

Экологическая целесообразность рециклинга золошлака в производстве стеновых материалов и оптимизация керамических масс по техническим показателям

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-6-44-49>

САФРОНОВ Е.Г.

Канд. экон. наук, доцент,
доцент ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» (СамГТУ),
443100, г. Самара, Россия,
e-mail: ewgenijsafronow@yandex.ru

СИЛИНСКАЯ С.М.

Канд. техн. наук, доцент,
доцент Краснодарского филиала
ФГБОУ ВО «Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации»
(Финуниверситет),
350051, г. Краснодар, Россия,
e-mail: Silinskaya1@mail.ru

НАРЫЖНАЯ Н.Ю.

Канд. техн. наук, доцент,
доцент Краснодарского филиала
ФГБОУ ВО «Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации»
(Финуниверситет),
350051, г. Краснодар, Россия,
e-mail: nunar-teacher@bk.ru

АБДРАХИМОВ В.З.

Доктор техн. наук, профессор,
профессор ФГБОУ ВО «Самарский
государственный экономический университет»,
443090, г. Самара, Россия,
e-mail: 3375892@mail.ru

Россия обязана включиться в принятую всеми экономически развитыми странами программу перехода от линейной экономики индустриальной эпохи к постиндустриальной циркулярной или с замкнутым циклом производства с включением переработки отходов с целью повторного их использования. Опыт передовых зарубежных стран показал техническую осуществимость этого направления и применения его еще и как инструмента защиты природной среды от загрязнения. Вместе с тем из отходов или из отходов в комбинации с природным сырьем могут быть изготовлены практически все основные строительные материалы. Получен стеновой материал (кирпич) без применения природных традиционных материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса: межсланцевой глины, используемой в качестве глинистой связующей, и золошлакового материала, используемого в качестве отощителя и выгорающей добавки. В работе использовался метод линейной регрессии для оптимизации составов керамических масс по техническим свойствам – определен интервал оптимального содержания золошлака.

Ключевые слова: стеновой материал, золошлаковый материал, межсланцевая глина, метод линейной регрессии.

Для цитирования: Экологическая целесообразность рециклинга золошлака в производстве стеновых материалов и оптимизация керамических масс по техническим показателям / Е.Г. Сафронов, С.М. Силинская, Н.Ю. Нарыжная и др. // Уголь. 2021. № 6. С. 44-49. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-6-44-49.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема рационального использования природных ресурсов в XXI веке не только не решена, но и ухудшила положение в экологии в связи с увеличением большого количества отходов, особенно топливно-энергетического комплекса [1, 2, 3]. Топливо-электроэнергетический комплекс является одним из основных «загрязнителей» окружающей природной среды. Это выбросы в атмосферу (48% всех выбросов в атмосферу), сбросы сточных вод (36% всех сбросов), а также образование твердых отходов (30% всех твердых загрязнителей).

В настоящее время в вопросе выживания человечества на первое место выходит необходимость сохранения состояния окружающей среды, биосферного равновесия [3, 4, 5]. Уже значительные площади поверхности суши исключены из хозяйственной деятельности человечества вследствие накопления на них крупнотоннажных промышленных отходов. Такое положение значительно увеличило и степень отрицательного воздействия не только на окружающую среду, но и на здоровье человека [4, 5, 6, 7]. Учитывая значительное накопление промышленных отходов, необходимо отметить, что такое загрязнение окружающей природной среды будет становиться все более опасным и, в конечном счете, негативно отразится не только на экологии, но и на здоровье людей.

Неотъемлемыми элементами при производственной деятельности любого предприятия должны быть: обеспечение экологической безопасности; забота о сохранении окружающей среды и финансовая ответственность (включая штрафы) руководителей предприятий.

В настоящее время Россия еще не готова к реализации замкнутого цикла циркулярной экономики с минимизацией использования природных ресурсов при создании всех видов товаров и услуг. Россия обязана включиться в принятую всеми экономически развитыми странами программу перехода от линейной экономики индустриальной эпохи к постиндустриальной циркулярной или с замкнутым циклом производства с включением переработки отходов с целью повторного их использования. Опыт передовых зарубежных стран показал техническую осуществимость этого направления и применения его еще и как инструмента защиты природной среды от загрязнения. Вместе с тем из отходов или из отходов в комбинации с природным сырьем могут быть изготовлены практически все основные строительные материалы.

В современных экономических условиях при ограниченном государственном финансировании геологоразведочных работ весьма важным является принятие оптимальных управленческих решений по выбору для производства керамических изделий сырьевых материалов, которые дадут максимальный социально-экономический эффект [8, 9, 10].

Поскольку в настоящее время природные сырьевые ресурсы истощены, необходимо вовлекать в производствен-

ный оборот отходы производств для изготовления керамических материалов [7, 8, 9, 10]. При этом исключаются затраты на геологоразведочные работы, строительство и эксплуатацию карьеров, освобождаются значительные земельные участки от воздействия негативных антропогенных факторов.

Постановка задачи. С учетом сокращения запасов традиционного природного сырья необходимо и в России найти новые способы его замещения различными видами отходов. Опыт передовых зарубежных стран показал техническую осуществимость этого направления и применения его еще и как инструмента защиты природной среды от загрязнения.

Цель. На основе межсланцевой глины и золошлакового материала, без применения природных традиционных сырьевых материалов получить керамический стеновой материал с высокими физико-механическими показателями; использовать метод линейной регрессии для оптимизации составов керамических масс по техническим свойствам образцов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сырьевые материалы

К стеновым материалам относятся: керамический кирпич обыкновенный, блоки и утолщенный кирпич. Для получения керамического кирпича в настоящей работе использовались отходы топливно-энергетического комплекса: в качестве глинистого связующего – межсланцевая глина, а в качестве отощителя и выгорающей добавки – золошлаковый материал. Химические составы используемых отходов производств представлены: оксидный – в табл. 1, поэлементный – в табл. 2, фракционный (гранулометрический) – в табл. 3, технологические показатели – в табл. 4.

Межсланцевая глина. Межсланцевая глина образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах) и является отходом горючих сланцев. По числу пластичности межсланцевая глина относится к среднепластичному глинистому сырью (число пластичности – (15-25) с истинной плотностью 2,55-2,62 г/см³ [6]. Минералогический (минеральный) состав представлен на рис. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых отходов топливно-энергетического комплекса

Отходы	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
В качестве глинистого компонента							
Межсланцевая глина	45-47	13-14	5-6	11-13	2-3	3-4	9-20
В качестве отощителя и выгорающей добавки							
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	48-49	16-17	7-8	3-4	2-3	0,1-0,3	20-21

Таблица 2

Поэлементный анализ отходов топливно-энергетического комплекса

Отходы	Элементы									
	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	S	K	Ca	Fe
Межсланцевая глина	5,73	51,06	0,46	1,04	7,20	18,66	1,83	1,75	10,53	3,35
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	6,4	51,08	1,09	0,40	10,5+1,44	18,44	1,1	1,5	3,03	4,02

Таблица 3

Фракционный состав отходов топливно-энергетического комплекса

Отходы	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,0001
Межсланцевая глина	5	7	12	14	62
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	18,39	33,70	33,8	10,7	3,41

Таблица 4

Технологические показатели отходов топливно-энергетического комплекса

Отходы	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °С		
		Начало деформации	Размягчение	Жидкоплавкое состояние
Межсланцевая глина	1100	1260	1290	1320
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	1800	1300	1300	1390

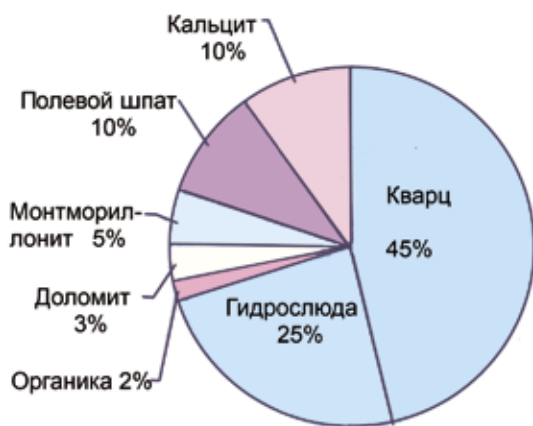


Рис. 1. Минералогический (минеральный) состав межсланцевой глины

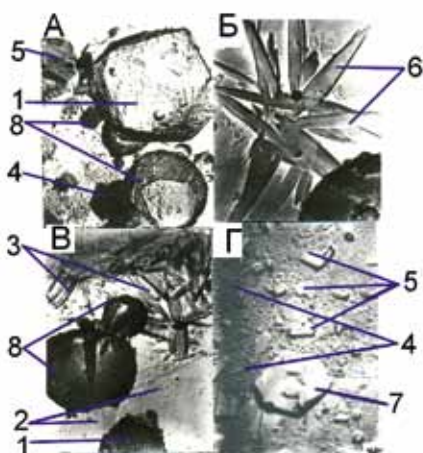


Рис. 2. Минералогический состав (электронное фото) золошлакового материала: 1 – магнетит; 2 – стекло; 3 – муллит; 4 – органические включения; 5 – кварц; 6 – анортит; 7 – полевой шпат; 8 – гематит. Увеличение А и В ×20000; Б и Г ×24000

Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС. Для производства кирпича в качестве отощителя и выгорающей добавки использовался золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС [6], минералогический состав которого представлен на рис. 2.

Отощители в производстве керамических материалов используются для сокращения сроков сушки и усадки. К группе выгорающих добавок относятся различные виды

твердого топлива, в частности, антрацит, коксовая мелочь и другие виды топлива, которые вводят в состав шихты 3-5% по объему, то есть до 50-70% от общей потребности топлива на обжиг изделий. Назначение их – интенсифицировать процесс обжига, улучшить спекаемость массы и тем самым повысить прочность изделий. Золошлаковый материал имеет теплотворную способность 1800 ккал/кг, поэтому может использоваться в качестве выгорающей добавки.

ОПТИМИЗАЦИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАСС ПО ТЕХНИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Для оптимизации состава керамических масс по физико-механическим (техническим) свойствам кирпича использовался метод линейной регрессии. Модель строилась, основываясь на результатах фактического эксперимента, аналитически описывая результаты серии опытов. В данных исследованиях использовались две переменные: X_1 – процентное содержание межсланцевой глины, X_2 – процентное содержание золошлакового материала. Оптимизация составов проводилась по составам, приведенным в табл. 5.

Эксперимент состоял из пяти опытов (см. табл. 5), независимая переменная X_2 изменялась в пределах от 0 до 35%, что позволило исследовать влияние содержания золошлакового материала на технические свойства кирпича. Физико-механические (технические) свойства керамического кирпича, обожженного при температуре 1050°С, приведены в табл. 6.

Чаще всего в качестве уравнения регрессии используется линейная зависимость, но в данном случае линейная зависимость дает слишком низкий коэффициент детерминированности – от 0,65 до 0,78 на разных этапах регрессионного анализа, то есть уровень корреляции модели с экспериментом оставляет желать лучшего. Кроме того, линейная модель не отражает характера функции отклика, а именно, наличия достаточно ярко выра-

Таблица 5

Составы керамических масс

Отходы	Содержание компонентов, мас. %				
	1	2	3	4	5
Межсланцевая глина (X_1)	100	90	80	70	65
Золошлаковый материал (X_2)	–	10	20	30	35

Физико-механические показатели кирпича

Отходы	Составы				
	1	2	3	4	5
Механическая прочность при сжатии, МПа (Y_1)	9,22	9,81	10,93	12,43	12,21
Механическая прочность при изгибе Мпа (Y_2)	1,22	1,31	1,62	2,21	2,03
Морозостойкость, циклы (Y_3)	14	16	19	24	22

Таблица 7

Значения a и b для уравнений регрессии

Значения коэффициентов и свободного члена		Уравнения регрессии для		
		Прочность при сжатии (Y_1)	Прочность при изгибе (Y_2)	Морозостойкость (Y_3)
Значения коэффициентов	a_4	-1628,6	-980,95	-8476,2
	a_3	960,48	605,24	5252,4
	a_2	-149,14	-102,9	932,38
	a_1	12,938	6,219	69,19
Значение свободного члена	b	19,2	1,2	14

женного экстремума. После проведения предварительного анализа в качестве уравнения регрессии была выбрана зависимость, описываемая полиномом четвертого порядка и имеющая вид:

$$Y = a_4 X^4 + a_3 X^3 + a_2 X^2 + a_1 X + b. \quad (1)$$

Для определения коэффициентов уравнения (1) для каждого этапа регрессионного анализа был применен метод наименьших квадратов.

В процессе предварительного регрессионного анализа исследовались значения t -критерия для оценки веса вклада констант-уравнения. Табличное значение t -критерия для уровня надежности 95% и пять степеней свободы равно 2,01. В табл. 7 приведены значения коэффициентов a и b для уравнения (1) по первому этапу эксперимента.

При этом модельные уравнения приняли следующий вид:

– для прочности при сжатии:

$$Y_1 = -1628,6 (X_2)^4 + 960,48 (X_2)^3 - 149,14 (X_2)^2 + 12,938 X_2 + 19,2; \quad (2)$$

– для прочности при изгибе:

$$Y_2 = -980,95 (X_2)^4 + 605,24 (X_2)^3 - 102,9 (X_2)^2 + 6,219 X_2 + 1,2; \quad (3)$$

– для морозостойкости:

$$Y_3 = -8476,2 (X_2)^4 + 5252,4 (X_2)^3 - 932,38 (X_2)^2 + 69,19 X_2 + 14, \quad (4)$$

где X – содержание золошлакового материала, %; Y – значения соответствующих величин.

Для оценки величины корреляции с моделью определили коэффициент детерминированности (R -квадрат), получаемый при сравнении фактических и предсказуемых значений Y . Этот коэффициент при расчетах нормируется от 0 до 1, и в случае, если он равен единице, можно сделать вывод, что имеется полная корреляция модели с экспериментом. Далее была рассчитана стандартная ошибка по формуле:

$$\sqrt{\left[\frac{1}{n(n-2)} \right] \left[n \sum y^2 - (\sum y)^2 - \frac{[n \sum xy - (\sum x)(\sum y)]^2}{n \sum x - (\sum x)^2} \right]}. \quad (7)$$

Рассчитаны значения коэффициентов детерминированности, значения ошибок для коэффициентов a_4, a_3, a_2, a_1, b , для констант уравнений, F -наблюдаемого и для оценки взаимосвязи между зависимой и независимой переменными, а также значения t -критерия (2,010).

Анализ модельных графиков полезен как при уточнении диапазонов состояния между опытами, так и для прогнозирования результатов, не вошедших в эксперимент. На рис. 3 приведены графики зависимости свойств кирпича от содержания золошлакового материала для первого этапа регрессионного анализа.

Как следует из рис. 3, заметного отличия модельных результатов от фактических, полученных в ходе эксперимента, не наблюдается. Незначительные отличия модельных результатов от фактических имеют место, но лежат в пределах соответствия модели.

ВЫВОДЫ

1. Получен стеновой материал (кирпич) без применения природных традиционных материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса: межсланцевой глины, используемой в качестве глинистой связующей, и золошлакового материала, используемого в качестве отщителя и выгорающей добавки

2. Метод линейной регрессии, используемый для оптимизации состава керамических масс, по механическим свойствам кирпича показал, что оптимальное содержание золошлакового материала – 30%. Отличие модельных результатов от фактических, полученных в ходе эксперимента, лежат в пределах соответствия модели.

3. При использовании метода линейной регрессии было определено, что наиболее удачно описывает зависимость физико-механических показателей кирпича от содержания золошлакового материала полином четвертого порядка.

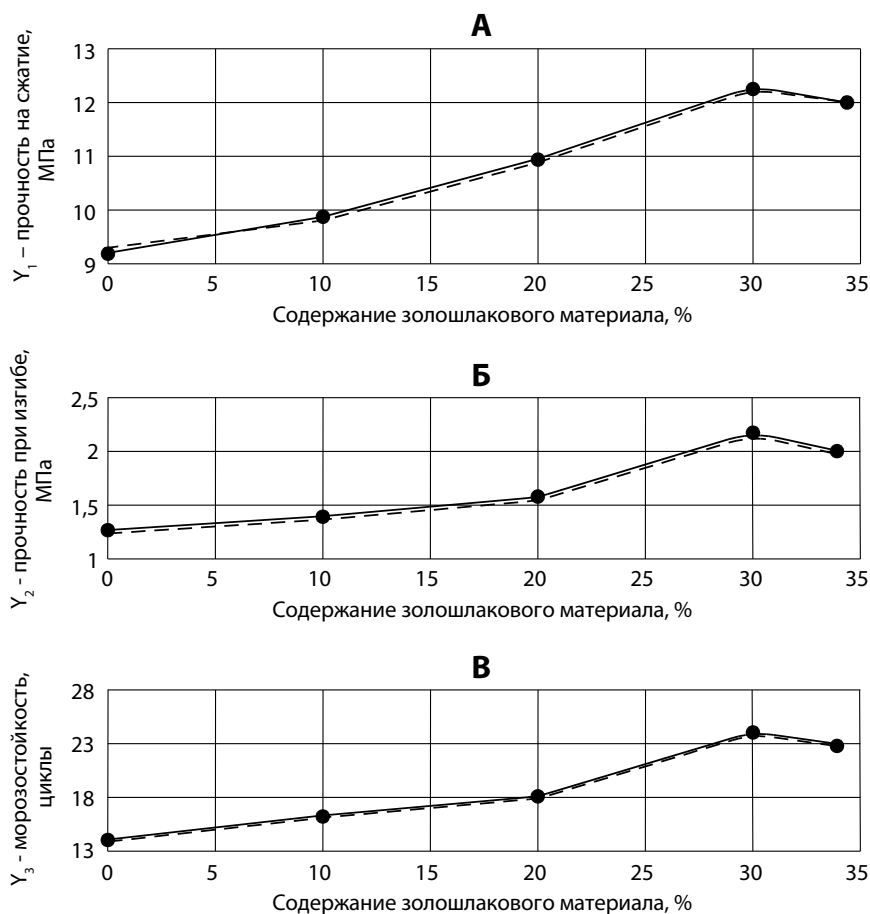


Рис. 3. Зависимость показателей кирпича от содержания золошлакового материала: А – механическая прочность при сжатии; Б – механическая прочность при изгибе; В – морозостойкость

Список литературы

1. Абдрахимова Е.С. Жаростойкий поризованный бетон на основе отходов углеобогащения // Уголь. 2018. № 11. С. 48-53. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-11-48-53.
2. Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование золошлакового материала Восточного Казахстана в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольной композиции // Уголь. 2019. № 1. С. 70-73. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-1-70-73.
3. Абдрахимова Е.С. Исследование сушильных свойств керамических материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса // Уголь. 2019. № 9. С. 67-69. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-9-67-69.

работки, образующихся при обогащении коксующихся углей // Уголь. 2017. № 4. С. 64-67. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-4-64-67.

9. Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Влияние золы легкой фракции на технологические свойства шликера, пресс-порошка и физико-механические показатели // Уголь. 2020. № 4. С. 45-50. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-4-45-50.

10. Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Влияние золы легкой фракции на пористость, морозостойкость и водопоглощение фасадных плиток // Уголь. 2020. № 12. С. 44-48. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-12-44-48.

4. Абдрахимова Е.С. Образование золы легкой фракции и использование ее в производстве плиток для полов // Уголь. 2019. № 11. С. 64-66. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-64-66.

5. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С., Абдрахимова И.Д. Исследование теплопроводности легковесных материалов из отходов топливно-энергетической промышленности без применения природных традиционных материалов // Уголь. 2016. № 4. С. 72-75. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-4-72-75.

6. Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З. Использование золошлакового материала в производстве теплоизоляционных материалов на основе межсланцевой глины // Уголь. 2016. № 10. С. 74-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-10-74-78.

7. Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З. Использование отходов углеобогащения в производстве керамических материалов – современные приоритеты развития для «зеленой» экономики // Уголь. 2017. № 2. С. 54-57. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-2-54-57.

8. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С., Абдрахимова И.Д. Получение теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла и отходов углепереработки, образующихся при обогащении коксующихся углей // Уголь. 2017. № 4. С. 64-67. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-4-64-67.

Authors Information

Safronov E.G., PhD (Economic), Associate Professor,

e-mail: ewgenijsafronow@yandex.ru

Silinskaya S.M., PhD (Engineering), Associate Professor,

e-mail: Silinskaya1@mail.ru

Naryzhnaya N.Yu., PhD (Engineering), Associate Professor,

Associate Professor, e-mail: nunar-teacher@bk.ru

Abdrakhimov V.Z., Doctor of Engineering Sciences, Professor,

Professor, e-mail: 3375892@mail.ru

Abstract

Russia is obliged to join the program of transition adopted by all economically developed countries from a linear economy of the industrial era to a post-industrial circular economy or with a closed production cycle with the inclusion of waste processing for the purpose of reusing them. The experience of advanced foreign countries has shown the technical feasibility of this direction and its application as a tool for protecting the natural environment from pollution. Together with that, almost all basic building materials can be made from waste or from waste in combination with natural raw materials. Wall material is obtained wall brick based on waste from the fuel and energy complex without the use of natural traditional materials: inter-shale clay used as a clay binder and ash – slag material used as a thinning agent and burning additive. In this paper, I use the linear regression method to optimize the compositions of ceramic masses by technical properties-the interval of optimal ash content is determined.

Keywords

Wall material, Ash-slag material, Interstitial clay, Linear regression method.

References

1. Abdrakhimova E.S. Heat resistant aerated concrete based on waste coal preparation, chemistry and phosphate binders. *Ugol'*, 2018, (11), pp. 48-53. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2018-11-48-53.
2. Kairakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z. & Abdrakhimova E.S. The use of ash material of East Kazakhstan in the production of porous aggregate on the basis of liquid-glass compositions. *Ugol'*, 2019, (1), pp. 70-73. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-1-70-73.
3. Abdrakhimova E.S. The study of drying properties of ceramic materials based on waste of fuel and energy complex. *Ugol'*, 2019, (9), pp. 67-69. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-9-67-69.

4. Abdrakhimova E.S. Education ash light fraction and its use in the manufacture of tiles for floors. *Ugol'*, 2019, (11), pp. 64-66. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-64-66.

5. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. & Abdrakhimova I.D. Investigation of thermal conductivity of lightweight materials from energy industry wastes without the use of natural traditional materials. *Ugol'*, 2016, (4), pp. 72-75. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2016-4-72-75.

6. Abdrakhimova E.S., Kairakbaev A.K. & Abdrakhimov V.Z. Bottom-ash material application in interschistic clay – based thermal insulation materials production. *Ugol'*, 2016, (10), pp. 74-78. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2016-10-74-78.

7. Abdrakhimova E.S., Kairakbaev A.K. & Abdrakhimov V.Z. Coal concentration wastes utilization in ceramic materials production – present-day priorities for environment friendly economics development. *Ugol'*, 2017, (2), pp. 54-57. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2017-2-54-57.

8. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. & Abdrakhimova I.D. Getting insulating material based on liquid glass and coal conversion wastes generated during coking coals preparation. *Ugol'*, 2017, (4), pp. 64-67. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2017-4-64-67.

9. Kairakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z. & Abdrakhimova E.S. The influence of light fraction ash on the technological properties of the slip, press powder and physical and mechanical properties. *Ugol'*, 2020, (4), pp. 45-50. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-4-45-50.

10. Kairakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z. & Abdrakhimova E.S. Influence of light fraction ash on porosity, frost resistance and water absorption of facade tiles. *Ugol'*, 2020, (12), pp. 44-48. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-12-44-48.

For citation

Safronov E.G., Silinskaya S.M., Naryzhnaya N.Yu. & Abdrakhimov V.Z. Ecological feasibility of ash slag recycling in the production of wall materials and optimization of ceramic masses according to technical indicators. *Ugol'*, 2021, (6), pp. 44-49. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-6-44-49.

Paper info

Received January 15, 2021

Reviewed March 14, 2021

Accepted May 17, 2021