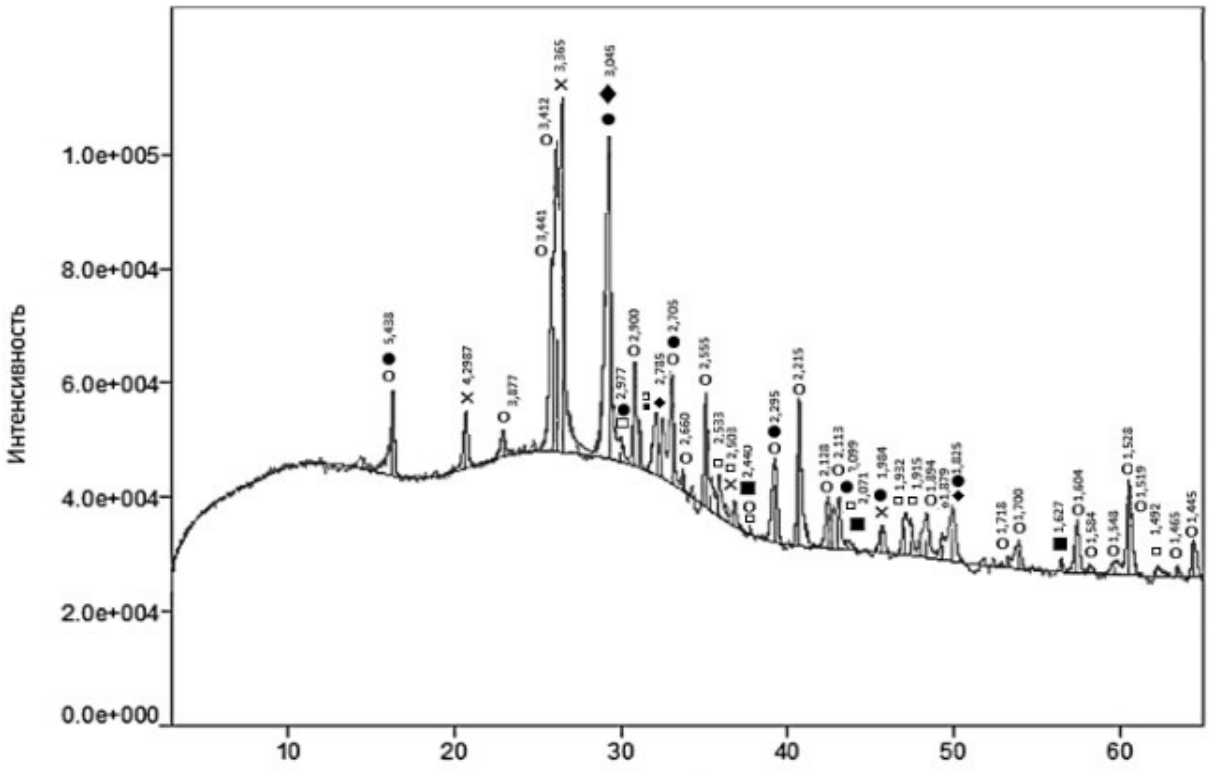



Рис. 3. Дифрактограмма золоцементного камня с шлаком доменным гранулированным после тепловлажностной обработки: ● – тоберморит 14 Å; ■ – эттрингит; ♦ – CSH(I); ▲ – пломбьерит; ○ – муллит; х – кварц; □ – магнетит; ◘ – окерманит

Для изучения особенностей структуры кристаллогидратов были проведены дополнительные исследования золоцементного камня методом ИК-спектроскопии (рисунок 4). Установлено, что на ИК-спектрах в интервале волновых чисел от 770,62 до 1100,00 $см^{-1}$ присутствуют полосы поглощения, обусловленные колебаниями

группировок мостиковых связей Si–O–Si и тетраэдров Si–O кремнекислородного каркаса в гидросиликатах кальция. Их интенсивность низкая, что связано с понижением основности и образованием дополнительного количества гидросиликатов кальция при введении доменного шлака в состав золоцементного камня. Волновые числа в области 1416,62–1483,02 $см^{-1}$ соответствуют колебаниям свободных гидроксильных групп –OH в вершинах кремнекислородных тетраэдров и свидетельствуют о более полной гидратации минералов портландцемента.

Особенностью твердения золоцементного камня с добавкой шлака доменного гранулированного является то, что наряду с гидратацией клинкерных минералов портландцемента, происходит гидратация минералов и стеклофазы шлака, которая является его активной составляющей. Основными продуктами щелочной гидратации шлакового стекла после тепловлажностной обработки являются тоберморитовый гель, пломбьерит, односновнный гидросиликат кальция, тоберморит.

Гидратация шлакового стекла в золоцементной системе ускоряется в присутствии добавки сульфата натрия в результате образования гидроксида натрия, который проникает в глубь поверхности шлакового стекла, разрушая его структуру, и тем самым способствуя более активному растворению оксидов кремния и алюминия в результате увеличения ph поровой жидкости. За счет химического взаимодействия щелочного компонента со шлаком образуется дополнительное количество низкоосновных гидросиликатов кальция шлакощелочного вяжущего вещества, что приводит к повышению прочности золоцементного камня БЗГ при введении шлака доменного гранулированного.

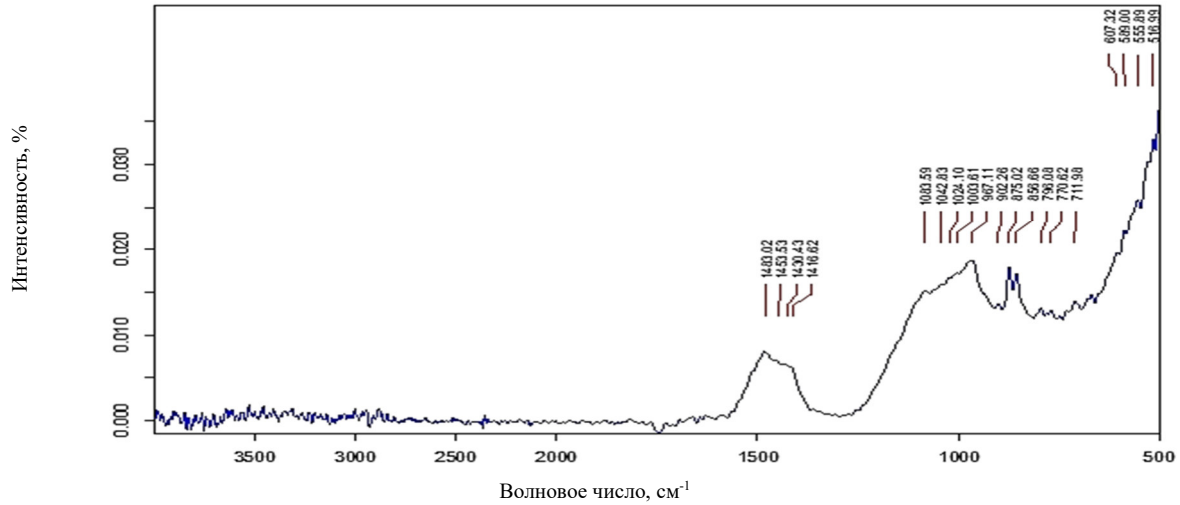



Рис. 4. ИК-спектры золоцементного камня, содержащего шлак доменный гранулированный

С учетом высоких физико-механических свойств разработанный БЗГ использовали в качестве крупного заполнителя в составе конструкционного бетона. В таблице 5 приведен компонентный состав и свойства бетонной смеси и бетона классов прочности от В20 до В40. Свойства бетонов на БЗГ сравнивали с бетоном, в котором в качестве крупного заполнителя использовали щебень гранитный фракции 5–20 мм.

Установлено, что для бетона класса прочности В20 при одинаковом расходе цемента водопотребность бетонной смеси при использовании БЗГ на 4 % меньше, чем на гранитном щебне. При этом плотность бетона в сухом состоянии на БЗГ составляет 1940 $кг/м^3$, а при введении щебня она повышается до 2307 $кг/м^3$. Бетоны на БЗГ после пропаривания имеют более высокую прочность на сжатие (на 24,0 %) по сравнению с бетоном на щебне. Применение БЗГ при получении бетона класса В27,5 по сравнению со щебнем повышает расход воды на 3,3–3,8 %, снижает плотность бетона от 2384 до 2092 $кг/м^3$, незначительно уменьшает его прочность на сжатие как после пропаривания, так и через 28 суток нормального твердения.

В формировании прочности бетона участвуют крупный заполнитель, растворная часть и контактная зона между ними. Состояние контактной зоны, прочность сцепления БЗГ с цементно-песчаной составляющей во многом предопределяет характер разрушения бетонов. На рисунке 5 представлен фрагмент бетона после испытания на сжатие, в котором в качестве крупного заполнителя использовали БЗГ. Установлено, что разрушение данного бетона в большей степени происходит по зернам заполнителя и в

меньшей по цементному раствору. Характер такого разрушения можно объяснить с учетом результатов работ [24, 30]. В контактной зоне «заполнитель – растворная часть бетона» за счет физико-химических процессов происходит взаимное срастание близких по составу гидратных соединений, содержащихся в поверхностном слое БЗГ, с образующимися продуктами гидратации цементного раствора, обеспечивающих высокую прочность сцепления между заполнителем и растворной частью бетона.

*Таблица 5*

**Состав и свойства конструкционных бетонов**

| № | Расход материалов, кг/м$^3$ | | | | | | Марка по подвижности бетонной смеси по ГОСТ 7473-2010 | Плоность бетонной смеси, кг/м$^3$ | Плотность бетона в сухом состоянии, кг/м$^3$ | Предел прочности на сжатие, МПа | | Класс прочности по ГОСТ 18105-2018 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Цемент | Песок | БЗГ с добавкой шлака | Щебень | Добавка Полипласт СП-1 | Вода | | | | ТВО | 28 сут. | |
| 1 | 280 | 800 | 733 | – | 1,7 | 196 | П2 | 2 011 | 1 940 | 21,7 | 26,7 | В20 |
| 2 | 280 | 817 | – | 1107 | 1,7 | 204 | | 2 408 | 2 307 | 17,5 | 24,4 | В20 |
| 3 | 316 | 878 | 794 | – | 1,9 | 190 | | 2 176 | 2 092 | 27,8 | 39,5 | В27,5 |
| 4 | 313 | 830 | – | 1155 | 1,9 | 184 | | 2 484 | 2 384 | 27,9 | 40,2 | В27,5 |
| 5 | 510 | 560 | 840 | – | 3,1 | 180 | | 2 130 | 2 058 | 37,4 | 53,9 | В40 |
| 6 | 510 | 542 | – | 1294 | 3,1 | 170 | | 2 516 | 2 450 | 38,5 | 55,4 | В40 |

В работе [31] показано, что БЗГ характеризуется относительно равномерным распределением пор по всему его объему. Наличие пористой структуры на поверхности гравия позволяет цементному тесту проникать вглубь зерна заполнителя, что дополнительно обеспечивает большее его сцепление с цементным раствором бетона. Таким образом, установлено, что высокопрочный БЗГ, полученный с учетом разработанных нами рекомендаций, может быть использован для получения бетонов класса прочности до В40 пониженной плотности.

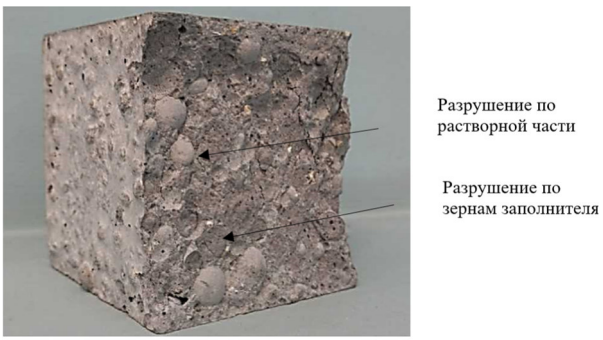



Рис. 5. Фрагмент бетона на БЗГ после испытания на сжатие

**Выводы**

1. Показана возможность получения из золы-уноса Рефтинской ГРЭС БЗГ для конструкционных бетонов. Наибольший выход прочных зольных гранул сферической формы и кондиционной фракции 5-20 мм получены при влажности 25–26 % от массы смеси. Для ускорения твердения и повышения прочности БЗГ рекомендуется применять пропаривание по режиму: 3 ч – подъем температуры, 6 ч – изотермическая выдержка при температуре 80-90 °С и 3 ч – охлаждение.

2. Физико-химическими исследованиями показано, что добавка доменного гранулированного шлака в количестве 20 % способствует образованию в золоцементном камне дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция, представленных кристаллогидратами тоберморита 14 Å и пломбьерита, что способствует увеличению плотность и прочности на сжатие БЗГ.

3. Разработан компонентный состав высокопрочного безобжигового зольного гравия, содержащий золу-уноса Рефтинской ГРЭС, портландцемент, шлак доменный гранулированный и сульфат натрия, определены физико-механические свойства заполнителя. Безобжиговый зольный гравий имеет марку по насыпной плотности М1000, прочности – П350, морозостойкость F50. Подобраны составы и определены свойства конструкционных бетонов класса прочности от В20 до В40 с использованием в качестве крупного заполнителя высокопрочного БЗГ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Национальное информационное агентство «Экология». [Электронный ресурс]. URL: https://nia.eco/2025/07/10/105770/ (дата обращения 10.01.2026).

2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. [Электронный ресурс]. URL: https://gge.ru/press-center/news/kak-prevratit-zolu-v-dorogi/ (дата обращения 10.01.2026).

3. Баженов Ю.М., Гладких К.В., Данилович И.Ю. Безобжиговый зольный гравий – новый эффективный заполнитель для бетонов // Строительные материалы. 1980. № 8. С.19–20.

4. Баженов Ю.М., Гладких К.В. Бетоны на искусственных безобжиговых заполнителях. М.: Высшая школа, 1982. 58 с.

5. Ицкович С.М., Ицкович Л.Д., Баженов Ю.М. Технология заполнителей М.: Высшая школа, 1991. 272 с.

6. Kim D., Song H., Yu J., Sim S., Jeon D., Oh J.E. Development of lightweight and low-crystalline artificial aggregate using cementless fly ash binder for thermal neutron shielding concrete manufacture // Cement and Concrete Composites. Vol 152. 2024. Pp. 1–14. 10.1016/j.cemconcomp.2024.105674

7. Sousa Campelo T, Zimmer A., Saulo R.B., Evaluation and improvement of a nonexpansive clay for the production of lightweight aggregates using glass waste and silicon carbide // Construction and Building Materials. Vol 439. 2024. Pp. 1–10 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137428

8. Islam Md.**S.,** Gulshan A., Akhtar U.S., Mostafa Md G., Haque I., Shuva Z.M., Samad A. Development of lightweight structural concrete with artificial aggregate manufactured from local clay and solid waste materials // Heliyon. Vol 10. Issue 15. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34887

9. Drouna K., Ali Boucetta T., Maherzi W., Ayat A. Enhancing the properties of expanded *clay aggregates* through cementitious coatings based on waste glass powder and granulated slag: Impact on lightweight self-compacting concrete performance. // Construction and Building Materials. Vol 485. 2025. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141896

10. Xue-Fei C., Xiu-Cheng Z., Peng Y., Multi-Scale Investigation of Fly Ash Aggregates (FAAs) in Concrete: From Macroscopic Physical-Mechanical Properties to Microscopic Structure of Hydration Products // Materials. 2025. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/ma18112651

11. Shakeri A.A., Bonyadi M., Diznab M. Ali D., Dardaei S., Tehrani F.M. Assessment of mitigating the mechanical defects of internally cured concrete using mineral-enriched lightweight expanded clay aggregate // Construction and Building Materials. Vol 514. 2026. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.145606

12. Li J., Bai S., Guan X. Effect of preparation process on the properties and microstructure of fly ash and metakaolin-based geopolymer aggregates // Construction and Building Materials. Vol. 514. 2026. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.145594

13. Bui P.T., Nguyen C.H., Tran T.L., Phan Q. H., Nguyen Q. Effects of types and replacement levels of artificial fly ash aggregate on physical-mechanical properties, clogging resistance, and microstructure of pervious concrete // Results in Engineering. Vol 29. 2026. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.109188

14. Chowdary L., Boddepalli K.R. Synergistic effects of fly *ash* based artificial *concrete aggregate* and silica fume on the multi-scale behaviour and performance of self-compacting *concrete* // Case Studies in Construction Materials. Vol 24. 2026. DOI: 10.1016/j.cscm.2026.e05828

15. Состав для получения безобжигового зольного гравия: пат. №2482081 Рос. Федерация : МПК С04В 18/10 / Капустин Ф.Л., Рыжкова И.В., Тарабухина О.Г., Уфимцев В.М.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». 2011138610/03; завл. 20.09.2011; опубл.20.05.2013.

16. Элинзон М.П. Производство искусственных пористых заполнителей М.: Стройиздат, 1974. 250 с.

17. Руководство по подбору составов конструктивных легких бетонов на пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1975. 61 с.

18. ТУ 0799-001-99126491-2013. Шлак доменный гранулированный молотый. Технические условия. Введ. в дейст. 01.10.2013. Челябинск: ООО «Мечел-Материалы», 2013. 43 с.

19. Капустин Ф.Л., Рыжкова И.В. Влияние химических добавок на прочность безобжигового зольного гравия для бетонов // Сб. научных трудов XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. Ч. 4. С. 210–211.

20. Капустин Ф.Л., Рыжкова И.В. Влияние состава смешанного вяжущего на свойства безобжигового зольного гравия // Сб. научных трудов Инновации в материаловедении и металлургии :материалы I Международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург: Уральский университет, 2012. Ч. 1. С.186–190.

21. Рамачандран В.С. Добавки в бетон // Справ. пособие М. : Стройиздат, 1988. 575 с.

22. Kapustin F.L., Balueva T.S., Influence of blast furnace slag type on physical and mechanical properties of Portland cement // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/966/ 1/012024

23. Иванов С.В. Особенности структурообразования и свойств бетонов на основе искусственного безобжигового зольного гравия из тонкозернистых материалов. Москва, 1984. 216 с.

24. Рыжков Ф.Н. Гранулированные безобжиговый заполнитель для крупнопористого бетона // Труды НГАСУ, Т.5. №2, 2002. С.88–91.

25. Государственный доклад о состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2020. Режим доступа. URL: https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126 (дата обращения 01.12.2025).

26. Петров В.П. Пористые заполнители из отходов промышленности: монография. СГАСУ. Самара, 2005. 152 с.

27. Волженский А.В., Гладких К.В., Юдина А.М. Безобжиговые искусственные заполнители для легких бетонов // Строительные материал, 1970. № 7. С. 80–81.

28. Мичкарева В.И., Спектор М.Д., Крайзер А.А. Пористые безобжиговые заполнители для легкого бетона из пылевидных зол ТЭС // Строительные материалы, 1964. № 11. С. 34–35.

29. Капустин Ф.Л., Фомина И.В. Влияние минеральной добавки на гидратацию и твердение золоцементного камня в условиях тепловлажностной обработки // Вестник БГТУ им. ВГ Шухова. 2024. №. 7. Pp. 88–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-88-97

30. Коренева И.Г. Конструкционные свойства бетона на безобжиговом зольном гравии при простом и сложном напряженном состоянии. Москва, 1984. 163 с.

31. Kapustin F.L., Kokorina D.V., Fomina I.V. Composition and Properties of Non-Fired Fly Ash Gravel and Concrete on its Basis // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Vol. 481. 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012050

*Информация об авторах*

**Фомина Ирина Викторовна,** кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры материаловедения в строительстве. E-mail: irina.fomina@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**Капустин Фёдор Леонидович,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения в строительстве. E-mail: f.l.kapustin@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

*Поступила 10.03.2026 г.*

© Фомина И.В., Капустин Ф.Л., 2026

***Fomina I.V., Kapustin F.L.***

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin*

**E-mail: irina.fomina@urfu.ru*

## NON-FIRED FLY ASH GRAVEL FOR CONSTRUCTIONAL CONCRETE

***Abstract.*** *Given modern energy efficiency requirements for buildings and structures, managers are using lightweight and lightweight concrete load-bearing structures with porous aggregates that offer high strength and durability during construction. Therefore, the scientific and technical justification for producing high-strength, unfired fly ash gravel based on low-cement fly ash compositions, modified chemicals, and mineral developments is relevant. The possibility of obtaining coarse aggregate for constructional concrete using fly ash from the Reftinskaya State District Power Plant is presented. A composition of high-strength non-fired fly ash gravel has been developed, containing granulated blast-furnace slag as a mineral additive and sodium sulfate as a chemical additive, which accelerates the hardening of fly ash cement aggregate*

*The effect of granulated blast-furnace slag as a mineral additive in increasing the strength of artificial aggregate has been studied. The results of studies of the physical and mechanical properties of unfired fly ash gravel with a density grade of M1000 are presented. In order to establish the mechanism for increasing the strength of the filler, the composition and structure of hydrated formations of gold cement stone were determined using X-ray phase analysis and IR spectroscopy. It has been shown that the use of a mineral additive in ash-cement stone reduces the overall porosity and improves the structure of unfired fly ash gravel, significantly reducing the volume of micropores by filling them with hydration products. Using the resulting unfired fly ash gravel, compositions were selected and the physical and mechanical properties of structural concretes of strength classes B20 to B40 were determined. It was shown that concrete made with unfired fly ash gravel, compared to granite crushed stone, with the same cement consumption, has a density 19 % lower.*

***Keywords:*** *fly ash, non-fired fly ash gravel, strength, constructional concrete.*

**REFERENCES**

1. National Information Agency «Ecology». [Natsionalnoe informatsionnoe agentstvo «Ekologiya»]. [Electronic resource]. URL: https://nia.eco/2025/07/10/105770/ (date of access 10.01.2026).

2. Energy Strategy of the Russian Federation through 2035. [Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda]. [Electronic resource]. URL: https://gge.ru/press-center/news/kak-prevratit-zolu-v-dorogi/ (date of access 10.01.2026).

3. Bazhenov Yu.M., Gladkikh K.V., Danilovich I.Yu. Non-fired fly ash gravel – a new effective aggregate for concrete [Bezobzhigovyy zolnyy graviy – novyy effektivnyy zapolnitel dlya betonov]. Construction Materials, 1980. No 8. Pp. 19–20. (rus)

4. Bazhenov Yu.M., Gladkikh K.V., Concrete on artificial non-fired aggregates. [Betony na iskusstvennykh bezobzhigovykh zapolnitelyakh]. M.: Graduate School, 1982. 58 p. (rus)

5. Itskovich S.M., Itskovich L.D., Bazhenov Yu.M. Aggregate technology [Tekhnologiya zapolniteley] M.: Graduate School, 1991. 272 p. (rus)

6. Dohoon K., Haemin S., Juan Y., Sungwon S., Dongho J., Oh J. E. Development of lightweight and low-crystalline artificial aggregate using cementless fly ash binder for thermal neutron shielding concrete manufacture. Cement and Concrete Composites. Vol 152. 2024. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105674

7. de Sousa Campelo, Themistocles, Zimmer, André, S.R. Roca Bragança, Evaluation and improvement of a nonexpansive clay for the production of lightweight aggregates using glass waste and silicon carbide. Construction and Building Materials. Vol 439. 2024. Pp. 1–10 DOI: 10.1016/ j.conbuildmat.2024.137428

8. Islam Md.S., Gulshan A., Akhtar U.S., Mostafa Md G., Haque I., Shuva Z.M., Samad A. Development of lightweight structural concrete with artificial aggregate manufactured from local clay and solid waste materials. Heliyon. Vol 10. Issue 15. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34887

9. Drouna K., Ali Boucetta T., Maherzi W., Ayat A., Enhancing the properties of expanded *clay aggregates* through cementitious coatings based on waste glass powder and granulated slag: Impact on lightweight self-compacting concrete performance. Construction and Building Materials. Vol 485. 2025. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141896

10. Chen, Xue-Fei, Zhang, Xiu-Cheng, Peng, Ying, Multi-Scale Investigation of Fly Ash Aggregates (FAAs) in Concrete: From Macroscopic Physical-Mechanical Properties to Microscopic Structure of Hydration Products. Materials. 2025. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/ma18112651

11. Shakeri A.A., Bonyadi M., Diznab M. Ali D., Dardaei S., Tehrani F.M. Assessment of mitigating the mechanical defects of internally cured concrete using mineral-enriched lightweight expanded clay aggregate. Construction and Building Materials. Vol 514. 2026. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/ j.conbuildmat.2026.145606

12. Li J., Bai S., Guan X. Effect of preparation process on the properties and microstructure of fly ash and metakaolin-based geopolymer aggregates. Construction and Building Materials. Vol 514. 2026. Pp. 1–13. DOI: j.conbuildmat.2026.145594

13. Bui P.T., Nguyen C.H., Tran T.L., Phan Q. H., Nguyen Q. Effects of types and replacement levels of artificial fly ash aggregate on physical-mechanical properties, clogging resistance, and microstructure of pervious concrete. Results in Engineering. Vol 29. 2026. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/ j.rineng.2026.109188

14. Chowdary L., Boddepalli K.R. Synergistic effects of fly *ash* based artificial *concrete aggregate* and silica fume on the multi-scale behaviour and performance of self-compacting *concrete.* Case Studies in Construction Materials. Vol 24. 2026. DOI: 10.1016/ j.cscm.2026.e05828

15. Composition for producing non-fired fly ash gravel [Sostav dlya polucheniya bezobzhigovogo zolnogo graviya]: patent No 2482081 Russian Federation: International Patent Classification C04B 18/10 / Kapustin F.L., Ryzhkova I.V., Tarabukhina O.G., Ufimtsev V.M.; assignee Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin». 2011138610/03; stated. 20.09.2011; published.20.05.2013. (rus)

16. Elinzon M.P., Artificial porous aggregate production [Proizvodstvo iskusstvennykh poristykh zapolniteley]. M.: Stroyizdat, 1974. 250 p. (rus)

17. Guide to the selection of compositions of structural lightweight concrete on porous aggregates. [Rukovodstvo po podboru sostavov konstruktivnykh legkikh betonov na poristykh zapolnitelyakh]. M.: Stroyizdat, 1975. 61 p. (rus)

18. TU 0799-001-99126491-2013. Granulated ground blast furnace slag [Shlak domennyy granulirovannyy molotyy]. Specifications. Put into effect. 01.10.2013. Chelyabinsk: OOO «Mechel-Materials», 2013. 43 p. (rus)

19. Kapustin F.L., Ryzhkova I.V. The influence of chemical additives on the strength of non-fired fly ash gravel for concrete [Vliyanie khimicheskikh dobavok na prochnost bezobzhigovogo zolnogo graviya dlya betonov] Collection of scientific papers of the XVI Ural International Conference of Young

Scientists on Priority Areas of Science and Technology Development. Ekaterinburg: USTU-UPI Publishing House, 2009. Part 4. Pp. 210–211. (rus)

20. Kapustin F.L., Ryzhkova I.V. The influence of the composition of mixed binder on the properties of non-fired fly ash gravel [Vliyanie sostava smeshannogo vyazhushchego na svoystva bezobzhigovogo zolnogo graviya] Collection of scientific papers Innovations in Materials Science and Metallurgy: Proceedings of the 1st International Interactive Scientific and Practical Conference. Ekaterinburg: Ural University, 2012. Part 1. Pp. 186–190. (rus)

21. Ramachandran V.S. Concrete additives [Dobavki v beton]. M.: Stroyizdat, 1988. 575 p. (rus)

22. Kapustin F.L., Balueva T.S., Influence of blast furnace slag type on physical and mechanical properties of Portland cement. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/ 012024

23. Ivanov S.V. Features of structure formation and properties of concrete based on artificial non-fired ash gravel from fine-grained materials [Osobennosti strukturoobrazovaniya i svoystv betonov na osnove iskusstvennogo bezobzhigovogo zolnogo graviya iz tonkozernistykh materialov]. Moscow, 1984. 216 p. (rus)

24. Ryzhkov F.N. Granulated unfired aggregate for large-pore concrete [Granulirovannye bezobzhigovyi zapolnitel dlia krupnoporistogo betona]. Works of NGASU. 2002. Vol.5. No 2. Pp. 88–91. (rus)

25. State report on the state of the environment in the Sverdlovsk region in 2020 [Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy na territorii Sverdlovskoy oblasti v 2020] Access mode. – URL: https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126 (rus)

26. Petrov V.P. Porous fillers from industrial waste [Poristye zapolniteli iz otkhodov promyshlennosti] monograph. SGASU. Samara, 2005. 152 p. (rus)

27. Volzhenskiy A.V., Gladkikh K.V., Yudina A.M. Non-fired artificial aggregates for lightweight concrete [Bezobzhigovye iskusstvennye zapolniteli dlya legkikh betonov]. Construction Materials. 1970. No 7. Pp. 80–81. (rus)

28. Michkareva V.I., Spektor M.D., Krayzer A.A. Porous non-fired aggregates for lightweight concrete from thermal power plant ash [Poristye bezobzhigovye zapolniteli dlya legkogo betona iz pylevidnykh zol TES]. Construction Materials. 1964. No 11. Pp. 34–35. (rus)

29. Kapustin F.L., Fomina I.V. The influence of mineral additives on hydration and hardening of gold cement stone under conditions of heat and humidity treatment [Vliyanie mineralnoy dobavki na gidratatsiyu i tverdenie zolotsementnogo kamnya v usloviyakh teplovlazhnostnoy obrabotki] Bulletin of BSTU named after VG Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 88–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-88-97 (rus)

30. Koreneva I.G. Structural properties of concrete on non-fired fly ash gravel under simple and complex stress conditions [Konstruktsionnye svoystva betona na bezobzhigovom zolnom gravii pri prostom i slozhnom napryazhennom sostoyanii], Moscow, 1984. 163 p. (rus)

31. Kapustin F.L., Kokorina D.V., Fomina I.V. Composition and Properties of Non-Fired Fly Ash Gravel and Concrete on its Basis. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Vol. 481. 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012050

*Information about the author*

**Kapustin, Fedor L**. Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Materials science in construction. E-mail: f.l.kapustin@urfu.ru. Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

**Fomina, Irina V**. Candidate of Technical Sciences, senior lecturer at the Department of Materials Science in construction.E-mail: irina.fomina@urfu.ru. Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

*Received 10.03.2026*

**Для цитирования:**
Фомина И.В., Капустин Ф.Л. Безобжиговый зольный гравий для конструкционных бетонов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 92–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-92-103

**For citation:**
Fomina I.V., Kapustin F.L. Non-fired fly ash gravel for constructional concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 92–103. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-92-103