

Оценка возможности и эффективности использования  
терриконигов Кизеловского угольного бассейна в качестве  
минеральной добавки в цементных системах

Андрей Алексеевич Талейко, Степан Васильевич Леонтьев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

**Введение.** Применение минеральных добавок (МД) для цемента и материалов, изготавливаемых на цементной основе, позволяет не только придавать им специальные свойства, но и увеличивает объемы их производства и использования, а также решает вопросы утилизации отходов промышленности. Так, в Пермском крае на территории Кизеловского угольного бассейна не решенной остается проблема ликвидации большого количества отходов угледобычи (терриконигов). Цель исследования — оценить возможность и эффективность применения терриконигов в качестве МД в цементных системах.

**Материалы и методы.** Использовался портландцемент типа ЦЕМ I, перегоревший терриконик («красный» терриконик), негорелый терриконик («черный» терриконик), а также монофракционный кварцевый песок. Термоактивация «черного» терриконика проводилась при 700 °С в муфельной печи в течение двух часов. Химический состав терриконигов определялся флуоресцентным рентгеноспектральным методом, минералогический состав — методом экспрессного рентгенографического количественного фазового анализа, термический анализ — методом синхронного ДСК/ТГ анализа. Пределы прочности при изгибе и сжатии цементного камня определялись по ГОСТ 310.4–81.

**Результаты.** Результаты химического и минералогического анализа показали, что «красный» терриконик состоит в основном из кварца (65,9 %), что может указывать на его пуццоланическую активность, а «черный» терриконик состоит главным образом из каолинита (41 %) и кварца (28,3 %). Наличие каолинита свидетельствует о возможности получения из данного материала активной минеральной добавки — метакаолинита. Результаты определения пределов прочности при изгибе и сжатии образцов показали, что замена 10–30 % цемента «красным» терриконигом практически не снижает прочности раствора, а при замене 20 % цемента «черным» терриконигом прочность на сжатие увеличивается на 21 %.

**Выводы.** Результаты химического, минералогического и термического анализа терриконигов показали возможность их применения в качестве МД в цементах и цементных системах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** отходы угледобычи, терриконики, Кизеловский угольный бассейн, горелый терриконик, минеральная добавка, метакаолинит, термоактивация

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Талейко А.А., Леонтьев С.В. Оценка возможности и эффективности использования терриконигов Кизеловского угольного бассейна в качестве минеральной добавки в цементных системах // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 920–931. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.920-931

Автор, ответственный за переписку: Андрей Алексеевич Талейко, taleyko.99@mail.ru.

Estimation of possibility and efficiency of using coal gangue from  
Kizel coal basin as a mineral additive in cement systems

Andrei A. Taleiko, Stepan V. Leontev

Perm National Research Polytechnic University (PNRPU); Perm, Russian Federation

ABSTRACT

**Introduction.** The use of mineral additives (MA) for cements and cement-based materials allows not only to give them special properties, but also increases the volume of their production and use, as well as solves the issues of industrial waste utilization. For example, in Perm Krai in the territory of the Kizel coal basin the problem of liquidation of a large amount of coal mining waste (coal gangue) remains unsolved. The aim of the research is to evaluate the possibility and efficiency of using coal gangue as mineral additives in cement systems.

**Materials and methods.** Portland cement CEM I, self-ignited coal gangue, not ignited coal gangue and also uniform quartz sand were used as raw materials. Not ignited coal gangue was thermal activated at the temperature of 700 °C in muffle furnace during 2 hours. Chemical composition of coal gangue was determined by the fluorescent X-ray spectral method and mineral composition by the method of rapid radiographic quantitative phase analysis. Thermal analysis was conducted by synchronous DSC/TG analysis method. Flexural and compressive strength of cement mortar were determined according to GOST 310.4–81 method.

**Results.** According to the results of chemical and mineral analysis it was obtained that self-ignited coal gangue is mainly consisted of quartz (65.9 %) that may indicate pozzolanic properties. Whereas not ignited coal gangue mainly consists of kaolinite (41 %)

and quartz (28.3 %). The presence of kaolinite, which was also confirmed by endothermic effect on the thermogram, enables to produce active mineral admixture — metakaolinite by thermal activation. It was obtained that flexural and compressive strength of mortar with 10–30 % cement replacement by self-ignited coal gangue is not reduced. Whereas compressive strength of specimens with 20 % cement replacement by thermal activated not ignited coal gangue is increased by 21 %.

**Conclusions.** The possibility of utilization of Kizel coal gangue as supplementary cementitious material was established by chemical, mineral and thermal analyses.

**KEYWORDS:** wastes of coal mining, coal gangue, Kizel coal basin, self-ignited coal gangue, supplementary cementitious material, metakaolinite, thermal activation

**FOR CITATION:** Taleiko A.A., Leontev S.V. Estimation of possibility and efficiency of using coal gangue from Kizel coal basin as a mineral additive in cement systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(6):920-931. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.920-931 (rus.).

*Corresponding author:* Andrei A. Taleiko, taleiko.99@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

С увеличением численности населения мира, урбанизацией и повышением объемов строительства возрастает потребность в строительных материалах и изделиях.

Одними из самых востребованных строительных материалов являются портландцемент и композиты, изготовленные на его основе. Вместе с этим растет количество выбросов пыли и углекислого газа в атмосферу. Уже сегодня на цементную промышленность приходится до 8 % мировых выбросов углекислого газа [1]. Для увеличения объемов производства портландцемента, а также решения усугубляющейся экологической проблемы, связанной с производством данного вида вяжущего, используются различные методы и подходы. Один из наиболее распространенных и эффективных методов — применение минеральных добавок (МД) [2], которые вводятся в цемент, или материалы на его основе, например, растворы и бетоны с целью замены части вяжущего или для придания материалу специальных свойств. В качестве МД используются различные материалы природного и техногенного происхождения. Применение техногенных материалов также помогает решать другую немаловажную экологическую проблему, связанную с рациональной утилизацией промышленных отходов, в том числе и тех, которые долгие годы скапливаются в отвалах. Техногенные отходы, применение которых в производстве строительных материалов активно изучается, — это отходы угледобычи. К возможным областям использования отходов угледобычи в производстве строительных материалов и изделий относят получение заполнителей плотных и искусственных пористых, минеральных добавок для цементов и бетонов, портландцементного клинкера, геополимерных вяжущих и др. [3]. Однако отходы угледобычи каждого конкретного угольного бассейна или даже шахты требуют отдельной оценки для выявления пригодности их использования в производстве строительных материалов.

В Пермском крае на территории Кизеловского угольного бассейна расположены значительные запасы терриконигов — отвалов, состоящих из отходов угледобычи. Объем этих запасов оценивается

в 13 млн м<sup>3</sup>, из которых порядка 4,4 млн м<sup>3</sup> составляют перегоревшие («красные») терриконики [4]. Вопросам применения кизеловских терриконигов в качестве сырья для производства строительных материалов посвящено немало исследований. Так, учеными была изучена возможность получения керамических строительных материалов на основе «черных» (негорелых) и «красных» терриконигов [5–7]. Дана оценка возможности получения низкомарочных вяжущих веществ на основе данных материалов с низким содержанием портландцемента или без него [8]. Исследования по применению кизеловских терриконигов в качестве мелкого и крупного заполнителя для бетонов не дали положительных результатов [4]. Одним из перспективных направлений исследований в рассматриваемой области является изучение возможности использования терриконигов как МД для цементов и композиционных материалов, получаемых на его основе.

Имеются результаты исследований по вопросам применения отходов угледобычи в качестве МД для цементов и цементных систем. Так, использование «черных» терриконигов в исходном виде отмечается нецелесообразным, поэтому этот материал требует активации перед применением. Показано [9], что наиболее эффективный способ активации «черных» терриконигов — это тонкий помол с последующим обжигом при температуре 500–800 °С. Авторы работы [10] установили, что наилучшие результаты по прочности на сжатие цементного раствора дает добавка терриконика, обожженного при 700 °С при выдержке в течение 1 ч при данной температуре. Введение в смесь обожженного при 850 °С в течение двух часов «черного» терриконика с содержанием 51 % каолинита способствовало приросту прочности цементного камня (ЦК) по сравнению с образцами, модифицированными добавкой молотого кварцевого песка [11]. Авторы также выяснили, что данный эффект обусловлен взаимодействием активных SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с Ca(OH)<sub>2</sub> с образованием C-S-H и C-A-H геля, а также реакцией активного Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с Ca(OH)<sub>2</sub> и CaSO<sub>4</sub> с формированием Aft-фазы. Активность обожженных терриконигов с содержанием каолинита обусловлена трансформацией последнего

при температуре 500 °С в метакаолинит путем дегидратации с разрушением слоевой кристаллической структуры и деполимеризации силикатов [12].

Применение перегоревших террикоников различного происхождения в цементных материалах также широко исследуется. Так, автор публикации [13] получил мелкозернистый цементный бетон марки М200, М250 с заменой 30 % цемента тонкомолотым до удельной поверхности 7500–8000 см²/г «красным» террикоником. Также была отмечена архитектурная выразительность этого материала за счет придания ему розового оттенка. При замене цемента в растворе горелым террикоником в объеме 10 и 20 % незначительно снижается прочность на сжатие, а при использовании метода твердения в среде углекислого газа даже возрастает в более поздние сроки [14]. При этом отмечается более низкая проницаемость ионов хлора в материале с добавкой терриконика. Более подробный обзор исследований в области применения отходов угледобычи в технологии вяжущих материалов дан авторами настоящей работы в статье [15].

Тем не менее, несмотря на достаточно большое количество исследований в области использования террикоников в качестве МД, терриконики каждого конкретного угольного месторождения обладают своим уникальным составом, что требует проведения более углубленного и тщательного изучения

на предмет возможности их применения в производстве строительных материалов и изделий.

Цель настоящего исследования — оценка возможности и эффективности использования террикоников Кизеловского угольного бассейна в качестве минеральной добавки для производства портландцемента и композиционных вяжущих веществ на их основе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными материалами стали: портландцемент типа ЦЕМ I 32,5 Н производства Горнозаводскцемент; «красный» терриконик из отвала п. Шахта Пермского края и «черный» терриконик из отвала п. Шумихинский. Гранулометрический состав отобранных проб террикоников представлен в табл. 1. В исследовании использовалась фракция 0–5 мм. В качестве мелкого заполнителя для приготовления раствора использовался монофракционный кварцевый песок фракции 0,5–1,0 мм. Применялась вода водопроводная.

В целях активации терриконики подвергались тонкому измельчению мелющими телами в фарфоровом барабане до фракции <0,08 мм. Порошок «черного» терриконика подвергался обжигу в лабораторной муфельной печи при температуре 700 °С с выдержкой при данной температуре в течение двух часов. Скорость подъема температуры

Табл. 1. Гранулометрический состав проб террикоников

Table 1. Grain-size composition of coal gangue

| «Красный» терриконик<br>Self-ignited coal gangue |    |    |     |      |      |       |      |       |
|--------------------------------------------------|----|----|-----|------|------|-------|------|-------|
| Номер сита / Sieve Number                        | 10 | 5  | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,16 | <0,16 |
| Частный остаток, %<br>Partial sieve residue, %   | 17 | 16 | 11  | 14   | 8    | 9     | 8    | 16    |
| Полный остаток, %<br>Full sieve residue, %       | 17 | 33 | 44  | 58   | 67   | 76    | 84   | 100   |
| «Черный» терриконик<br>Not ignited coal gangue   |    |    |     |      |      |       |      |       |
| Частный остаток, %<br>Partial sieve residue, %   | 17 | 18 | 12  | 19   | 13   | 10    | 5    | 5     |
| Полный остаток, %<br>Full sieve residue, %       | 17 | 36 | 47  | 67   | 80   | 90    | 95   | 100   |

Табл. 2. Химический состав террикоников

Table 2. Chemical composition of coal gangue

| Материал<br>Material                                   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | CaO  | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MgO  | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cl   | MnO  | п.п.п. / р.р.р.<br>LOI |
|--------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------|------------------|------------------|------|-------------------|-------------------------------|------|------|------------------------|
| «Красный»<br>терриконик<br>Self-ignited<br>coal gangue | 47,17            | 18,22                          | 11,97                          | 9,20            | 3,23 | 2,34             | 1,45             | 0,75 | 0,13              | 0,07                          | 0,03 | 0,02 | 5,14                   |
| «Черный»<br>терриконик<br>Not ignited<br>coal gangue   | 28,15            | 15,11                          | 13,16                          | 4,18            | 0,41 | 1,77             | 1,46             | 0,40 | 0,05              | 0,11                          | 0,09 | 0,01 | 31,4–34,9              |

Табл. 3. Минералогический состав терриконигов

Table 3. Mineralogical composition of coal gangue

| Минерал / Mineral                           | «Красный» терриконик<br>Self-ignited coal gangue | «Черный» терриконик<br>Not ignited coal gangue |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Кварц / Quartz                              | 65,9                                             | 28,3                                           |
| Калиевые полевые шпаты / Potassium Feldspar | 2,2                                              | 5,6                                            |
| Плагиоклазы / Plagioclases                  | 4,1                                              | 6                                              |
| Слюды / Micas                               | 4,5                                              | 8,6                                            |
| Бассанит / Bassanite                        | 4,8                                              | –                                              |
| Гипс / Gypsum                               | 3,4                                              | 1,5                                            |
| Ангидрит / Anhydride                        | 0,3                                              | 1,4                                            |
| Кальцит / Calcite                           | 5,9                                              | –                                              |
| Доломит / Dolomite                          | 0,5                                              | –                                              |
| Гематит / Hematite                          | 8,4                                              | 2,6                                            |
| Магнетит / Magnetite                        | –                                                | 2,5                                            |
| Каолинит / Kaolinite                        | –                                                | 41,3                                           |
| Ярозит / Jarosite                           | –                                                | 2,2                                            |

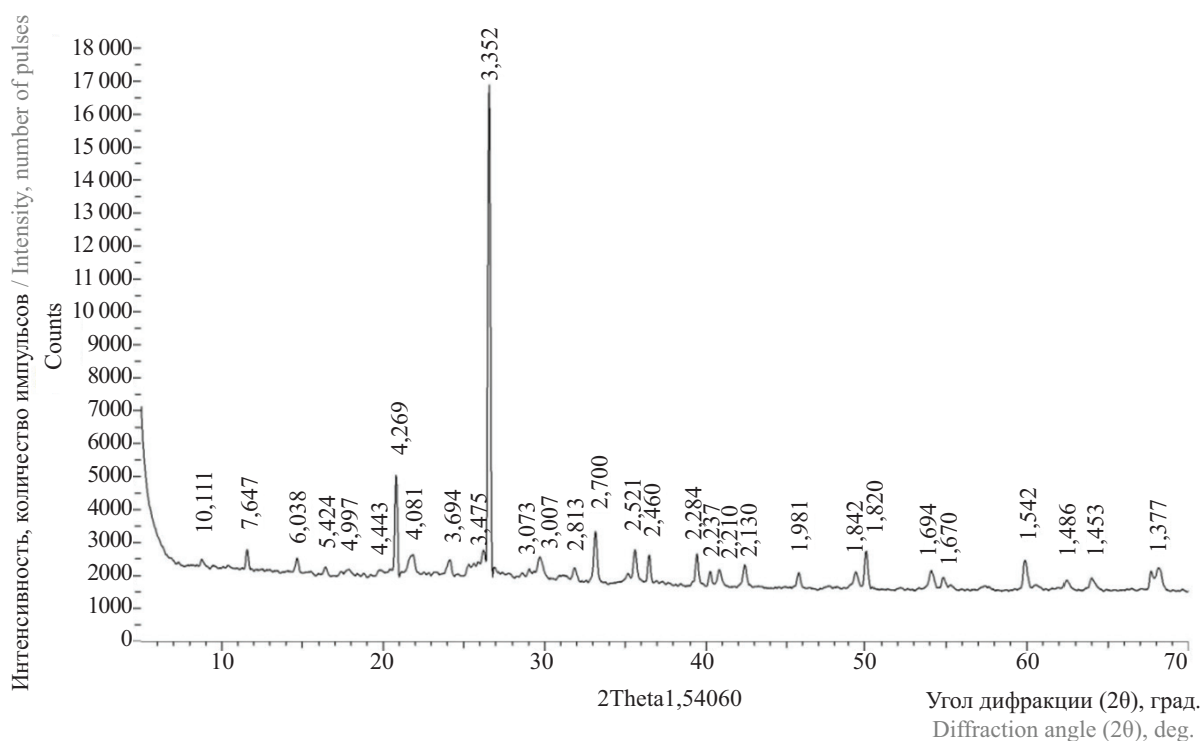
составляла 5 °С/мин. Режим термической активации «черного» терриконика был выбран опытным путем с учетом литературных данных.

Для оценки применимости терриконигов в качестве МД к цементу и цементным материалам проведен химический, минералогический, а также термический анализы. Химический состав терриконигов определялся флуоресцентным рентгеноспектральным методом, минералогический состав — методом экспрессного рентгенографического количественно-

го фазового анализа. Результаты анализа химического и минералогического составов терриконика приведены в табл. 2, 3.

Дифрактограммы проб «красного» и «черного» терриконика представлены на рис. 1. Термический анализ терриконигов выполнялся методом синхронного ДСК/ТГ анализа.

Для оценки физико-механических характеристик материала, полученного с использованием терриконика в качестве МД, и эффективности его



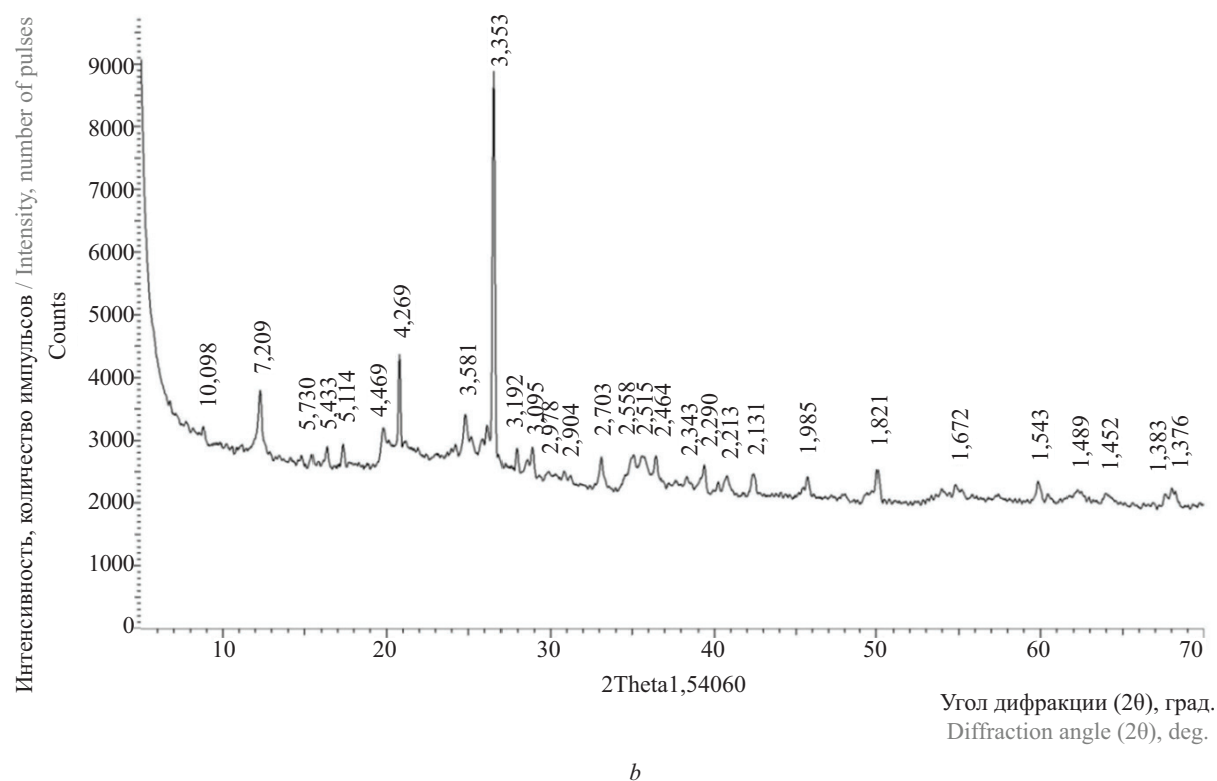


Рис. 1. Дифрактограмма пробы «красного» терриконика (а); «черного» терриконика (b)

Fig. 1. Diffraction pattern of self-ignited coal gangue (a); of not ignited coal gangue (b)

применения в составе вяжущего или композита изготовили образцы ЦК, в которых часть цемента (10, 20 и 30 %) заменялась тонкомолотым террикоником. Контрольный состав раствора без добавления терриконика изготавливался из растворной смеси нормальной консистенции по ГОСТ 310.4–81 при В/Ц = 0,4. Отношение количества воды к сумме цемента и добавки терриконика сохранялось для всех составов на уровне 0,4.

Формование образцов-призм размерами 40 × 40 × 160 мм производилось на лабораторной виброплощадке. Образцы твердели в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 310.4–81. Для определения пределов прочности при изгибе и сжатии в возрасте 28 сут образцы испытывались на изгиб на приборе МИИ-100, а также на сжатие на гидравлическом прессе ПГМ-1000МГ4.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам химического и минералогического анализа определено, что «красный» терриконик представляет собой алюмосиликатный материал, преимущественно состоящий из кварца с включением до 9 % сульфатных соединений и до 5 % несгоревшего угля. Наличие в составе кварца может указывать на возможную пуццоланическую активность «красного» терриконика. В работах [16, 17] отмечена пуццоланическая актив-

ность перегоревших пород терриконов со схожим составом.

«Черный» терриконик состоит преимущественно из каолинита (до 41 %) и кварца (до 28 %) со значительным включением угля (потери при прокаливании составили от 31 до 34 %). Наличие каолинита позволяет использовать данный материал для получения путем обжига при температурах 500–800 °С метаксаолинита [9], который, как известно [18], обладает высокой пуццоланической активностью.

Также, для того чтобы оценить пригодность исследуемых терриконов для использования их в качестве МД для цементных материалов, проведено сравнение их химических составов с составами, опубликованными в современной научной литературе. Для этого составы «красных» и «черных» терриконов были нанесены на тройную диаграмму SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO (рис. 2).

В результате можно видеть близость расположения точек, характеризующих состав исследуемых терриконов, и точек, отражающих состав терриконов из указанных работ, в которых была показана возможность использования данных материалов в качестве МД в цементных системах.

По результатам проведенного термического анализа выяснено, что на дериватограмме образца «красного» терриконика (рис. 3, а) присутствует эндотермический эффект в районе 150 °С, что можно связать с процессом дегидратации двухводного гипса



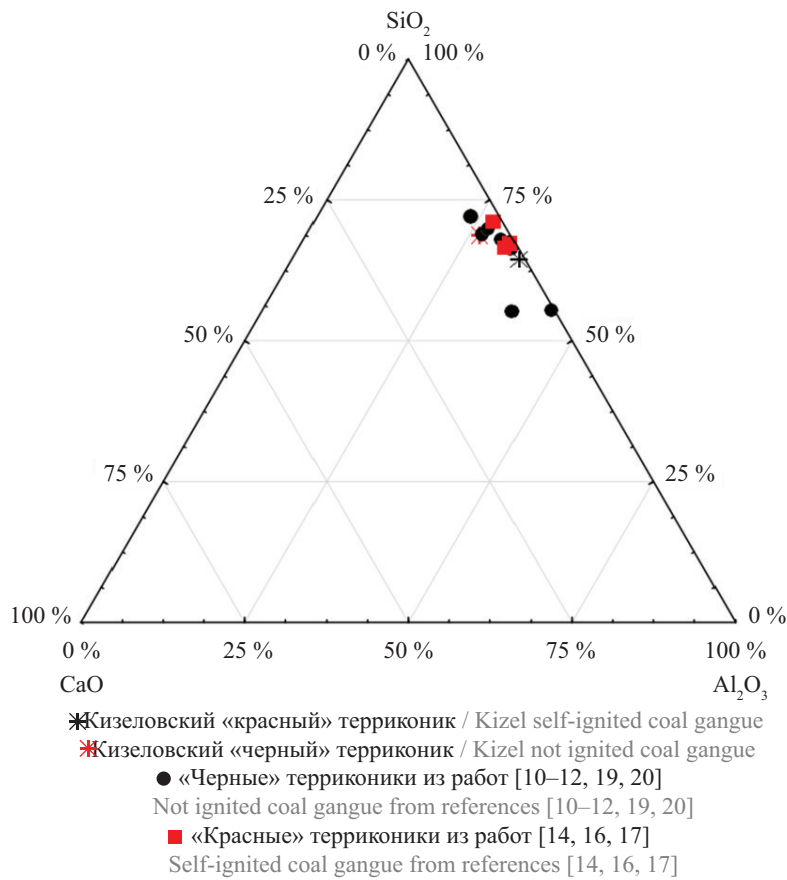
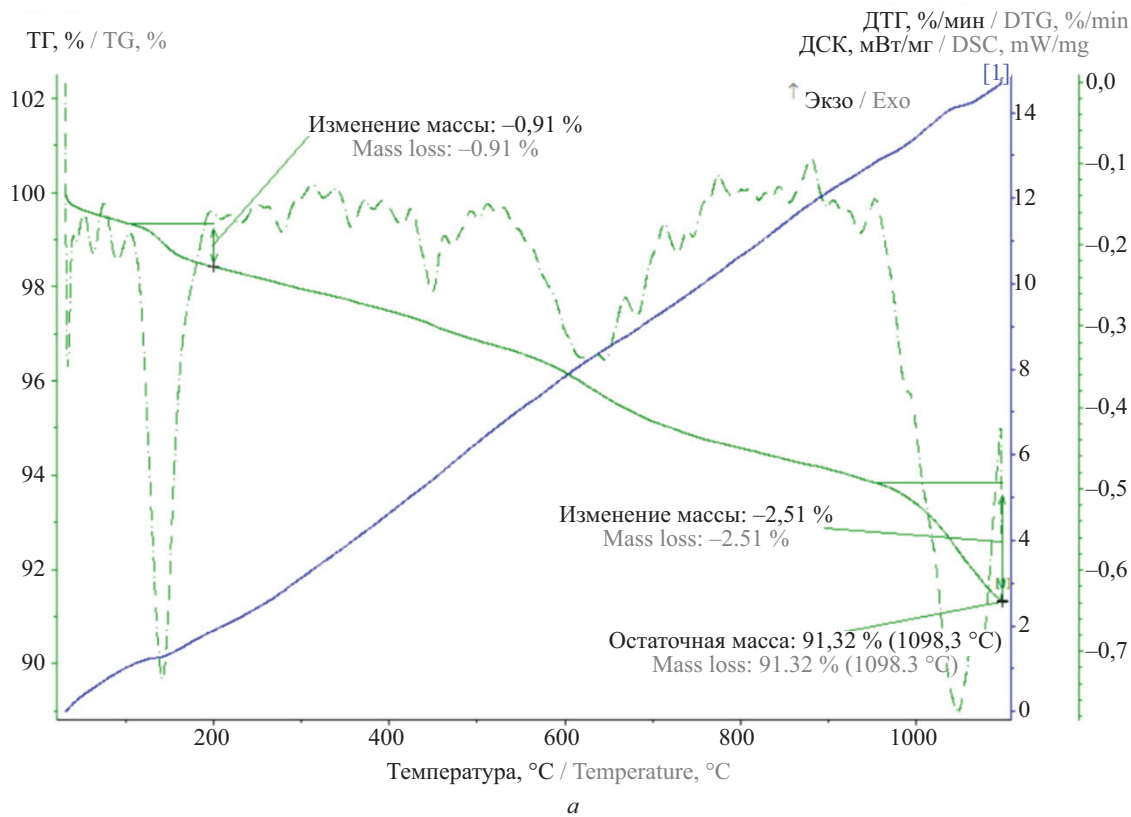


Рис. 2. Тройная диаграмма SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO

Fig. 2. Ternary diagram SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO



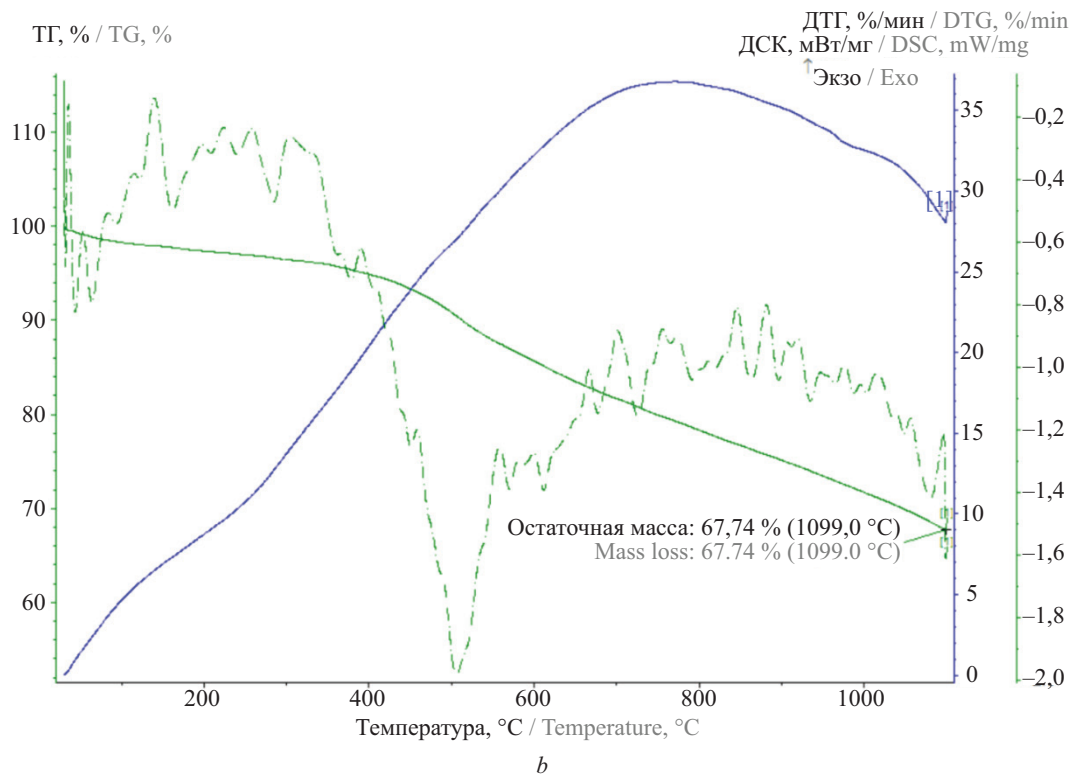


Рис. 3. Термограмма «красного» терриконика (а); «черного» терриконика (b)  
Fig. 3. Thermogram of self-ignited coal gangue (a); of not ignited coal gangue (b)

до полуводного. Эндотермический эффект в пределах температур 600–700 °С отражает диссоциацию карбоната магния, содержащегося в доломите, который в незначительных количествах (0,5 %) присутствует в пробе «красного» терриконика. Другой эндотермический эффект, наблюдающийся при температурах 1000–1100 °С, указывает на процесс разложения карбоната кальция, составляющего минерал кальцит [19–21].

Рассматривая термограмму «черного» терриконика (рис. 3, b), можно наблюдать следующие термоэффекты. Эндотермический эффект при температуре менее 100 °С связан с удалением из образца физически связанной воды. При 500 °С отмечается эндотермический эффект, связанный с дегидратацией каолинита с образованием метакаолинита [12], что подтверждает возможность использования этого материала в качестве активной минеральной добавки (АМД) в цементных системах.

Для того чтобы оценить эффективность использования терриконики в качестве МД в цементных системах, проведен эксперимент по замене части портландцемента в растворе в количестве 10, 20 и 30 % на тонкомолотый «красный» и обожженный «черный» терриконики. Результаты определения прочности на изгиб и сжатие образцов раствора представлены на рис. 4.

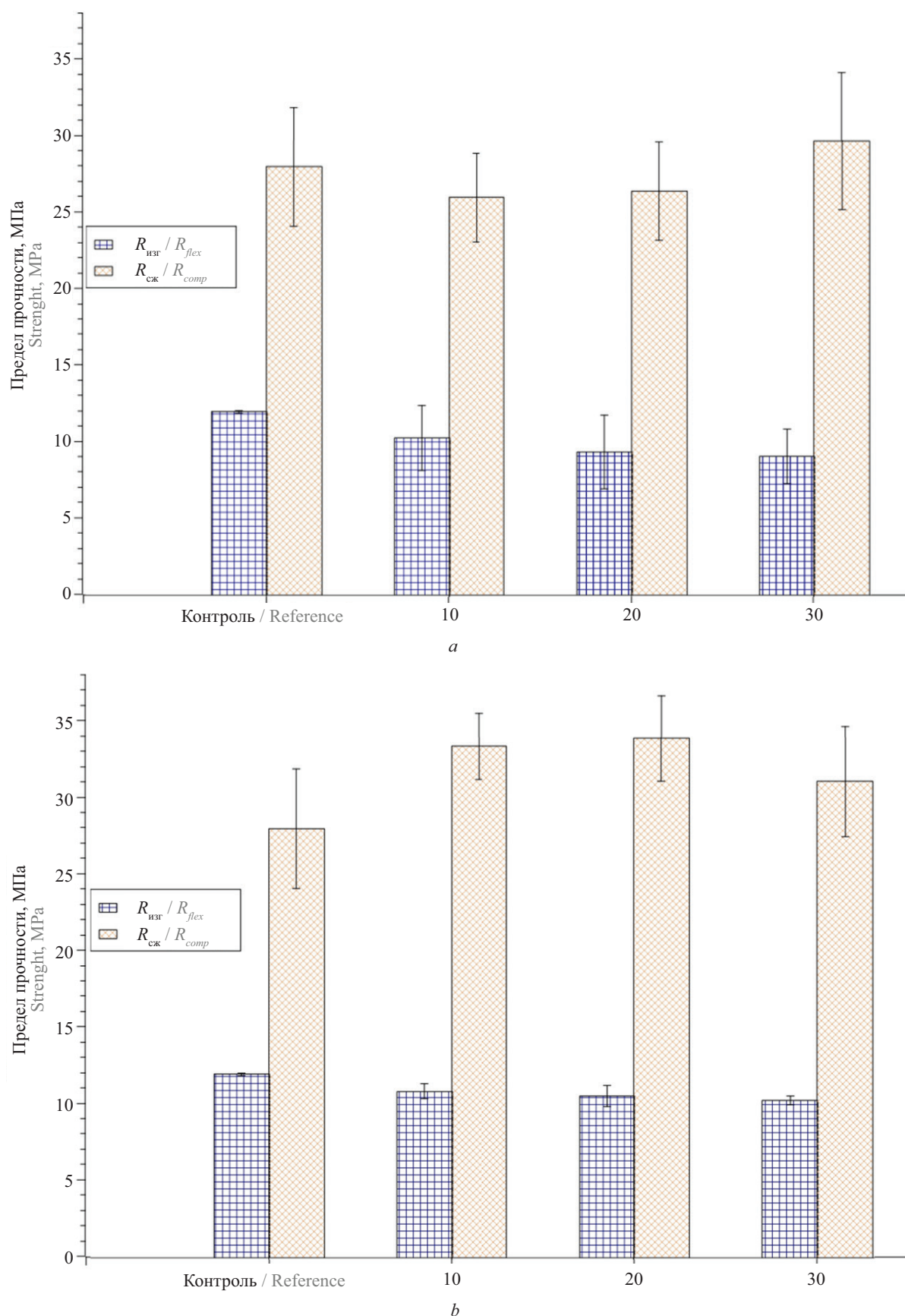
Результаты показали, что при добавлении 10 и 20 % «красного» терриконика прочность при сжатии образцов раствора находится примерно на том же

уровне, что и прочность образцов контрольного состава, с незначительным снижением, а при добавлении 30 % терриконика результаты испытаний оказались даже несколько выше контрольных.

Если определить индекс эффективности добавки как отношение предела прочности при сжатии образцов с добавкой к пределу прочности при сжатии образцов без добавки, то для состава с 30%-ной заменой цемента «красным» терриконики получим значение 1,06.

При добавлении в состав цементно-песчаного раствора 10, 20 и 30 % обожженного «черного» терриконика прочность при сжатии ЦК возрастает, несколько снижаясь при 30 % по сравнению с составом при 20%-ном расходе добавки. Оптимальным содержанием обожженного «черного» терриконика по прочности на сжатие можно считать 20 %, при котором прочность на сжатие увеличивается на 21 %. Индекс эффективности для состава с 20%-ной заменой цемента «черным» обожженным терриконики составил 1,21. Увеличение прочности раствора с обожженным «черным» терриконики может быть объяснено пуццоланической активностью метакаолинита. Продукты взаимодействия метакаолинита с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (C-(A)-S-H, стратлинит, гидрогранат [22]) заполняют пространство вокруг зерен заполнителя более плотно по сравнению с частицами цемента, также снижая капиллярную пористость [18].

Наличие значительного количества угля (31–35 %) в «черном» терриконики, с одной стороны,



**Рис. 4.** Пределы прочности при изгибе и сжатии образцов раствора в возрасте 28 сут нормального твердения с добавкой 10, 20 и 30 % «красного» терриконики (а); обожженного «черного» терриконики (b)

**Fig. 4.** Flexural and compressive strength of mortar with 10, 20 and 30 % of self-ignited coal gangue admixture after 28 days of normal curing (a); of not ignited coal gangue (b)



является вредной примесью, однако этот компонент будет выгорать при термической активации добавки, что может быть рассмотрено как преимущество с точки зрения экономии топлива в процессе обжига [23].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность и эффективность использования терриконигов Кизеловского угольного бассейна в качестве МД в цементных системах. Данный вывод сделан на основе следующих положений:

- химический и минералогический состав «красного» терриконика, состоящего в основном из кварца, дает основание для использования его в качестве МД;
- наличие в «черном» терриконике значительного (41 %) содержания каолинита дает основание для получения в результате обжига АМД метакаолинита, что подтверждается результатами термогравиметрического анализа;
- возможна замена цемента на тонкомолотый «красный» терриконик до 30 % без существенной потери прочности;
- также возможна замена цемента на тонкомолотый «черный» обожженный терриконик с увеличением прочности на сжатие в возрасте 28 сут на 21 % при 20%-ной замене цемента.

Наиболее перспективным с точки зрения эффективности применения в составе композиционных

портландцементных вяжущих видом терриконигов являются негорелые породы, так как их последующие измельчение и термообработка будут способствовать усреднению состава и нивелированию влияния вредных примесей, в отличие от горелых пород, усреднение состава которых может потребовать больших затрат на их обогащение.

Целью дальнейших исследований станет оценка однородности химического и минералогического составов терриконигов как во всем объеме исходного отвала, так и сродство составов отходов других отвалов Кизеловского угольного бассейна.

Для количественной оценки пуццоланической активности терриконигов планируется проведение испытаний исследуемых добавок по методике ГОСТ Р 56593-2015, основанной на измерении количества извести, поглощаемой из насыщенного раствора добавкой. Данный метод планируется применять и для выявления зависимости пуццоланической активности «черного» терриконика от режима его термической активации, а также для сравнения активности терриконигов с активностью широко используемых в технологии строительных материалов МД, например метакаолинита. Кроме того, необходимо детально изучить продукты совместной гидратации цемента и терриконигов, а также рассмотреть вопросы эффективности совместного применения рассматриваемых композиционных цементных вяжущих и эффективных пластифицирующих добавок.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanagaraj B., Anand N., Samuvel Raj R., Lubloy E. Techno-socio-economic Aspects of Portland Cement, Geopolymer, and Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Composite Systems : A-State-of-Art-Review // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 398. P. 132484. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132484
2. Ndahirwa D., Zmatou H., Lenormand H., Leblanc N. The Role of Supplementary Cementitious Materials in Hydration, Durability and Shrinkage of Cement-Based Materials, their Environmental and Economic Benefits : a Review // Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. P. 100123. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100123
3. Wang A., Pan Y., Zhao J., Liu P., Wang Y., Chu Y. et al. Research Progress of Resourceful and Efficient Utilization of Coal Gangue in the Field of Building Materials // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 99. P. 111526. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.111526
4. Баталин Б.С., Южаков К.Н., Белозерова Т.А. Техногенные месторождения минерального сырья для строительных материалов в Пермском крае : монография. Одесса, 2014. 281 с. EDN STOSYV.
5. Баталин Б.С., Белозёрова Т.А., Маховер С.Э., Гайдай М.Ф. Кирпич сухого прессования из террико-

- нигов Кизела // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. № 15 (191). С. 39–41. EDN MNJOKV.
6. Баталин Б.С., Белозёрова Т.А., Гайдай М.Ф., Маховер С.Э. Керамический кирпич из терриконигов Кизеловского угольного бассейна // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 11 (166). С. 18–22. EDN SKDXUF.
7. Баталин Б.С., Белозерова Т.А., Гайдай М.Ф. Строительная керамика из терриконигов Кизеловского угольного бассейна // Стекло и керамика. 2014. № 3. С. 8–10. EDN RYHNSZ.
8. Баталин Б.С., Хорошавина А.И. Исследование возможности получения низкомарочного вяжущего вещества на основе горных пород шахтных терриконигов // Master's Journal. 2013. № 2. С. 137–142. EDN RVZZOR.
9. Zhang Y., Ling T.C. Reactivity Activation of Waste Coal Gangue and its Impact on the Properties of Cement-Based Materials : a Review // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 234. P. 117424. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117424
10. Zhang J., Han H., Wang L. Pozzolanic Activity Experimental Dataset of Calcined Coal Gangue // Data

in Brief. 2023. Vol. 51. P. 109802. DOI: 10.1016/j.dib.2023.109802

11. Zhu Z., Liu Ch., Mao L., Han Z., Chen L., Zou H. et al. Study on the Effect of Activated Coal Gangue on the Mechanical and Hydration Properties of Cement // *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. P. 1186055. DOI: 10.3389/fmats.2023.1186055

12. Cao Z., Cao Y., Dong H., Zhang J., Sun C. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue // *International Journal of Mineral Processing*. 2016. Vol. 146. Pp. 23–28. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.11.008

13. Гамалий Е.А. Горелые породы как активная минеральная добавка в бетон // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2008. № 25 (125). С. 22–27. EDN JWKAQH.

14. Qin L., Gao X. Properties of Coal Gangue-Portland Cement Mixture with Carbonation // *Fuel*. 2019. Vol. 245. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.02.067

15. Леонтьев С.В., Талейко А.А. Перспективы использования техногенных горных пород и кристаллических затравок в технологии LC3 вяжущих // *Construction and Geotechnics*. 2024. Т. 15. № 2. С. 31–48. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.03. EDN NVJPDH.

16. Zhang J., Chen T., Gao X. Incorporation of Self-ignited Coal Gangue in Steam Cured Precast Concrete // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 292. P. 126004. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126004

17. Cong X.Y., Lu S., Yao Y., Wang Z. Fabrication and Characterization of Self-ignition Coal Gangue Autoclaved Aerated Concrete // *Materials & Design*. 2016. Vol. 97. Pp. 155–162. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.068

18. Брыков А.С. Химические факторы коррозии портландцементных бетонов. СПб., 2016. 165 с.

19. Zhang W., Zhou H., Hu Y., Wang J., Ma J., Jiang R. et al. Influence of Curing Temperature on the Performance of Calcined Coal Gangue–Limestone Blended Cements // *Materials*. 2024. Vol. 17. Issue 8. P. 1721. DOI: 10.3390/ma17081721

20. Li D., Song X., Gong C., Pan Z. Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanic cement with coal gangue // *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. Issue 9. Pp. 1752–1759. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.11.004

21. Гориков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М. : Высш. школа, 1981. 335 с.

22. Weise K., Ukrainczyk N., Koenders E. Pozzolanic Reactions of Metakaolin with Calcium Hydroxide : Review on Hydrate Phase Formations and Effect of Alkali Hydroxides, Carbonates and Sulfates // *Materials & Design*. 2023. Vol. 231. P. 112062. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112062

23. Рязанов А.А. Энергоэффективная технология известково-глинистого цемента и стеновых камней на основе отходов угледобычи : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2021. 223 с.

Поступила в редакцию 9 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 февраля 2025 г.

Одобрена для публикации 24 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Алексеевич Талейко — аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); 614000, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 1221611, Scopus: 58204751900, ORCID: 0009-0006-9470-1220; taleyko.99@mail.ru;

Степан Васильевич Леонтьев — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); 614000, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 704103, Scopus: 57193724081, ORCID: 0000-0002-0659-3324; n1306cl@yandex.ru.

Вклад авторов:

Талейко А.А. — идея, литературный обзор, проведение экспериментов, написание рукописи, анализ результатов.

Леонтьев С.В. — научное руководство, анализ результатов, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Kanagaraj B., Anand N., Samuvel Raj R., Lubloy E. Techno-socio-economic Aspects of Portland Cement, Geopolymer, and Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Composite Systems : A-State-of-Art-Review. *Construction and Building Materials*. 2023; 398:132484. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132484

2. Ndahirwa D., Zmamou H., Lenormand H., Leblanc N. The Role of Supplementary Cementitious Materials in Hydration, Durability and Shrinkage of Cement-Based Materials, their Environmental and Economic Benefits : a Review. *Cleaner Materials*. 2022; 5:100123. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100123

3. Wang A., Pan Y., Zhao J., Liu P., Wang Y., Chu Y. et al. Research Progress of Resourceful and Efficient Utilization of Coal Gangue in the Field of Building Materials. *Journal of Building Engineering*. 2024; 99:111526. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.111526
4. Batalin B.S., Yuzhakov K.N., Belozerova T.A. *Technogenic deposits of mineral raw materials for building materials in the Perm region : monograph*. Odessa, 2014; 281. EDN STOSYV. (rus.).
5. Batalin B.S., Belozyorova T.A., Makhover S.E., Gaidai M.F. Dry-pressed brick made from Kizel waste pile. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2010; 15(191):39-41. EDN MNJOKV. (rus.).
6. Batalin B.S., Belozerova T.A., Gayday M.F., Makhover S.E. Ceramic bricks from the thermal cores of the Kizelovsky coal basin. *Construction materials, equipment, technologies of the 21st century*. 2012; 11(166):18-22. EDN SKDXUF. (rus.).
7. Batalin B.S., Belozerova T.A., Gayday M.F. Construction ceramics from the thermal ceramics of the Kizelovsky coal basin. *Glass and Ceramics*. 2014; 3:8-10. EDN RYHNSZ. (rus.).
8. Batalin B.S., Khoroshavina A.I. Study of the possibility of obtaining a low-grade binder based on rocks from mine waste heaps. *Master's Journal*. 2013; 2:137-142. EDN RVZZOR. (rus.).
9. Zhang Y., Ling T.C. Reactivity Activation of Waste Coal Gangue and its Impact on the Properties of Cement-Based Materials : a Review. *Construction and Building Materials*. 2020; 234:117424. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117424
10. Zhang J., Han H., Wang L. Pozzolanitic Activity Experimental Dataset of Calcined Coal Gangue. *Data in Brief*. 2023; 51:109802. DOI: 10.1016/j.dib.2023.109802
11. Zhu Z., Liu Ch., Mao L., Han Z., Chen L., Zou H. et al. Study on the Effect of Activated Coal Gangue on the Mechanical and Hydration Properties of Cement. *Frontiers in Materials*. 2023; 10:1186055. DOI: 10.3389/fmats.2023.1186055
12. Cao Z., Cao Y., Dong H., Zhang J., Sun C. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanitic activity of calcined coal gangue. *International Journal of Mineral Processing*. 2016; 146:23-28. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.11.008
13. Gamaliy E.A. Burnt rocks as an active mineral admixture to concrete. *Bulletin of SUSU. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2008; 25(125):22-27. EDN JWKAQH. (rus.).
14. Qin L., Gao X. Properties of Coal Gangue-Portland Cement Mixture with Carbonation. *Fuel*. 2019; 245:1-12. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.02.067
15. Leontev S.V., Taleiko A.A. Prospects for the use of man-made rocks and crystalline seeds in LC3 binder technology. *Construction and Geotechnics*. 2024; 15(2):31-48. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.03. EDN NVJPDH. (rus.).
16. Zhang J., Chen T., Gao X. Incorporation of Self-ignited Coal Gangue in Steam Cured Precast Concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 292:126004. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126004
17. Cong X.Y., Lu S., Yao Y., Wang Z. Fabrication and Characterization of Self-ignition Coal Gangue Autoclaved Aerated Concrete. *Materials & Design*. 2016; 97:155-162. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.068
18. Brykov A.S. *Chemical factors of corrosion of Portland cement concretes*. St. Petersburg, 2016; 165. (rus.).
19. Zhang W., Zhou H., Hu Y., Wang J., Ma J., Jiang R. et al. Influence of Curing Temperature on the Performance of Calcined Coal Gangue-Limestone Blended Cements. *Materials*. 2024; 17(8):1721. DOI: 10.3390/ma17081721
20. Li D., Song X., Gong C., Pan Z. Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanitic cement with coal gangue. *Cement and Concrete Research*. 2006; 36(9):1752-1759. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.11.004
21. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'ev V.G. *Methods of physico-chemical analysis of binders*. Moscow, Higher school, 1981; 335. (rus.).
22. Weise K., Ukrainczyk N., Koenders E. Pozzolanitic Reactions of Metakaolin with Calcium Hydroxide : Review on Hydrate Phase Formations and Effect of Alkali Hydroxides, Carbonates and Sulfates. *Materials & Design*. 2023; 231:112062. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112062
23. Ryazanov A.A. *Energy-efficient technology of lime-clay cement and wall stones based on coal mining waste : PhD Thesis*. Ufa, 2021; 223. (rus.).

Received February 9, 2025.

Adopted in revised form on February 18, 2025.

Approved for publication on March 24, 2025.

**BIONOTES:** **Andrei A. Taleiko** — postgraduate student of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614000, Russian Federation; ID RSCI: 1221611, Scopus: 58204751900, ORCID: 0009-0006-9470-1220; taleiko.99@mail.ru;

**Stepan V. Leontev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614000, Russian Federation; ID RSCI: 704103, Scopus: 57193724081, ORCID: 0000-0002-0659-3324; n1306cl@yandex.ru.

*Contribution of the authors:*

*Andrei A. Taleiko — idea, literature review, data gathering and processing, writing of the article, results analysis.*

*Stepan V. Leontev — supervision, results analysis, scientific editing of the text.*

*The authors declare no conflicting interests.*