



**В. З. АБДРАХИМОВ
Е. Г. САФРОНОВ**

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ РЕЦИКЛИНГ АРГИЛЛИТОПОДОБНЫХ ОТХОДОВ ФЛОТАЦИИ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМЗИТА ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, ЭКОНОМИКИ И СТРОИТЕЛЬСТВА

PROSPECTIVE RECYCLING OF MUDSTONE-LIKE WASTE FROM COAL
ENRICHMENT FLOTATION INTO THE PRODUCTION OF EXPANDED CLAY
FOR ECOLOGY, ECONOMICS AND CONSTRUCTION

В условиях стагнации в сегменте утилизации чрезмерная аккумуляция отходов производств в России приблизилась к угрожающим диапазонам. Создавшаяся экологическая ситуация требует разработки предпочтительных для жизнедеятельности россиян экологических условий, которые обязаны стать государственными фундаментальными приоритетами. Аккумуляция в России отходов производств деструктивно стимулирует уровень экономического роста, который по оценкам специалистов ежегодно снижается на 4–6 % от ВВП. В работе проведено исследование керамзита фракции 5–10 мм, в результате которого установлено, что предпочтительными составами по марочности, которые заслуживают внимание, являются составы, содержащие 30 % аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения, дальнейшее увеличение которых не соответствует условиям по морозостойкости. Исследования показали, что пористость снаружи, в отличие от пористости внутри, мало замечена, т. е. отходы углеобогащения способствуют получению в пористом заполнителе замкнутых пор, которые повышают технические показатели керамзита.

Ключевые слова: рециклинг, экология, экономика, керамзит, аргиллитоподобные отходы, углеобогащение, флотация, бентонитовая глина, монтмориллонит

In conditions of stagnation in the recycling segment, excessive accumulation of industrial waste in Russia has approached threatening ranges. The current environmental situation requires the development of preferred environmental conditions for the life of Russians, which must become state fundamental priorities. The accumulation of industrial waste in Russia destructively stimulates the level of economic growth, which, according to experts, decreases annually by 4–6 % of GDP. A study of expanded clay with a 5–10 mm fraction has shown that the preferred grade compositions that deserve attention are compositions containing 30 % of argillite-like waste from coal enrichment flotation, the further increase of which does not meet the conditions for frost resistance. Studies have shown that porosity on the exterior, unlike the interior, is small, i.e. carbon enrichment waste contributes to the formation of closed pores in the porous filler, which increase the technical performance of expanded clay.

Keywords: recycling, ecology, economics, expanded clay, mudstone-like waste, coal enrichment, flotation, bentonite clay, montmorillonite

Введение

Экологическая ситуация. Министр природных ресурсов и экологии РФ С.Е. Донской отметил, что в условиях стагнации в сегменте утилизации чрезмерная аккумуляция отходов производств в России приблизилась к угрожающим диапазонам [1]. Создавшаяся ситуация требует разработки предпочтительных для жизнедеятельности россиян экологических условий, которые обязаны стать государственными фундаментальными приоритетами. По словам министра С.Е. Донского в РФ обнаружено 153 тыс. несанкционированных территорий, использованных под отходы, общая площадь которых составила 77 тыс. га. В создавшейся ситуации корень зла следует искать в дефиците финансовых мотиваций по созданию современных предприятий для рециклинга отходов производств. Добавленные в законодательные документы поправки позволяют сначала сократить, а затем до 2030 г. исключить полностью нелегальные полигоны и свалки [2], а промышленные отходы вовлекать в производство товаров народного потребления. Для экологических систем наиболее пагубными являются отходы топливно-энергетического комплекса (ТЭК), которые формируются последовательно, при добыче, обогащении, переработке и транспортировке энергоресурсов, и серьёзно вредят почвенному покрову, фауне и флоре, а также водно-воздушному бассейну [3]. Изучаемые аргиллитоподобные отходы флотации углеобогащения относятся к многотоннажным отходам ТЭК.

Экономическая ситуация. Аккумуляция в России отходов производств деструктивно стимулирует уровень экономического роста, который по оценкам специалистов ежегодно снижается на 4-6 % от ВВП [4]. Экономически целесообразно использовать аргиллитоподобные отходы флотации углеобогащения в производстве керамзита.

Керамзит – это изделие ячеистого строения, чаще в виде гравия, реже в виде щебня, относящееся к легким пористым заполнителям. Получают керамзит традиционно из набухающих глин (чаще монтмориллонитовых) методом их вспучивания при термообработке в интервале температур 1100–1300 °С за период 30–60 мин.

Благодаря уникальным многофункциональным полезным свойствам: лёгкость за счёт низкой плотности, низкая теплопроводность за счёт повышенной пористости, прочность при сдавливании в цилиндрах – керамзит является востребованным пористым заполнителем [5, 6].

Экономически выгодно керамзитом заполнять, в качестве легких заполнителей, конструктивно-теплоизоляционные и облегченные бетоны с целью снижения веса, использовать его как теплоизоляционный насыпной материал. Керамзит имеет плотность существенно ниже природных традиционных заполнителей: щебень, гравий, песок и т. д., поэтому он облегчает нагрузку на грунт, удешевляет транспортировку. Использование керамзита позволяет частично экономить тепло, идущее на отопление здания, за счёт снижения теплопередачи через стены и фундамент [7].

Финансовые капиталовложения на формирование эффективности производства керамзита возмещаются в течение трех лет, поэтому удельный вес этого искусственного заполнителя достиг 60–70 % [8].

Для повышения вспучивания керамзита при использовании маловспучивающихся (малонабухающих) монтмориллонитовых глин) в композицию дополнительно включают: органику – солярное масло, мазут, молотый каменный уголь, сульфат-спиртовую барду (ССБ), опилки и неорганические компоненты – пыль железистой руды, пиритные огарки и окристую глину.

Дефицит хорошо вспучивающегося (набухающих монтмориллонитовых глин) глинистого сырья создаёт проблемы для производства керамзита, так как во многих регионах России в основном встречаются лессовидные суглинки, не имеющие соответствующих технологических параметров для получения теплоизоляционного материала [9–11]. В таких случаях в керамических композициях целесообразно использовать корректирующие добавки, содержащие теплотворную способность – более 2500 ккал/кг, в результате чего вспучивание увеличивается [11, 12]. К высокоперспективным корректирующим добавкам следует отнести отходы ТЭК с содержанием теплотворной способности от 2300 до 3500 ккал/кг.

Эффективный рециклинг крупнотоннажных отходов ТЭК в производстве керамзита существенно снижает вредное воздействие на окружающую среду, а показатели деятельности предприятия повышает [11–13].

Постановка задачи. Истощение качественных традиционных хорошо вспучивающихся монтмориллонитовых глин для производства керамзита требует использования корректирующих добавок, обладающих теплотворной способностью более 2500 ккал/кг, в результате чего вспучивание увеличивается. Такой инвентарий по утилизации вторичного сырья используется передовыми странами ещё и для безопасности окружающей среды.

Цель работы: а) определить у исследуемых сырьевых материалов составы: химические – оксидный и поэлементный, минералогический и фракционный, а также технологические показатели; б) проанализировать фактор воздействия аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения на технические характеристики и пористую структуру керамзита на основе бентонитовой глины.

Аргиллитоподобное сырье

В настоящее время пока не существует общепринятой формулировки аргиллита, т. е. не существует единого термина, который получил бы согласие на всеобщее одобрение, хотя имеются некоторые интерпретации по его определению, см., например, [14–16]: а) аргиллит – это осадочная мелкозернистая порода, состоящая преимущественно из силикатных зерен крупностью менее $0,63 \times 10^{-6}$ м; б) аргиллит – это разновидность модификации камнеподобной глины сланцевой структуры с твердостью 3,5–4, плотностью 1,3–2,6 г/см³; в) аргиллит – это слоистая или раскалывающаяся мелкозернистая осадочная порода; г) аргиллит – это камнеподобный плотный минерал, сформировавшийся в результате дегидратации, спрессования и перекристаллизации в процессе диагенеза и эпигенеза, т. е. это продукт уплотнения и окаменения ранее увлажненных осадочных пород.

Диагенез – комплекс физико-химических процессов перестройки пористо-сыпучих осадков в твердые горные осадочные породы, а **эпигенез** уже относится ко вторичным процессам, порождающим следующие трансформации в горных породах, способствующие новообразованию минералов и месторождению полезных ископаемых.

По месторождениям, залежам, скоплениям, показателям и признакам аргиллитоподобное сырье условно для удобства разделяют на три класса [17]:

а) традиционное натуральное образование, которое целенаправленно разведывалось и изучалось для определенного керамического изделия;

б) крупнотоннажные отходы, чаще всего образующиеся при добыче угля и его обогащении, количество которых эквивалентно природным месторождениям;

в) горные пустые и вмещающие породы, образовавшиеся в процессе разработки месторождений разнообразных продуктивных ископаемых, с которыми аргиллиты взаимосвязаны генетически.

По химическим составам аргиллиты можно ассоциировать с глинами, которые отли-

чаются от аргиллитов размоканием в воде и являются нетвердыми и пластичными материалами, хотя по внешнему виду аргиллиты в большей степени аналогичны алевролитам, которые не причисляются к минералам [18, 19].

В основу алевролита могут входить частицы полевых шпатов, глинистые минералы, карбонаты и гидроксиды железа, кварц, а базисными накапливаемыми минералами аргиллитов, как правило, являются в первую очередь гидрослюда, затем смешаннослойные минералы, каолинит и в последнюю очередь монтмориллонит, а от сланцев аргиллит отличается отсутствием трещиноватости и параллельного наслоения [19, 20].

Методика исследования

Для установления микроструктуры и поэлементных химических составов сырьевых компонентов: аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения и бентонитовой глины привлекался микроскоп фирмы Jeol (Япония). Для петрографической диагностики применяли: шлифы, прозрачные аншлифы, иммерсионные жидкости, микроскопы МИН-8 и МИН-7. Определение размеров включений в исследуемых сырьевых материалах осуществлялось металлографическим анализом при увеличении в 200 раз на микроскопе МИН-8М. Частишки сырья растворялись в спирте, а затем располагались на стекле и снимались фотоаппаратом. Пользование шкалой микромера (1 дел. = 0,001 мм), заслуживающего доверия, позволяет обнаружить средний размер отходов.

Профпригодность глины для процесса изготовления керамзита устанавливается по коэффициенту вспучивания: $K = V_k V_c$, где V_k – объем вспученной гранулы керамзита, V_c – объем сухой сырьевой гранулы до обжига. Чем выше K сырья, тем ниже плотность керамзита, что более привлекательно для производства керамзита.

Коэффициент вспучивания глинистых пород различного минералогического состава в естественном состоянии варьируется в масштабных пределах (до 15). Такая вибрация условно предполагает вспучивание: слабое – до 2,5; среднее – от 2,5 до 4,5 и хорошее – выше 4,5. Прочность образцов на раздавливание измерялась прибором МП-9С (ручной вариант) конструкции ИФХ АН РФ.

Показатели пористых заполнителей документировали по ГОСТ 32496-2013 – стандарт, который распространяется на

пористые заполнители для лёгких бетонов, в том числе на керамзит.

Сырьевые материалы

В качестве связующей (пластичного материала) была задействована бентонитовая глина, а в качестве отошителя и как выгорающая добавка (за счет повышенной теплоотворной способности) – аргиллитоподобные отходы флотации углеобогащения (отходы углеобогащения).

Фундаментальные параметры и характеристики сырьевых материалов изложены: усреднённый оксидный химический – в табл. 1, поэлементный – в табл. 2, технологические свойства – в табл. 3, фракционный состав – в табл. 4, металлографический анализ представлен – на

рис. 1, минералогический – на рис. 2, а микроструктура – на рис. 3.

Бентонитовая глина. Диспергирующаяся глина в воде до коллоидного состояния и сформированная в основном из глинистых минералов группы монтмориллонита называется бентонитовой [21]. Для повышения формовочных свойств керамических композиций добавляются бентонитовые глины, состоящие из гидрофильных высокодисперсных частиц минерала монтмориллонита.

Монтмориллонит имеет слоистую структуру (см. рис. 3, а), в основе которого размещены трехслойные пакеты, сформированные тетраэдрическими и октаэдрическими слоями.

Для получения керамзита использовалась бентонитовая глина Смышляевского месторождения Самарской области со следующими

Таблица 1. Усредненный химический оксидный состав сырьевых компонентов
Table 1. Average chemical oxide composition of raw materials

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
Бентонитовая глина	58,89	14,43	7,2	4,8	2,7	3,4	7,85
Отходы углеобогащения	50,54	18,19	6,38	1,29	0,20	4,45	18,91

Примечание: п.п.п. – потери при прокаливании; R₂O = K₂O + Na₂O

Таблица 2. Поэлементный химический состав сырьевых компонентов
Table 2. Element-wise chemical composition of raw materials

Компонент	Содержание элементов, мас. %								
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Бентонитовая глина	1,30	55,8	0,27	1,00	13,46	18,47	3,99	2,46	3,25
Отходы углеобогащения	7,88	49,43	2,08	–	12,91	23,02	1,39	0,35	2,96

Таблица 3. Технологические показатели сырьевых компонентов
Table 3. Technological indicators of raw materials components

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °С		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
Бентонитовая глина	1200	1180	1200	1230
Отходы углеобогащения	2700	1220	1280	1320

Таблица 4. Фракционный состав сырьевых компонентов
Table 4. Fractional composition of raw materials

Компонент	Содержание фракций, %; размер частиц, мм				
	> 0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001
Бентонитовая глина	3	5	6	7	79
Отходы углеобогащения	35	27,1	6,7	12,8	18,4

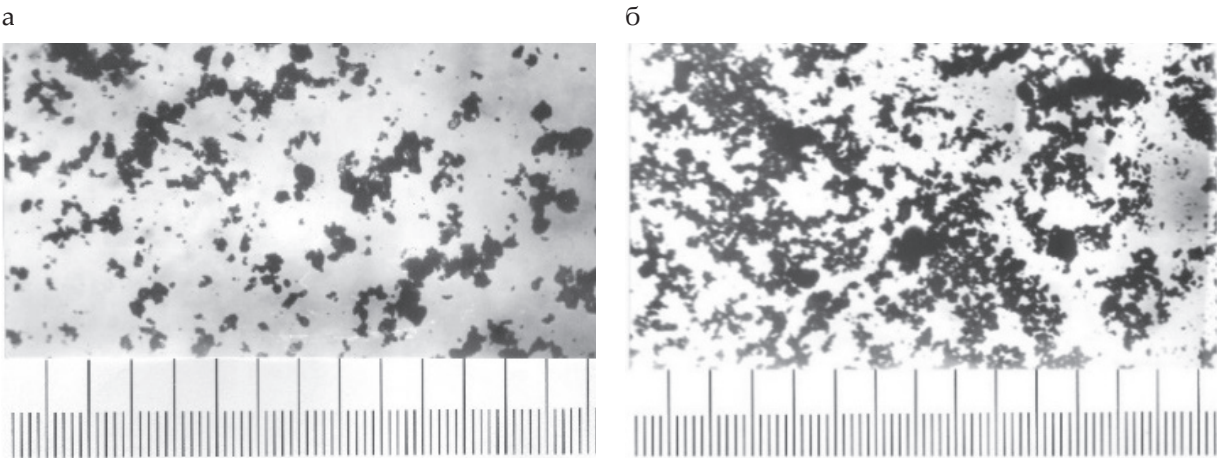


Рис. 1. Металлографический анализ сырьевых компонентов:
а – бентонитовая глина; б – отходы углеобогащения
Fig. 1. Metallographic analysis of the raw material components:
a – bentonite clay; b – coal enrichment waste

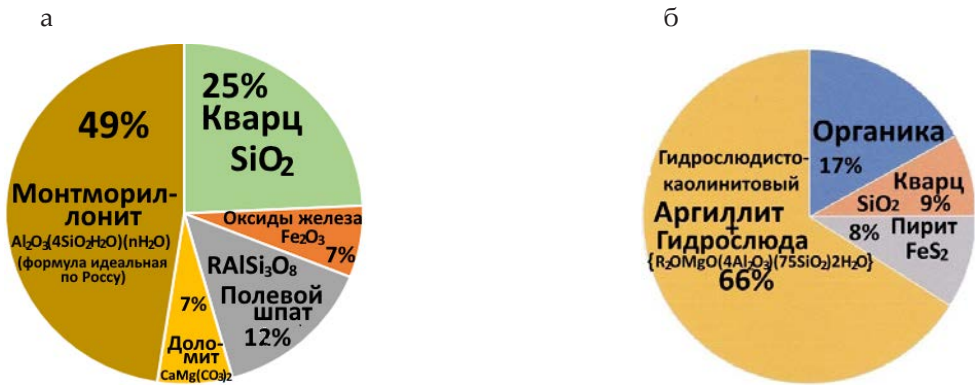


Рис. 2. Минералогический состав сырьевых компонентов:
а – бентонитовая глина; б – отходы углеобогащения
Fig. 2. Mineralogical composition of the raw material components:
a – bentonite clay; b – coal enrichment waste

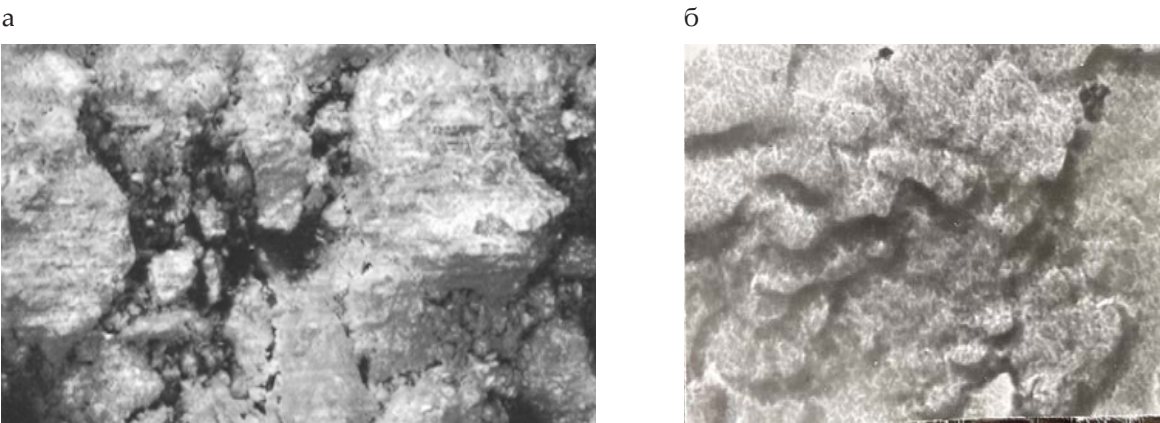


Рис. 3. Микроструктура сырьевых компонентов:
а – бентонитовая глина; б – отходы углеобогащения
Fig. 3. Microstructure of the raw material components:
a – bentonite clay; b – coal enrichment waste

параметрами: высокопластичная (число пластичности более 25), высокодисперсная (см. табл. 4), легкоплавкая (см. табл. 3), коэффициент вспучивания – 4. Металлографический анализ глины показал наличие множества мелких включений, но встречаются и средние размеры (5–10 мкм, см. рис. 1, а), минералогический состав представлен на рис. 2, а.

Аргиллитоподобные отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская». Исследуемые отходы углеобогащения использовались, как и в работах [22–24], в качестве отощителя и выгорающей добавки. Химические, технологические показатели и свойства представлены в табл. 1–4 и на рис. 1–3. Большинство аргиллитовых пород и аргиллитоподобных глин образуют массивные пласты или микрослоистые (плитчатые) разновидности [21, 24, 25]. Исследуемые аргиллитоподобные отходы флотации углеобогащения выражены слоистостью, образовавшейся в результате уплотнения и эпигенеза глин (см. рис. 3, б).

Минеральный состав отходов флотации углеобогащения показал, что основным минералом является гидрослюдисто-каолинитовый аргиллит с небольшой примесью гидрослюды – 5–10 %, а суммарное содержание – 66 % (см. рис. 2, б). Согласно металлографическому анализу, в образцах исследуемых отходов флотации образуется повышенное количество мелких и средних включений как неоргани-

ческого, так и органического происхождения (средний размер отходов флотации углеобогащения частиц от 1–3 до 3–5 мкм, черного цвета, см. рис. 1, б).

Технология получения керамического кирпича и его показатели

Изготовление керамзита воплощалось по хорошо известной технологии [5–9]: бентонитовая глина и аргиллитоподобные отходы флотации углеобогащения подсушивались и, согласно рецепту (табл. 5), тщательно перемешивались. Полученная композиция диспергировалась до прохождения сквозь сита № 1 (1 мм) и затворялась водой до формовочной влажности 24–30 % (в зависимости от содержания в композиции бентонитовой глины).

Сконструированная композиция с целью гомогенизации ее влажности помещалась на одни сутки в эксикатор, из полученной единой образной композиции специальной системой ножей разрезалась на отдельные гранулы – образцы в виде сферических гранул диаметром 16 мм. Обжиг образцов проводился в лабораторной печи при температуре 1100 °С.

В ГОСТ 9757 заложены нижеследующие по крупности зерен фракции: 5–10, 10–20 и 20–40 мм. В представленной работе исследованию подвергались фракции 5–10 мм. Основные технические показатели приведены в табл. 6.

Таблица 5. Составы керамических композиций для производства керамзита
Table 5. Compositions of ceramic compositions for the production of expanded clay

Компонент	Содержание компонентов, мас, %				
	1	2	3	4	5
Бентонитовая глина	10	20	25	30	35
Аргиллитоподобные отходы флотации углеобогащения	10	20	25	30	35

Таблица 6. Основные физико-механические показатели керамзита
Table 6. Main physical and mechanical parameters of expanded clay

Показатель	Состав				
	1	2	3	4	5
Прочность при сжатии, МПа	2,2	2,1	1,8	1,5	1,2
Насыпная плотность, кг/м ³	380	360	330	290	255
Марка керамзита	M350	M350	M300	M250	M250
Теплопроводность, Вт/(м·°С) *	0,15	0,12	0,09	0,07	0,05
Морозостойкость, циклы**	25	23	20	18	14
Коэффициент вспучивания	4,5	4,7	4,9	5,2	5,5

*Коэффициент теплопроводности для керамзитового гравия должен составлять 0,10–0,18 Вт/(м·°С).

** Согласно ГОСТ 32496-2013, морозостойкость керамзитового щебня и гравия должна быть не ниже F15.

При этом потеря массы после 15 циклов не должна превышать 8 %.

Строение полученных гранул, например оптимального состава, аналогично керамзитовым, полученным на основе традиционного сырья т. е. они имели высокопористую структуру ядра и сплошную плотную корочку (рис. 4, состав № 4). Полученный керамзитовый гравий имеет тонкую слегка шероховатую поверхностную корку коричневого цвета.

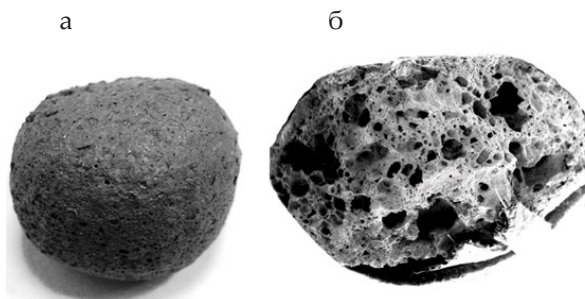


Рис. 4. Фото керамзита состава № 4:

а – внешний вид; б – разрез

Fig. 4. Photo of expanded clay composition N. 4:

a – appearance; b – incision

Обсуждение результатов

Исследование керамзита фракции 5–10 мм засвидетельствовало, что предпочтительными составами по марочности, заслуживающими внимание, являются составы № 4 и № 5 (М250, см. табл. 6), но при этом состав № 5 не соответствует условиям по морозостойкости. Таким образом, к оптимальному составу следует отнести состав № 4. Керамзит фракции 5–10 мм с коэффициентом теплопроводности 0,07–0,12 Вт/(м·°С) рекомендуется применять для заливки бетонных стяжек и производства керамзитобетонных блоков [4, 5, 9].

К конструктивным показателям качества следует отнести прочность керамзита, с повышением которой изделие более надежно выдерживает транспортировку, температурные перепады, перегрузку и другие внешние негативные действия. Кроме того, низкомарочные гранулы с большим количеством пористости, выдерживающие максимум 0,8–1,2 МПа, принимаются в расчет как самые хрупкие [4, 5, 9]. Коэффициент вспучивания при увеличении аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения также повышается, но прочность понижается (см. табл. 6).

За счет повышенного содержания в отходах флотации углерода и его выгорания при обжиге (см. табл. 2, С = 7,88 %) выделяется газ, который способствует росту коэффициента вспучивания.

Вспучивание керамзита идентифицируется как результат избыточного давления газов

внутри микропор, способствующих их расширению, которое пребывает в непосредственной зависимости от вязкости пиропластического расплава. Поэтому для роста вспучиваемости в керамзите применяют вспучивающие добавки, например солянку, а в представленной работе использовали отходы флотации углеобогащения с содержанием п.п.п. – 18,91 % (см. табл. 1), С – 7,88 % (см. табл. 2), теплотворная способность – 2700 ккал/кг (см. табл. 3), органика – 17 % (см. рис. 2) [8, 26].

Как видно из рис. 4, пористость снаружи, в отличие от пористости внутри вида, мало замечена, т. е. аргиллитоподобные отходы флотации углеобогащения способствуют получению в пористом заполнителе замкнутых пор, которые способствуют повышению технических показателей керамзита.

Выводы

1. Исследование керамзита фракции 5–10 мм засвидетельствовало, что предпочтительными составами по марочности, которые заслуживают внимание, являются составы, содержащие отходы углеобогащения 30 % (состав № 4) и 35 % (состав № 5), марка которых М250, но при этом состав № 5 не соответствует условиям по морозостойкости. Таким образом, к оптимальному составу следует отнести состав № 4.

2. Выявлено, что коэффициент вспучивания при увеличении аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения также повышается, но прочность понижается: за счет повышенного содержания в отходах флотации углерода и его выгорания при обжиге (см. табл. 2, С = 7,88 %) выделяется газ, который способствует росту коэффициента вспучивания.

3. Установлено, что вспучивание керамзита идентифицируется как результат избыточного давления газов внутри микропор, способствующих их расширению, которое пребывает в непосредственной зависимости от вязкости пиропластического расплава. Поэтому для роста вспучиваемости в керамзите применяют вспучивающие добавки, например солянку, а в представленной работе использовали отходы флотации углеобогащения с содержанием п.п.п. – 18,91 % (см. табл. 1), С – 7,88 % (см. табл. 2), теплотворная способность – 2700 ккал/кг (см. табл. 3), органика – 17 % (см. рис. 2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Донской С.Е., министр природных ресурсов и экологии РФ. Зелёные технологии как новая точка роста экономики // Международная выставка-форум. М.: ЭКОТЕХ, 2016.

2. Зеленцов Д.В., Савельев А.А., Чертес К.Л. Устройство системы пассивной дегазации массивов существующих объектов размещения отходов // Градостроительство и архитектура. 2015. № 4(21). С. 100–102. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.04.13.
3. Рахимов Р.З. Топливно-энергетический комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества // Известия КГАСУ. 2022. № 3(61). С. 67–74. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67.
4. Донской С.Е. Ликвидация прошлого экологического ущерба, снижение негативного воздействия, сохранение и восстановление биоразнообразия и создание условий для экологической модернизации экономики являются приоритетными направлениями деятельности Минприроды России // IV Всероссийский съезд по охране окружающей среды. М.: Международный выставочный центр «Крокус-ЭКС-ПО», 2013.
5. Абдрахимов В.З., Денисов Д.Ю. Теоретические и технологические аспекты использования техногенного сырья в производстве теплоизоляционных материалов. Самара, 2010. 72 с.
6. Абдрахимов В.З., Ковков И.В. Курс лекций по дисциплине «Заполнители для бетонов». Самара, 2006. 70 с.
7. Использование отходов флотации углеобогащения в производстве керамзита / В.З. Абдрахимов, В.К. Семенычев, Е.С. Абдрахимова, И.В. Ковков, В.А. Куликов // Экология и промышленность России. 2010. № 5. С. 20–21.
8. Абдрахимова Е.С., Никитина Н.В. Влияние нефтяного шлама на коэффициент вспучивания и фазовый состав керамзита на основе бейделлитовой глины // Бурение и нефть. 2022. № 7. С. 72–78.
9. Султан И.С., Шингужиева А.Б. Керамзит – энергоэффективный и экологически безопасный материал // Юный ученый. 2019. № 5. С. 53–56.
10. Рошупкина И.Ю., Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З. Исследование фазового состава керамзита на основе отходов горно-обогатительной фабрики при обогащении угля // Башкирский химический журнал. 2010. Т. 17, № 2. С. 136–138.
11. Куликов В.А., Абдрахимов В.З., Ковков И.В. Влияние твердого нефтесодержащего отхода сепарации нефтешлама на фазовый состав и физико-механические свойства керамзита // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 6. С. 141–147.
12. Куликов В.А., Ковков И.В., Абдрахимов В.З. Исследование фазового состава керамзита на основе монтмориллонитовой глины и отходов горно-обогатительной фабрики при обогащении угля // Известия вузов. Строительство. 2010. № 10. С. 24–28.
13. Соколов Л., Фоменко А. Использование отходов в производстве керамзита // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19, № 9. С. 30–34. DOI:10.18412/1816-0395-2015-9-30-34.
14. Котляр А.В., Талпа Б.В., Лазарева Я.В. Особенности химического состава аргиллитоподобных глин // Строительные материалы. 2016. № 4. С. 10–13.
15. Особенности камневидных глинистых пород Восточного Донбасса как сырья для производства стеновой керамики / В.Д. Котляр, А.В. Козлов, А.В. Котляр, Ю.В. Терёхина // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 95–105.
16. Талпа Б.В., Котляр А.В. Минерально-сырьевая база литифицированных глинистых пород Юга России для производства строительной керамики // Строительные материалы. 2015. № 4. С. 31–33.
17. Абдрахимов В.З. Влияние аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения на технические показатели и фазовый состав керамического кирпича // Известия вузов. Строительство. 2025. № 1. С. 76–87. DOI:10.32683/0536-1052-2025-793-1-76-87.
18. Котляр А.В. Характеристика камнеподобных глинистых пород как сырья для производства строительной керамики // Строительные материалы. 2022. № 4. С. 31–37. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-801-4-31-37.
19. Nunes K.G.P. Illi J.C., Dávila I.V.J., Feris L.A. Use of coal beneficiation tailings as solid sorbents in the treatment of nitrate-contaminated real wastewater. Applied Water Science. 2020. V. 10. N. 4. P. 14.
20. Gongcheng Li, Shulong Liu, Zengsheng Wen, Guolei Liu, Yu Cui, Yajian Shao Effect of Ultrasonic Frequency on Thickener Performance. Advances in Materials Science and Engineering. 2021. N. 4. P.12–15.
21. Абдрахимов В.З. Получение керамических стеновых материалов на основе монтмориллонитовой глины и «хвостов» обогащения полиметаллических руд // Строительство и реконструкция. 2022. № 4. С. 132–138. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-102-4-132-138.
22. Абдрахимов В.З. Влияние аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения на технические показатели и фазовый состав керамического кирпича // Известия вузов. Строительство. 2025. № 1. С. 76–87. DOI:10.32683/0536-1052-2025-793-1-76-87.
23. Абдрахимов В.З. Термогравиметрические и электронно-микроскопические исследования композиции на основе межсланцевой глины и аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения // Новые огнеупоры. 2025. № 1. С. 58–67.
24. Абдрахимов В.З. Влияние аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения на структуру пористости теплоизоляционного материала // Известия КГАСУ. 2025. № 1(71). С. 77–91. DOI: 10.48612/NewsKSUAЕ/71.7.
25. Еременко Г.Н., Лапунова К.А., Лазарева Я.В. Керамическая черепица на основе аргиллитоподобных глин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2015. № 4. С. 41–46.
26. Заостровский А.Н. Зависимость индекса свободного вспучивания от петрографического состава углей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 4(152). С. 52–58. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-52-58.

REFERENCES

1. Donskoy S.E., Minister of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Green technologies

as a new point of economic growth. *Mezhdunarodnaja vystavka-forum* [International Exhibition Forum]. Moscow, JeKOTEH, 2016.

2. Zelentsov D.V., Savelyev A.A., Chertes K.L. Arrangement of passive degassing system for existing waste disposal facilities. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2015, no. 4(21), pp. 100–102. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2015.04.13

3. Rakhimov R.Z. Fuel and energy complex, ecology and mineral binders. *Izvestija KGASU* [News of KGASU], 2022, no. 3(61), pp. 67–74. (in Russian) DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67

4. Donskoy S.E. Elimination of past environmental damage, reduction of negative impact, preservation and restoration of biodiversity and creation of conditions for ecological modernization of the economy are priority areas of activity of the Ministry of Natural Resources of Russia. *IV Vserossijskij s'ezhd po ohrane okruzhajushhej sredy* [IV All-Russian Congress on Environmental Protection]. Moscow, International Exhibition Center «Crocus-EXPO», 2013.

5. Abdrakhimov V.Z., Denisov D.Yu. *Teoreticheskie i tehnologicheskie aspekty ispol'zovaniya tehnogennogo syr'ja v proizvodstve teploizoljacionnykh materialov* [Theoretical and technological aspects of the use of technogenic raw materials in the production of heat-insulating materials]. Samara, 2010. 72 p.

6. Abdrakhimov V.Z., Kovkov I.V. *Kurs lekciy po discipline «Zapolniteli dlja betonov»* [Course of lectures on the discipline “Aggregates for concrete”]. Samara, 2066. 70 p.

7. Abdrakhimov V.Z., Semenychev V.K., Abdrakhimova E.S., Kovkov I.V., Kulikov V.A. Use of coal processing flotation wastes in expanded clay production. *Jekologija i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2010, no. 5, pp. 20–21. (in Russian)

8. Abdrakhimova E.S., Nikitina N.V. Influence of Oil Sludge on the Swelling Factor and Phase Composition of Claydite Based on Beidellite Clay. *Burenje i neft'* [Drilling and Oil], 2022, no. 7, pp. 72–78. (in Russian)

9. Sultan I.S., Shinguzhieva A.B. Keramzit – energy efficient and environmentally friendly material. *Junyj uchenyj* [Young Scientist], 2019, no. 5, pp. 53–56. (in Russian)

10. Roshchupkina I.Yu., Denisov D.Yu., Abdrakhimov V.Z. Study of the phase composition of expanded clay based on waste from the mining and processing plant during coal processing. *Bashkirskij himicheskij zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2010, vol. 17, no. 2, pp. 136–138. (in Russian)

11. Kulikov V.A., Abdrakhimov V.Z., Kovkov I.V. Influence of solid oil-containing waste of oil sludge separation on phase composition and physical and mechanical properties of expanded clay. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2010, no. 6, pp. 141–147. (in Russian)

12. Kulikov V.A., Kovkov I.V., Abdrakhimov V.Z. Study of the phase composition of expanded clay based on montmorillonite clay and mining and processing plant wastes during coal beneficiation. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2010, no. 10, pp. 24–28. (in Russian)

13. Sokolov L., Fomenko A. Use of waste in expanded clay production. *Jekologija i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2015, vol. 19, no. 9, pp. 30–34. (in Russian) DOI:10.18412/1816-0395-2015-9-30-34

14. Kotlyar A.V., Talpa B.V., Lazareva Y.V. Features of chemical composition of mudstone-like clays. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2016, no. 4, pp. 10–13. (in Russian)

15. Kotlyar V.D., Kozlov A.V., Kotlyar A.V., Teryokhina Yu.V. Features of stone-like clay rocks of Eastern Donbass as raw materials for the production of wall ceramics. *Vestnik MGSU* [MGSU Bulletin], 2014, no. 10, pp. 95–105. (in Russian)

16. Talpa B.V., Kotlyar A.V. Mineral resource base of lithified clay rocks of the South of Russia for the production of building ceramics. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2015, no. 4, pp. 31–33. (in Russian)

17. Abdrakhimov V.Z. Influence of argillite-like wastes of coal enrichment flotation on technical parameters and phase composition of ceramic bricks. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2025, no. 1, pp. 76–87. (in Russian) DOI:10.32683/0536-1052-2025-793-1-76-87

18. Kotlyar A.V. Characterization of stone-like clay rocks as raw materials for the production of building ceramics. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2022, no. 4, pp. 31–37. (in Russian) DOI: 10.31659/0585-430X-2022-801-4-31-37

19. Nunes K.G.P. Illi J.C., Dávila I.V.J., Feris L.A. Use of coal beneficiation tailings as solid sorbents in the treatment of nitrate-contaminated real wastewater. *Applied Water Science*. 2020. V. 10. N. 4. P. 14.

20. Gongcheng Li, Shulong Liu, Zengsheng Wen, Guolei Liu, Yu Cui, Yajian Shao Effect of Ultrasonic Frequency on Thickener Performance. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. N. 4. P.12–15.

21. Abdrakhimov V.Z. Production of ceramic wall materials based on montmorillonite clay and “tailings” of polymetallic ore beneficiation. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija* [Construction and Reconstruction], 2022, no. 4, pp. 132–138. (in Russian) DOI: 10.33979/2073-7416-2022-102-4-132-138

22. Abdrakhimov V.Z. Influence of argillite-like wastes of coal enrichment flotation on technical parameters and phase composition of ceramic bricks. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2025, no. 1, pp. 76–87. (in Russian) DOI:10.32683/0536-1052-2025-793-1-76-87

23. Abdrakhimov V.Z. Thermogravimetric and electron-microscopic studies of the composition based on inter-shale clay and argillite-like wastes of coal enrichment flotation. *Novye ognepory* [New Refractories], 2025, no. 1, pp. 58–67. (in Russian)

24. Abdrakhimov V.Z. Influence of argillite-like wastes of coal enrichment flotation on porosity structure of heat-insulating material. *Izvestija KGASU* [News of KGASU], 2025, no. 1(71), pp. 77–91. (in Russian) DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.7

25. Eremenko G.N., Lapunova K.A., Lazareva Y.V. Ceramic tiles based on argillite-like clays. *Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspija* [Civil Engineering Bulletin of the Caspian], 2015, no. 4, pp. 41–46. (in Russian)

26. Zaostrovsky A.N. Dependence of free swelling index on petrographic composition of coals. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2022, no. 4(152), pp. 52–58. (in Russian) DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-52-58

Об авторах:

АБДРАХИМОВ Владимир Закирович

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры землеустройства и экологии
Самарский государственный экономический
университет
443090, Россия, г. Самара, ул. Советской Армии, 141
E-mail: 3375892@mail.ru

ABDRAKHIMOV Vladimir Z.

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor of the Land Management and Ecology Chair
Samara State University of Economics
443090, Russia, Samara, Soviet Army st., 141
E-mail: 3375892@mail.ru

САФРОНОВ Евгений Геннадьевич

кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры экономики промышленности
и производственного менеджмента
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: ewgenijsafronow@yandex.ru

SAFRONOV Evgeny G.

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor of the Industrial Economics
and Production Management Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya st., 244
E-mail: ewgenijsafronow@yandex.ru

Для цитирования: Абдрахимов В.З., Сафронов Е.Г. Перспективный рециклинг аргиллитоподобных отходов флотации углеобогащения в производство керамзита для экологии, экономики и строительства // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 4. С. 90–99. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.13.

For citation: Abdрахимov V.Z., Safronov E.G. Prospective recycling of mudstone-like waste from coal enrichment flotation into the production of expanded clay for ecology, economics and construction. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 4, pp. 90–99. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.13.

Принята: 27.04.2025 г.