

Научная статья

УДК 658.567.1

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-14-27

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРАНУЛ ПОРОД ОТХОДОВ
УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ БФ-4 И БФ-5 АО ЦОФ «БЕРЕЗОВСКАЯ»****Белоусова Кристина Олеговна, Винидиктова Юлия Александровна,
Золотухина Наталья Анатольевна**

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: zna.htnv@kuzstu.ru

Аннотация.

Мировой рост энергопотребления стимулировал интенсивное развитие угледобычи, в результате которой образуются значительные объемы отвалов горных пород и шламов. Накопление этих отходов угледобывающей промышленности ставит перед обществом важные задачи: рациональное использование ресурсов, поиск методов переработки и защита экологии. Статистические данные по объемам отходов теплоэнергетического сектора ведущих стран-производителей электроэнергии показывают, что в России утилизируется лишь десятая часть золошлаковых отходов, что значительно уступает показателям развитых стран. Дополнительную экологическую нагрузку создают отходы промышленных котельных установок, где из-за технологического несовершенства оборудования присутствует высокое содержание несгоревшего углерода, осложняющего процесс комплексной переработки и извлечения ценных компонентов. Существенная часть производственных и потребительских отходов может быть интегрирована в замкнутый производственный цикл многократного использования. При этом качество переработанного вторичного сырья нередко достигает уровня первичных материалов, а в отдельных случаях демонстрирует превосходящие характеристики. Рециклинг отходов способствует оптимизации ресурсопользования и минимизации экологической нагрузки. Современная наука и промышленность активно разрабатывают инновационные способы использования отвалов горных пород и шламов, что отвечает принципам устойчивого развития и помогает эффективно решать вопрос утилизации этих материалов. В данной работе исследовалась зависимость скорости разрушения гранул породы углеобогащения АО ЦОФ «Березовская», образующаяся на различных стадиях обогащения от объема подаваемых капель, соотношения и скорости подачи выщелачивающих компонентов. Сравнительный анализ пород показал, что БФ-5 имеет более низкую устойчивость к разрушению в сравнении с БФ-4.

**Информация о статье**

Поступила:

30 декабря 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 января 2025 г.

Принята к публикации:

30 января 2025 г.

Опубликована:

12 марта 2025 г.

Ключевые слова:угольные отходы, извлечение,
выщелачивание.

Для цитирования: Белоусова К.О., Винидиктова Ю.А., Золотухина Н.А. Определение устойчивости гранул пород отходов углеобогащения БФ-4 и БФ-5 АО ЦОФ «Березовская» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 1 (167). С. 14-27. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-14-27, EDN: VAFJX

Введение

Современное развитие угольной промышленности характеризуется возрастающей ролью процессов обогащения в производственном цикле. В контексте технологического прогресса и усложнения процессов добычи возникает необходимость совершенствования методов переработки угольного сырья для получения качественного конечного продукта. Рыночная экономика диктует новые стандарты эффективности производства, где ключевым фактором становится не только качество получаемых концентратов, но и экономическая целесообразность извлечения полезных компонентов. Современные реалии требуют оптимизации процессов обогащения путем модернизации существующих предприятий и внедрения инновационных технологических решений. Особого внимания заслуживает проблема переработки техногенных отходов угледобывающей отрасли. При открытом способе добычи образуется 3-5 тонн твердых отходов на тонну добытого угля, при шахтном – 0,2-0,3 тонны. Процесс обогащения дополнительно генерирует 0,15-0,35 тонн отходов на тонну перерабатываемого сырья [1]. Отходы обогащения представляют собой сложный комплекс материалов с содержанием углерода от 3% до 26%. Минеральная составляющая включает преимущественно оксиды кремния, алюминия и железа, суммарное содержание которых превышает 90% [2]. Зольность варьируется в диапазоне 70-88%, а содержание серы составляет 1-4,5% [3]. Перспективным направлением является комплексная переработка отходов углеобогащения. Данный подход позволяет рассматривать отходы как источник вторичного сырья, несмотря на низкую концентрацию ценных компонентов.

Проведенные исследования металлоносности сибирских углей выявили перспективность месторождений на содержание урана, скандия, германия и группы литофильных редких металлов, включая цирконий, гафний, ниобий, тантал и лантаноиды [4]. Исключительные характеристики редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) – от магнитных до люминесцентных свойств – делают их ключевыми компонентами в производстве широкого спектра высокотехнологичных устройств, включая системы альтернативной энергетики и электротранспорт [5-8]. При этом Россия, обладая 15% мировых запасов РЗЭ, практически не имеет собственного производства и вынуждена импортировать необходимые объемы [9]. Особый интерес представляет возможность извлечения редких и РЗЭ из отходов теплоэнергетических

предприятий и обогатительных фабрик. Переработка накопленных угольных шлаков и шламов в Кузбассе является актуальным направлением, способствующим снижению экологической нагрузки на регион. Однако разработка эффективных технологических решений осложняется вариативностью и комплексностью состава угольных отходов.

Физические методы обогащения играют важную роль в извлечении РЗЭ из различных источников. Недавние исследования продемонстрировали различные подходы к обогащению РЗЭ из угля и его отходов. Гравитационное обогащение: данный способ сепарации использует различия в удельном весе минералов как ключевой физической принцип разделения компонентов. Плотности трех распространенных минералов, содержащих РЗЭ, – бастнезита, ксенотима и монацита – находятся в диапазоне 3,9-5,5 г/мл [12]. Лин с соавторами [11] обнаружили, что РЗЭ концентрируются в легких фракциях золы (2,71–2,95 г/мл), а не в тяжелых (>2,97 г/мл), как предполагалось. Хонакер и коллеги [12] подтвердили неэффективность гравитационного обогащения и предложили измельчение породы для извлечения РЗЭ.

Пенная флотация показывает многообещающие результаты в определенных областях применения [13]. Магнитная сепарация, несмотря на концентрацию РЗЭ в магнитных фракциях, часто дает непрактично низкие показатели извлечения массы. При уменьшении размера частиц повышается концентрация РЗЭ, особенно легких. РЗЭ преимущественно накапливаются в мелких немагнитных фракциях [14, 15].

Среди методов обогащения преимущество отдается гидрометаллургическим процессам, обеспечивающим высокую степень разделения компонентов. Их главное достоинство заключается в возможности достижения практически полного разделения компонентов. Эффективность процесса выщелачивания определяется множеством факторов, включая степень измельчения рудных минералов. Стандартная крупность измельчения составляет 0,1-0,2 мм. На качество извлечения элементов влияют состав материала, тип минеральных связей, концентрация реагентов, характеристики твердых частиц и технологические параметры оборудования. Различные методы выщелачивания имеют свои особенности. Перколяционный процесс может длиться продолжительное время, тогда как кучное выщелачивание демонстрирует экономическую эффективность, снижая затраты в 2,5 раза по сравнению с автоклавным методом. Важным аспектом является селективность процесса – некоторые примеси (кремнезем, свинец,

Таблица 1. Зависимость разрушения гранул пород БФ-4 от объема подачи капель H_2SO_4 и H_2O
 Table 1. Dependence of the destruction of BF-4 rock granules on the volume of H_2SO_4 and H_2O droplets supplied

БФ-4, H_2O							
№	1	2	3	4	5	6	7
d, см	1,20	1,00	1,20	1,00	1,10	1,10	1,20
m, г	1,003	0,617	1,079	0,65	0,876	0,878	1,161
Конец влагопоглощения, мл	0,21	0,10	0,21	0,10	0,21	0,17	0,17
Разрушение, мл	0,79	0,62	0,66	3,17	2,76	2,66	1,90
БФ-4, 0,05M H_2SO_4							
№	1	2	3	4	5	6	7
d, см	1,10	1,00	1,20	1,10	1,20	1,00	1,20
m, г	0,762	0,665	1,206	0,958	1,244	0,742	1,58
Конец влагопоглощения, мл	0,28	0,10	0,14	0,28	0,48	0,14	0,17
Разрушение, мл	0,45	1,66	2,00	6,90	0,66	0,38	5,38
БФ-4, 0,1M H_2SO_4							
№	1	2	3	4	5	6	7
d, см	1,20	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,10
m, г	0,828	0,801	0,675	0,698	0,699	0,756	1,063
Конец влагопоглощения, мл	0,14	0,28	0,07	0,07	0,10	0,17	0,21
Разрушение, мл	1,93	0,45	4,48	0,38	1,66	2,38	4,83

Таблица 2. Зависимость разрушения гранул пород БФ-5 от объема подачи капель H_2SO_4 и H_2O
 Table 2. Dependence of the destruction of BF-5 rock granules on the volume of H_2SO_4 and H_2O droplets supplied

БФ-5, H_2O					
№	1	2	3	4	5
d, см	1,20	1,20	1,10	1,20	1,10
m, г	0,787	0,848	0,681	1,030	0,833
Конец влагопоглощения, мл	0,62	0,69	0,52	0,62	0,34
Разрушение, мл	1,07	0,86	0,69	1,21	4,48
БФ-5, 0,05M H_2SO_4					
№	1	2	3		
d, см	1,20	1,10	1,10		
m, г	0,737	0,685	0,718		
Конец влагопоглощения, мл	0,21	0,28	0,24		
Разрушение, мл	0,52	0,62	0,52		
БФ-5, 0,1M H_2SO_4					
№	1	2	3	4	
d, см	1,20	1,20	1,10	1,20	
m, г	1,012	0,891	0,691	1,074	
Конец влагопоглощения, мл	0,38	0,41	0,38	0,38	
Разрушение, мл	0,72	4,10	0,62	0,69	

кальций) практически не переходят в раствор, в то время как соединения железа, меди и других металлов образуют растворимые соединения. Управление скоростью реакций позволяет

частично контролировать этот процесс. Комбинирование выщелачивания с другими методами обогащения (магнитными, гравитационными) существенно расширяет

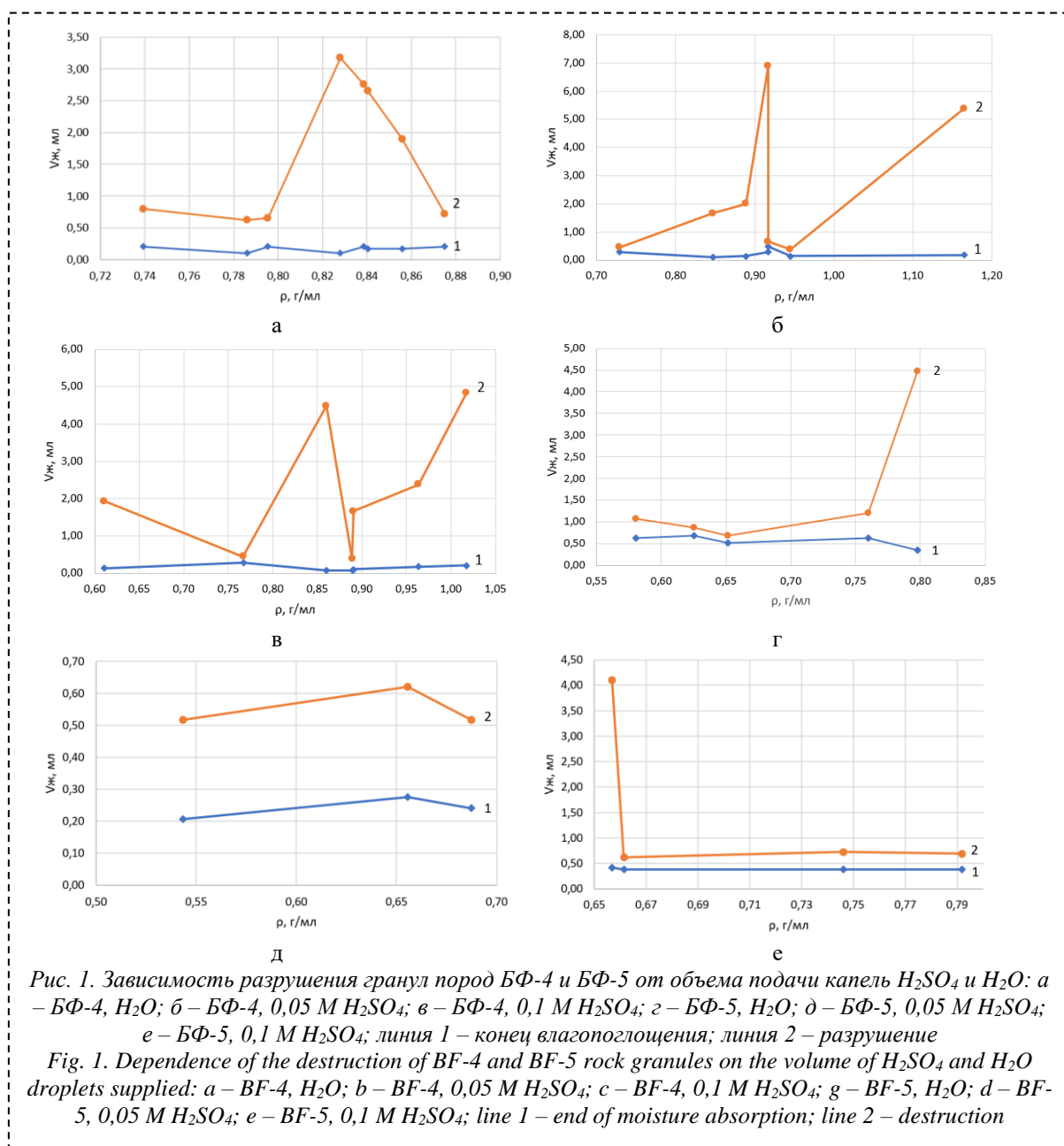


Рис. 1. Зависимость разрушения гранул пород БФ-4 и БФ-5 от объема подачи капель H_2SO_4 и H_2O : а – БФ-4, H_2O ; б – БФ-4, 0,05 M H_2SO_4 ; в – БФ-4, 0,1 M H_2SO_4 ; г – БФ-5, H_2O ; д – БФ-5, 0,05 M H_2SO_4 ; е – БФ-5, 0,1 M H_2SO_4 ; линия 1 – конец влагопоглощения; линия 2 – разрушение

Fig. 1. Dependence of the destruction of BF-4 and BF-5 rock granules on the volume of H_2SO_4 and H_2O droplets supplied: а – BF-4, H_2O ; б – BF-4, 0,05 M H_2SO_4 ; в – BF-4, 0,1 M H_2SO_4 ; г – BF-5, H_2O ; д – BF-5, 0,05 M H_2SO_4 ; е – BF-5, 0,1 M H_2SO_4 ; line 1 – end of moisture absorption; line 2 – destruction

возможности переработки. Каждый подход демонстрирует уникальные преимущества и ограничения [16].

Методы и результаты

Объектом данного исследования являлись отходы углеобогащения АО «ЦОФ Березовская», г. Березовский. Для выполнения эксперимента проводились следующие испытания. После стадии грануляции [1, 2], где для получения гранул вместо 92% масс. серной кислоты использовалась 65% масс., образцы подвергались обжигу при 350°C в течение 90 мин. Получены материалы гранул пород отходов углеобогащения БФ-4 и БФ-5 диаметром 0,6-1,2 см с массой 0,163-1,580 г. В качестве выщелачивающего реагента использовали серную кислоту (H_2SO_4) с концентрациями 0,05 и 0,1 M и воду (H_2O) (в соотношении Т:Ж÷1:4 и

1:10, объема капель и скорости подачи раствора). Исследования выполнялись при 298 K и 0,1 МПа.

Испытания:

1. Зависимость разрушения гранул пород БФ-4 и БФ-5 от объема подачи капель H_2SO_4 и H_2O . Гранулы диаметром и массой, данные которых приведены в Таблицах 1 и 2, смачивали водой и серной кислотой путем подачи капель (15 капель=1мл) с помощью пипетки Пастера до полного их разрушения.

Графическая зависимость плотности гранул от объема раствора (Рис. 1, а-е) практически не позволяет выявить взаимосвязь их разрушения. Можно отметить, что на конец влагопоглощения перед началом разрушения гранул расход растворов приходится в среднем 0,10-0,28 мл – БФ-4, а БФ-5 – 0,21-0,60 мл, и свод данных более равномерно распределяется в графической

Таблица 3. Зависимость данных начала и конца разрушения гранул пород БФ-4 и БФ-5 от соотношения выщелачивающих растворов (H_2SO_4 и H_2O) Т:Ж÷1:4
 Table 3. Dependence of the data on the beginning and end of the destruction of BF-4 and BF-5 rock granules on the ratio of leaching solutions (H_2SO_4 and H_2O) T:F÷1:4

БФ-4, H_2O										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	1,20	1,10	0,90	1,10	1,00	0,90	1,00	1,10	1,00	1,00
m, г	0,703	0,564	0,383	0,704	0,590	0,432	0,633	0,848	0,662	0,692
$V_{ж}$, мл	5,42	3,45	2,28	3,45	3,14	2,28	3,14	3,45	3,14	3,14
Начало, с	35	23	55	28	28	24	20	61	9	39
Конец, с	51	31	55	53	39	28	56	159	86	56
БФ-4, 0,05M H_2SO_4										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	1,00	0,94	1,10	0,90	0,87	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90
m, г	0,457	0,473	0,779	0,435	0,438	0,421	0,525	0,528	0,547	0,604
$V_{ж}$, мл	3,14	2,61	3,45	2,28	2,09	1,93	2,28	2,28	2,28	2,28
Начало, с	21	28	25	33	49	45	29	108	24	43
Конец, с	284	332	24	158	43	486	52	35	75	54
БФ-4, 0,1M H_2SO_4										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	1	1,1	0,9	1,1	0,83	0,9	0,84	0,81	0,91	0,82
m, г	0,526	0,731	0,429	0,785	0,353	0,467	0,39	0,375	0,539	0,422
$V_{ж}$, мл	3,14	3,45	2,28	3,45	1,79	2,28	1,86	1,67	2,37	1,73
Начало, с	23	16	12	16	22	58	26	18	16	22
Конец, с	31	16	73	16	40	64	95	26	77	363
БФ-5, H_2O										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	0,95	0,9	0,9	0,86	0,93	0,8	0,77	0,93	0,9	0,9
m, г	0,372	0,32	0,397	0,355	0,453	0,309	0,284	0,519	0,502	0,523
$V_{ж}$, мл	2,69	2,28	2,28	1,99	2,53	1,60	1,43	2,53	2,28	2,28
Начало, с	2	11	2	10	10	11	8	7	17	14
Конец, с	16	16	13	18	11	20	16	13	31	25
БФ-5, 0,05M H_2SO_4										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	1,00	0,95	0,93	0,98	0,85	0,85	0,97	0,9	0,87	0,86
m, г	0,505	0,44	0,422	0,506	0,341	0,362	0,56	0,452	0,436	0,466
$V_{ж}$, мл	3,14	2,69	2,53	2,95	1,93	1,93	2,87	2,28	2,06	1,99
Начало, с	9	10	20	7	10	13	9	9	13	17
Конец, с	12	53	29	15	23	24	11	20	197	38
БФ-5, 0,1M H_2SO_4										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	1	0,5	0,95	1	1	1	0,9	1	0,95	0,88
m, г	0,703	0,611	0,405	0,579	0,611	0,389	0,466	0,523	0,448	0,457
$V_{ж}$, мл	3,14	2,69	2,69	3,14	3,14	3,14	2,28	3,14	2,69	2,14
Начало, с	15	15	9	7	17	10	10	10	8	7
Конец, с	40	22	42	10	52	13	12	42	11	22

зависимости (линия 1), чем на конец разрушения гранул (линия 2).

Согласно данным, наибольший объем выщелачивающего агента – воды (Рис. 1, а) на разрушения гранул породы БФ-4 приходится на значение плотности в интервале 0,80-0,83 г/мл, 0,05 M H_2SO_4 (Рис. 1, б) – 0,89-0,92 г/мл, 0,1 M H_2SO_4 (Рис. 3, в) – 0,77-0,86 г/мл. Для разрушения гранул породы углеобогащения БФ-5 наибольший объем воды приходится на значение их плотности 0,76-0,80 г/мл, 0,05 M и 0,1 M H_2SO_4 – 0,66 г/мл. Из приведенных данных видно, что наибольший объем раствора для

разрушения гранул приходится на 0,05 M H_2SO_4 – БФ-4, БФ-5 – вода.

2. Зависимость данных разрушения гранул пород БФ-4 и БФ-5 от соотношения выщелачивающих растворов (H_2SO_4 и H_2O) Т:Ж÷1:4 и 1:10 и времени приведены в Таблицах 3 и 4 соответственно. Для проведения эксперимента определяли физические параметры образцов – диаметр и массу. Далее гранулы помещали в бюксы и с помощью цилиндра отмеряли определенный объем раствора из расчета их диаметра. После внесения раствора фиксировали время начала и конца разрушения гранул.

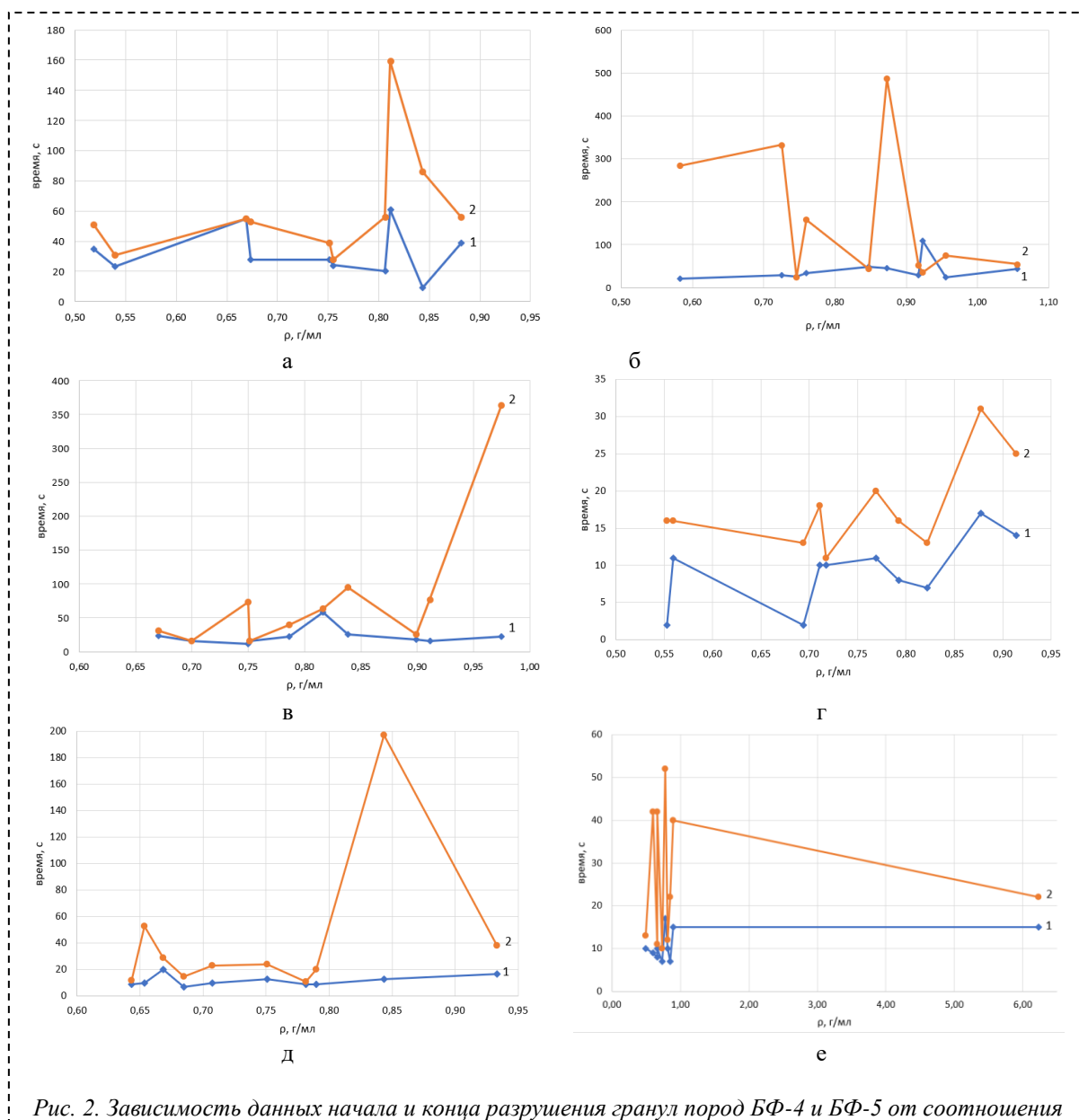


Рис. 2. Зависимость данных начала и конца разрушения гранул пород БФ-4 и БФ-5 от соотношения выщелачивающих растворов (H_2SO_4 и H_2O) $T:Ж \div 1:4$: а – БФ-4, H_2O ; б – БФ-4, 0,05 М H_2SO_4 ; в – БФ-4, 0,1 М H_2SO_4 ; г – БФ-5, H_2O ; д – БФ-5, 0,05 М H_2SO_4 ; е – БФ-5, 0,1 М H_2SO_4 ; линия 1 – начало разрушения; линия 2 – конец разрушения

Fig. 2. Dependence of the data on the beginning and end of the destruction of BF-4 and BF-5 rock granules on the ratio of leaching solutions (H_2SO_4 and H_2O) $S:L \div 1:4$: а – BF-4, H_2O ; б – BF-4, 0,05 М H_2SO_4 ; в – BF-4, 0,1 М H_2SO_4 ; г – BF-5, H_2O ; д – BF-5, 0,05 М H_2SO_4 ; е – BF-5, 0,1 М H_2SO_4 ; line 1 – beginning of destruction; line 2 – end of destruction

Результаты графической зависимости (РИС. 2, А-Е И Рис. 3, а-е) плотности гранул от времени для начала (линия 1) и конца их разрушения (линия 2) также не позволили выявить какой-либо закономерности. Согласно данным можно увидеть, что интервал начала разрушения гранул в воде при $T:Ж \div 1:4$ для БФ-4 составляет 9-61 с, а для БФ-5 – 2-17 с. В 0,05 М растворе H_2SO_4 начало разрушения гранул БФ-4 приходится на 21-49 с, а БФ-5 – 9-61 с, а в более концентрированном – 0,1 М H_2SO_4 – БФ-4 – 12-86 с, БФ-5 – 7-17 с. Интервал начала разрушения

гранул в воде при $T:Ж \div 1:10$ для БФ-4 составляет 31-303 с, а для БФ-5 – 8-17 с. В 0,05 М растворе H_2SO_4 начало разрушения гранул БФ-4 приходится на 23-213 с, а БФ-5 – 2-86 с, а в более концентрированном – 0,1 М H_2SO_4 – БФ-4 – 21-157 с, БФ-5 – 2-108 с.

Данные показывают, что в воде разрушение гранул достигается за более короткий промежуток времени для пород БФ-4 и БФ-5. По отношению к серной кислоте гранулы более устойчивы, при сравнении их концентрации скорость разрушения гранул в 0,1 М растворе

Таблица 4. Зависимость данных начала и конца разрушения гранул пород БФ-4 и БФ-5 от соотношения выщелачивающих растворов (H_2SO_4 и H_2O) Т:Ж÷1:10
 Table 4. Dependence of the data on the beginning and end of the destruction of BF-4 and BF-5 rock granules on the ratio of leaching solutions (H_2SO_4 and H_2O) T:L÷1:10

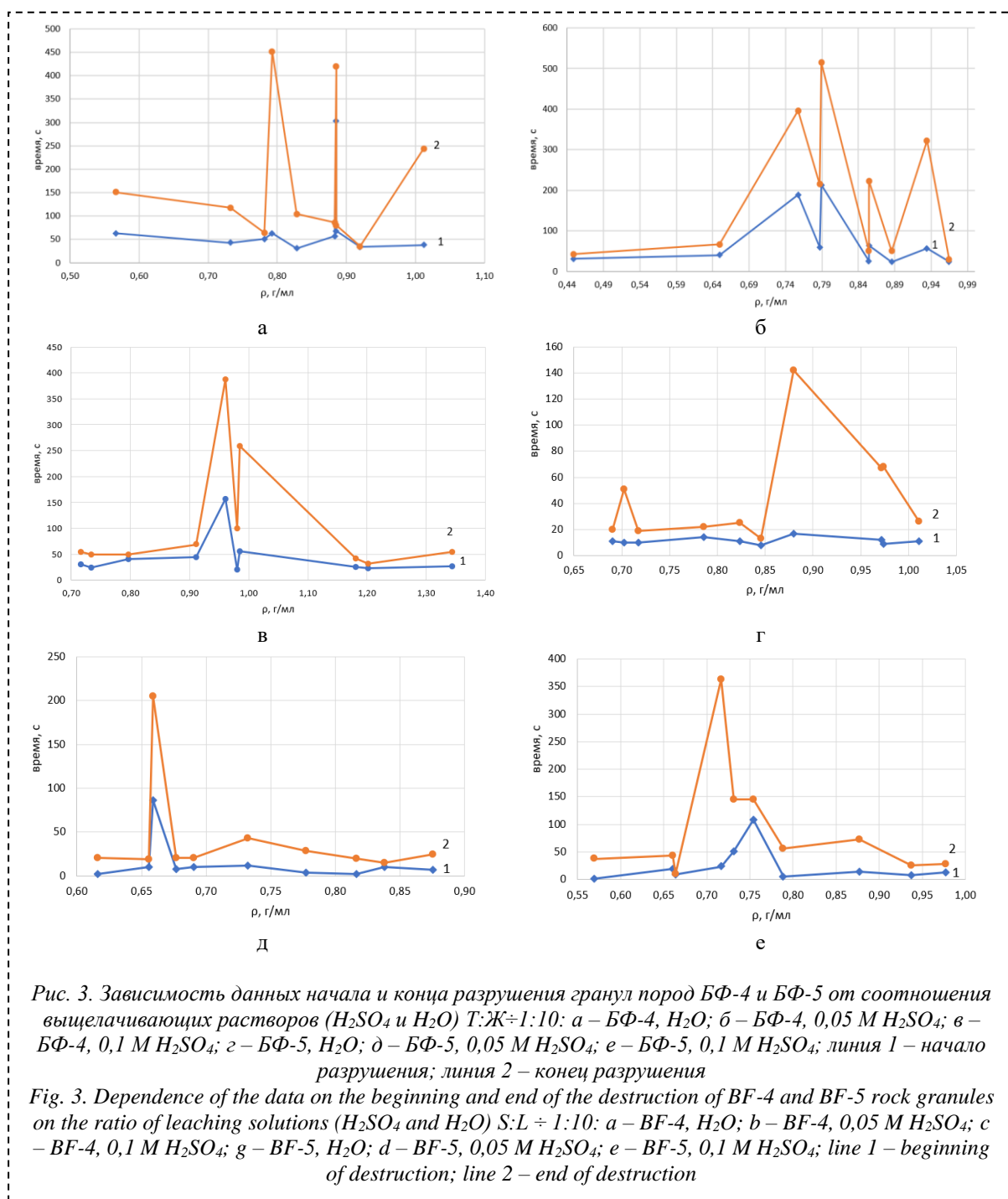
БФ-4, H_2O										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	0,90	0,90	0,80	0,77	0,91	0,92	0,76	0,93	0,89	0,78
m, г	0,324	0,419	0,314	0,284	0,49	0,54	0,305	0,559	0,509	0,377
$V_{ж}$, мл	5,17	5,72	4,01	3,58	5,91	6,11	3,44	6,31	5,53	3,72
Начало, с	63	43	51	63	31	57	303	68	34	38
Конец, с	151	118	64	452	104	86	420	80	35	244
БФ-4, 0,05M H_2SO_4										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	0,95	0,85	0,83	0,86	0,87	0,95	0,9	0,85	0,78	0,93
m, г	0,302	0,313	0,34	0,393	0,408	0,575	0,489	0,427	0,348	0,609
$V_{ж}$, мл	5,72	4,82	4,48	4,99	5,16	6,73	7,85	4,82	3,72	6,31
Начало, с	31	40	189	59	213	25	64	23	57	24
Конец, с	42	66	396	215	515	50	223	50	322	30
БФ-4, 0,1M H_2SO_4										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,00	0,80	0,70	0,80	0,70
m, г	0,288	0,295	0,32	0,366	0,386	0,77	0,396	0,318	0,483	0,362
$V_{ж}$, мл	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	7,85	4,02	2,69	4,02	2,69
Начало, с	31	24	41	45	157	21	56	25	23	27
Конец, с	54	50	49	69	388	100	259	42	32	55
БФ-5, H_2O										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	0,86	0,94	0,77	0,94	1,10	0,95	1,00	0,98	0,85	0,91
m, г	0,485	0,458	0,303	0,635	0,721	0,483	0,617	0,65	0,397	0,598
$V_{ж}$, мл	4,99	6,52	3,58	6,52	10,44	6,73	7,85	7,38	4,82	5,92
Начало, с	12	10	8	9	11	10	14	17	11	11
Конец, с	67	51	13	68	20	19	22	142	25	26
БФ-5, 0,05M H_2SO_4										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	0,95	0,95	0,88	0,85	0,85	0,85	0,90	0,80	1,00	0,90
m, г	0,564	0,493	0,362	0,422	0,316	0,297	0,395	0,328	0,61	0,377
$V_{ж}$, мл	6,73	6,73	5,34	4,82	4,82	4,82	5,72	4,01	7,85	5,72
Начало, с	10	12	8	7	10	2	10	2	4	86
Конец, с	15	43	21	25	19	21	21	20	29	205
БФ-5, 0,1M H_2SO_4										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, см	0,80	0,80	0,72	0,70		0,68	0,63	0,70	0,70	
m, г	0,317	0,288	0,257	0,197	0,265	0,163	0,184	0,203	0,263	0,32
$V_{ж}$, мл	4,02	4,02	2,93	2,69	4,65	2,47	1,96	2,69	2,69	4,82
Начало, с	6	24	15	51	2	20	8	108	13	9
Конец, с	57	363	73	146	38	44	26	145	29	11

чуть больше, чем в 0,05 М растворе серной кислоты. Гранулы при соотношении Т:Ж÷1:4 более подвержены разрушению, чем Т:Ж÷1:10.

3. Зависимость разрушения гранул от скорости подачи выщелачивающего агента (H_2SO_4 и H_2O). Для проведения испытаний использовалась бюретка с краном объемом 25 мл и диаметром 1 см. Интервал падения капель серной кислоты и воды составлял 32 и 42 с. В качестве приемника использовали чашку Петри, на середину которой помещали исследуемый материал. Предварительно регулировали подачу выщелачивающего реагента (20 капель=1 мл).

Результаты данных приведены в Таблице 5, где видно, что для смачивания гранул расходуемый объем растворов практически одинаков. Объем, пошедший на разрушение гранул, чуть отличается, например, для скорости подачи капель воды каждые 32 с для БФ-4 составил 0,80-0,95 мл, для БФ-5 – 0,60-0,90 мл. Для 0,05 М раствора серной кислоты – 0,70-1,55 и 0,50-1,40 мл. Для 0,1 М – 0,60-0,75 и 0,50-0,90 мл. При скорости 42 с для воды 0,65-0,80 и 0,60-0,70 мл, в 0,05 М – 0,35-0,60 и 0,40-0,60 мл, а в 0,1 М – 0,45-1,10 и 0,55-0,75 мл.

Исходя из полученных данных, видно, что при более быстрой подаче 0,05 М раствора



серной кислоты гранулы наиболее устойчивы. На Рис. 4, а-е и Рис. 5, а-е приведены графические зависимости плотности от объема.

Основные результаты и выводы

1. Выявлено, что порода БФ-5 более сильно поддается разрушению по сравнению с БФ-4. Доказано, что объема выщелачивающего реагента на разрушение гранул требуется больше для 0,05 М H_2SO_4 , чем 0,1 М. Соответственно, при действии 0,05 М раствора серной кислоты гранулы углеобогащения наиболее устойчивы.

2. Обнаружено, что гранулы породы углеобогащения БФ-4 при погружении в раствор серной кислоты 0,05 М обильно выделяли

пузырьки газа CO_2 , что говорит о большом содержании карбонатов в образцах, об этом свидетельствуют результаты элементного состава материалов. Анализ показал повышенное содержание кальция и магния в БФ-4 по сравнению с БФ-5.

3. Для получения наилучшей сходимости результатов необходимо в стадии грануляции получить гранулы с одинаковой удельной поверхностью и провести более их равномерный обжиг.

Исследование выполнено за счет гранта Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2022-1194).

Таблица 5. Зависимость разрушения гранул породы БФ-4 и БФ-5 от скорости подачи выщелачивающего агента (H_2SO_4 и H_2O), капля каждые 32 с и 42 с

Table 5. Dependence of the destruction of BF-4 and BF-5 rock granules on the feed rate of the leaching agent (H_2SO_4 and H_2O), a drop every 32 s and 42 s

Капля каждые 32 с				
БФ-4, H_2O				
№	1	2	3	4
d, см	1,00	1,00	1,00	1,00
m, г	0,685	0,686	0,698	0,726
Конец влагопоглощения, мл	0,30	0,40	0,40	0,30
Разрушение, мл	0,80	0,95	0,90	0,95
БФ-4, 0,05M H_2SO_4				
№	1	2	3	4
d, см	1,10	1,00	0,80	0,80
m, г	0,508	0,588	0,325	0,41
Конец влагопоглощения, мл	0,20	0,30	0,20	0,25
Разрушение, мл	0,70	1,10	1,55	0,85
БФ-4, 0,1M H_2SO_4				
№	1	2	3	4
d, см	0,90	0,80	0,70	0,90
m, г	0,438	0,329	0,358	0,83
Конец влагопоглощения, мл	0,20	0,15	0,20	0,30
Разрушение, мл	0,60	0,75	0,60	0,60
БФ-5, H_2O				
№	1	2	3	4
d, см	1,00	1,10	1,00	1,00
m, г	0,506	0,682	0,576	0,632
Конец влагопоглощения, мл	0,25	0,40	0,40	0,40
Разрушение, мл	0,60	0,90	0,70	0,70
БФ-5, 0,05M H_2SO_4				
№	1	2	3	4
d, см	0,9	0,9	0,9	0,9
m, г	0,382	0,406	0,462	0,499
Конец влагопоглощения, мл	0,40	0,45	0,30	0,25
Разрушение, мл	0,60	1,40	0,50	0,75
БФ-4, 0,1M H_2SO_4				
№	1	2	3	4
d, см	0,90	1,10	1,00	0,90
m, г	0,388	0,987	0,728	0,384
Конец влагопоглощения, мл	0,30	0,40	0,30	0,20
Разрушение, мл	0,50	0,90	0,60	0,55
Капля каждые 42 с				
БФ-4, H_2O				
№	1	2	3	4
№	1,00	1,00	1,00	1,00
d, см	0,524	0,587	0,659	0,685
m, г	0,79	0,79	0,79	0,79
Конец влагопоглощения, мл	0,65	0,80	0,70	0,70
БФ-4, 0,05M H_2SO_4				
№	1	2	3	4
d, см	0,90	0,80	0,70	0,70
m, г	0,433	0,368	0,274	0,284
Конец влагопоглощения, мл	0,25	0,20	0,15	0,30
Разрушение, мл	0,45	0,60	0,35	0,60
БФ-4, 0,1M H_2SO_4				
№	1	2	3	4
d, см	0,80	1,00	0,80	0,80
m, г	0,414	0,533	0,353	0,315
Конец влагопоглощения, мл	0,35	0,30	0,10	0,10
Разрушение, мл	1,00	1,10	0,50	0,45

Продолжение таблицы 5.
Continuation of the table 5.

БФ-5, H ₂ O				
№	1	2	3	4
d, см	1,00	1,00	1,00	1,00
m, г	0,471	0,541	0,573	0,65
Конец влагопоглощения, мл	0,30	0,30	0,20	0,30
Разрушение, мл	0,70	0,60	0,60	0,70
БФ-5, 0,05M H ₂ SO ₄				
№	1	2	3	4
d, см	0,90	0,80	0,90	0,80
m, г	0,423	0,366	0,525	0,378
Конец влагопоглощения, мл	0,20	0,15	0,30	0,35
Разрушение, мл	0,45	0,40	0,60	0,60
БФ-5, 0,1M H ₂ SO ₄				
№	1	2	3	4
d, см	1,10	1,10	0,90	0,90
m, г	0,644	0,699	0,401	0,499
Конец влагопоглощения, мл	0,25	0,40	0,30	0,25
Разрушение, мл	0,60	0,75	0,55	0,60

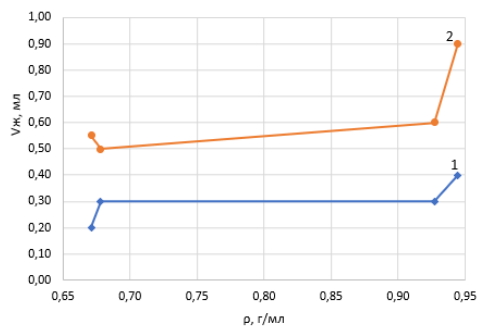
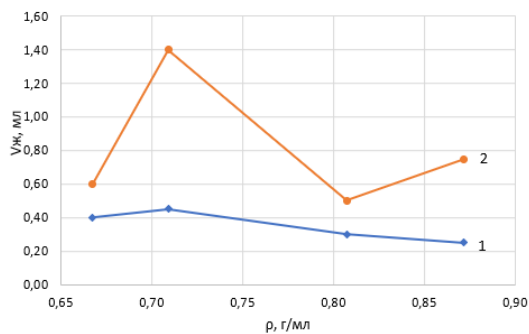
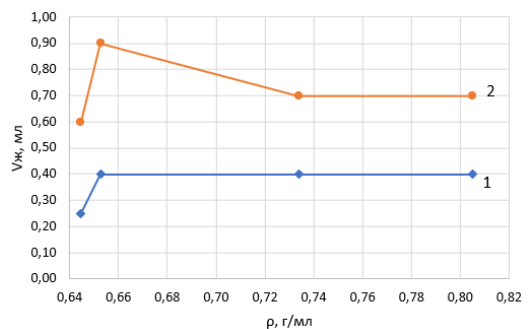
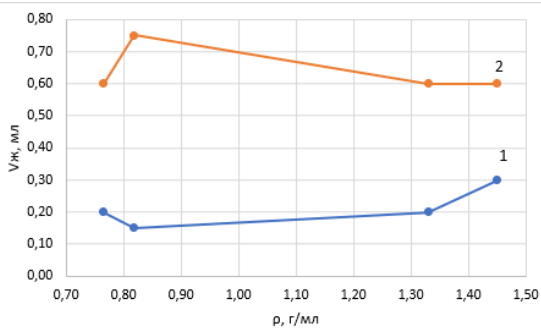
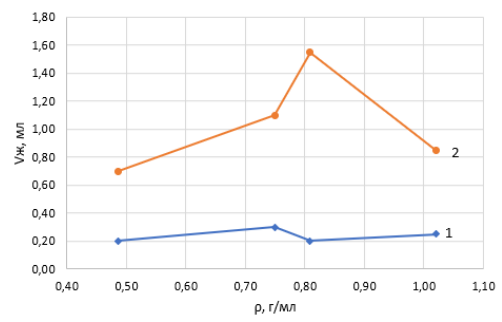
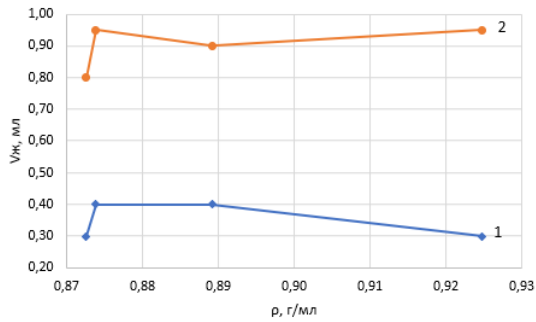


Рис. 4. Зависимость разрушения гранул породы БФ-4 и БФ-5 от скорости подачи выщелачивающего агента (H₂SO₄ и H₂O), капля каждые 32 с: а – БФ-4, H₂O; б – БФ-4, 0,05 M H₂SO₄; в – БФ-4, 0,1 M H₂SO₄; г – БФ-5, H₂O; д – БФ-5, 0,05 M H₂SO₄; е – БФ-5, 0,1 M H₂SO₄; линия 1 – конец влагопоглощения; линия 2 – разрушение
Fig. 4. Dependence of the destruction of BF-4 and BF-5 rock granules on the feed rate of the leaching agent (H₂SO₄ and H₂O), a drop every 32 s: a – BF-4, H₂O; b – BF-4, 0,05 M H₂SO₄; c – BF-4, 0,1 M H₂SO₄; g – BF-5, H₂O; d – BF-5, 0,05 M H₂SO₄; e – BF-5, 0,1 M H₂SO₄; line 1 – end of moisture absorption; line 2 – destruction

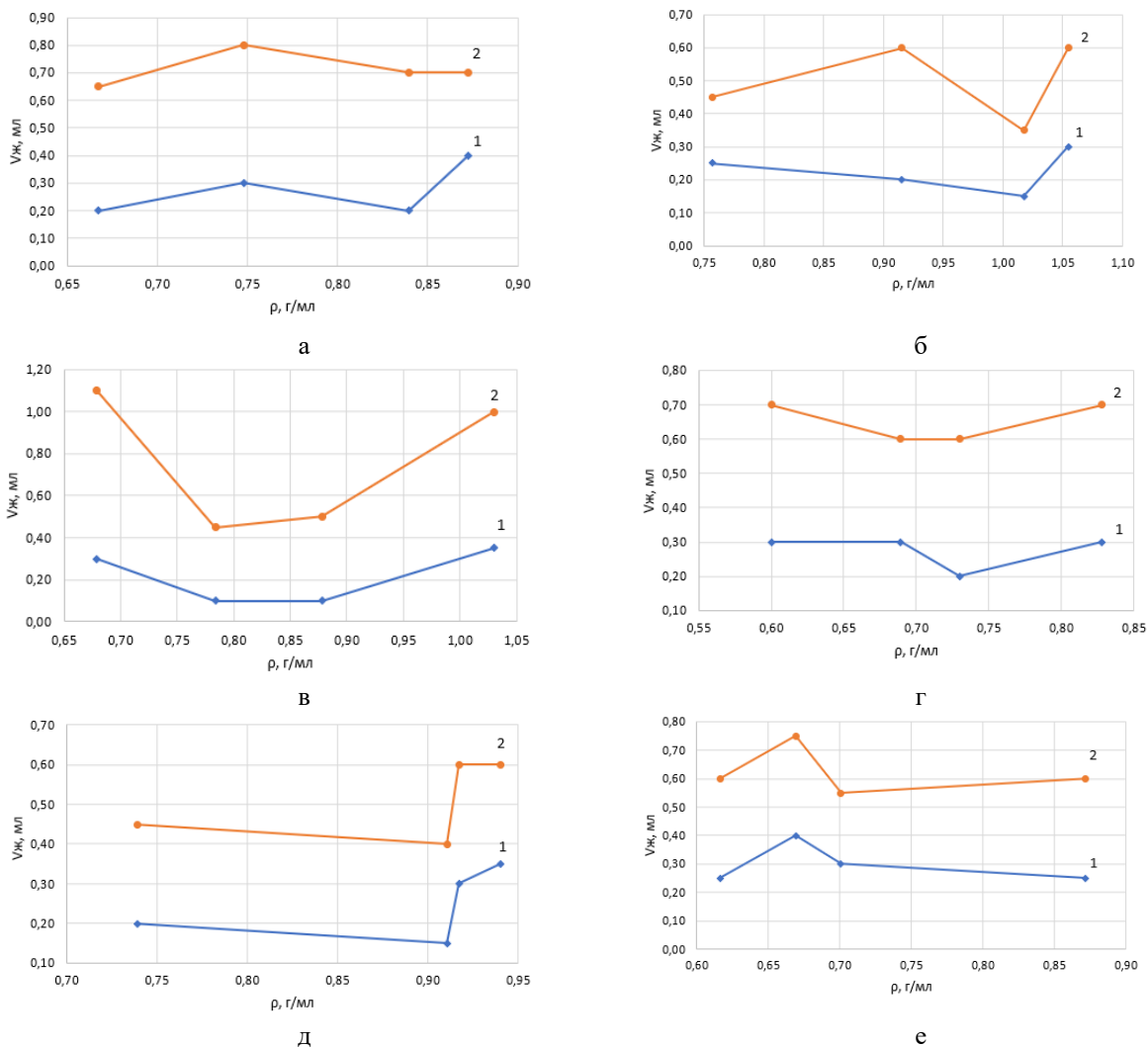


Рис. 5. Зависимость разрушения гранул породы БФ-4 и БФ-5 от скорости подачи выщелачивающего агента (H₂SO₄ и H₂O), капля каждые 42 с: а – БФ-4, H₂O; б – БФ-4, 0,05 М H₂SO₄; в – БФ-4, 0,1 М H₂SO₄; г – БФ-5, H₂O; д – БФ-5, 0,05 М H₂SO₄; е – БФ-5, 0,1 М H₂SO₄; линия 1 – конец влагопоглощения; линия 2 – разрушение

Fig. 5. Dependence of the destruction of BF-4 and BF-5 rock granules on the feed rate of the leaching agent (H₂SO₄ and H₂O), a drop every 42 s: a – BF-4, H₂O; b – BF-4, 0,05 M H₂SO₄; c – BF-4, 0,1 M H₂SO₄; g – BF-5, H₂O; d – BF-5, 0,05 M H₂SO₄; e – BF-5, 0,1 M H₂SO₄; line 1 – end of moisture absorption; line 2 – destruction

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучер Н. А., Шевченко Т. В. Пути утилизации горючих отходов угольной промышленности // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2013. № 2. С. 109–112.
2. Свечникова Н. Ю., Юдина С. В., Мамедалина Н. И. Анализ отходов флотационного обогащения угля // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1(16). С. 19–21.
3. Черкасова Т. Г., Пилин М. О., Баранцев Д. А. [и др.] Некоторые физико-химические характеристики отходов углеобогажительного предприятия ПАО ЦОФ «Березовская» // Уголь. 2023. № 6. С. 80–84. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-

6-80-84.

4. Арбузов С. И. Металлоносность углей Сибири // Изв. ТПУ. 2007. Т. 311. № 1. С. 77–83.
5. Витязь П. [и др.] Применение редкоземельных элементов в технических изделиях // Наука и инновации. 2023. № 6. С. 58–65.
6. Thiruvengadam R. [и др.] Boosting plant resilience: The promise of rare earth nanomaterials in growth, physiology, and stress mitigation // Plant Physiology and Biochemistry. 2024. Vol. 208. DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.108519
7. Reven C.G. и [др.] Comparative Study on Determination of Selected Rare Earth Elements (REEs) in Ion Adsorption Clays Using Handheld LIBS and ICP-MS. // Philipp. J. Sci. 2022. 151(5), P. 1599–1604.

8. Cai H. и [др.] PM-assisted synchronous reluctance machine for electric vehicles // IEEE Trans. Ind. Electron. 2014. Vol. 61. Issue 10. Pp. 5741–5748.

9. Yatsenko V.A. Formation of new rare-earth mineral raw materials sources on the example of the Republic of Sakha (Yakutia) // Interexpo Geo-Sibir. 2021. Vol. 3. Issue 1. Pp. 248–256.

10. Валиев Н. Г. и [др.] Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья иотходов обогащения руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12-1. С. 17–30.

11. Ronghong Lin [и др.] // Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations // Fuel. 2017. Volume 200. Pp. 506–520. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.03.096.

12. Honaker R. [и др.] Laboratory and Bench-Scale Testing for Rare Earth Elements // Lab. Bench-Scale Test. Rare Earth Elem. 2015. P. 538.

13. Yoon R.-H. [и др.] Hydrophobic-hydrophilic separation (HHS) process for the recovery and dewatering of ultrafine coal // SME Annual Conference and Expo: The Future for Mining in a Data-Driven World. 2016. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84988353007&partnerID=MN8TOARS>

14. Blissett R. [и др.] An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content // Fuel. 2014. Vol. 119. Pp. 236–239. DOI:10.1016/j.fuel.2013.11.053

15. James C.H. [и др.] Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash

from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China // International Journal of Coal Geology. 2010. Vol. 81. Issue 4. Pp. 320–332. DOI: 10.1016/j.coal.2009.03.005.

16. Bennet S. T. [и др.] Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12. Issue 3. DOI: 10.1016/j.jece.2024.112769.

17. Echeverry-Vargas L. [и др.] Recovery of light rare earth elements, cerium, lanthanum, and neodymium from alluvial gold mining waste from the Bagre-Nechí mining district in Colombia using acid leaching, oxalate precipitation and calcination // Hydrometallurgy. 2023. Vol. 216. DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.106009.

18. Tang M. [и др.] Study on extraction of rare earth elements from coal fly ash through alkali fusion – Acid leaching // Minerals Engineering. 2019. Vol. 136. P. 36-42. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.01.027

19. Черкасова Т. Г. [и др.] Исследование предела прочности гранульного материала, полученного из отходов углеобогащения // Уголь. 2024. № 11S. С. 33–37.

20. Иванов А. И., Баранцев Д. А. Изучение фракционного состава и предела прочности гранулированного техногенного сырья // Сборник материалов I Международной VII Всероссийской конференции «Химия и химическая технология: достижения и перспективы». Кемерово : КузГТУ, 2024 . С. 1–7.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Белоусова Кристина Олеговна – студентка Института химических и нефтегазовых технологий, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: belousova@kuzstu.ru

Винидиктова Юлия Александровна – канд. техн. наук, доцент Института химических и нефтегазовых технологий, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: vinidiktovaua@kuzstu.ru

Золотухина Наталья Анатольевна – канд. техн. наук, доцент Института химических и нефтегазовых технологий, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: zna.htnv@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Белоусова Кристина Олеговна – сбор и анализ данных, написание текста, выводы.

Винидиктова Юлия Александровна – обзор соответствующей литературы, написание текста.

Золотухина Наталья Анатольевна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DETERMINATION OF STABILITY OF GRANULES OF WASTE ROCKS OF COAL ENRICHMENT BF-4 AND BF-5 OF JC «TSOF BEREZOVSKAYA»

Olesya V. Salishcheva ^{1*}, Yulia V. Tarasova ¹,
Valentina V. Chenskaya ²

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: zna.htnv@kuzstu.ru



Article info

Received:

30 December 2024

Accepted for publication:

22 January 2025

Accepted:

30 January 2025

Published:

12 March 2025

Keywords: coal waste,
extraction, leaching.**Abstract.**

The global growth in energy consumption has stimulated the intensive development of coal mining, which results in the formation of significant volumes of rock dumps and sludge. The accumulation of this waste from the coal mining industry poses important challenges for society: rational use of resources, search for processing methods and environmental protection. Statistical data on the volume of waste from the thermal power sector of leading countries-producers of electricity show that in Russia only a tenth of ash and slag waste is utilized, which is significantly inferior to the indicators of developed countries. An additional environmental burden is created by waste from industrial boiler plants, where, due to technological imperfections of the equipment, there is a high content of unburned carbon, complicating the process of complex processing and extraction of valuable components. A significant part of industrial and consumer waste can be integrated into a closed production cycle of multiple use. At the same time, the quality of recycled secondary raw materials often reaches the level of primary materials, and in some cases demonstrates superior characteristics. Waste recycling helps optimize resource use and minimize environmental impact. Modern science and industry are actively developing innovative ways to use rock waste and sludge, which meets the principles of sustainable development and helps to effectively resolve the issue of recycling these materials. In this paper, the dependence of the destruction rate of rock granules of coal enrichment of JC TsOF "Berezovskaya", formed at various stages of enrichment on the volume of supplied drops, the ratio and feed rate of leaching components was studied. A comparative analysis of rocks showed that BF-5 has a lower resistance to destruction compared to BF-4.

For citation: Belousova C.O., Vinidiktova Yu.A., Zolotukhina N.A. Determination of stability of granules of waste rocks of coal enrichment BF-4 and BF-5 of JC «TSOF Berezovskaya». *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 7(167):14-27. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-14-27, EDN: VAFAX

REFERENCES

1. Kucher N.A., Shevchenko T.V. Ways of recycling combustible waste from the coal industry. *Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry*. 2013; 2:109–112.
2. /Svechnikova N.Yu., Yudina S.V., Mamedalina N.I. Analysis of coal flotation enrichment waste. *Theory and technology of metallurgical production*. 2015; 1(16):19–21.
3. Cherkasova T.G., Pilin M.O., Barantsev D.A. [et al.] Some physicochemical characteristics of waste from the coal preparation plant of PAO TsOF "Berezovskaya". *Coal*. 2023; 6:80–84. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-80-84.
4. Arbutov S.I. Metal content of Siberian coals. *Izvestia TPU*. 2007; 311(1):77–83.
5. Vityaz P. [et al.] Application of rare earth elements in technical products. *Science and Innovation*. 2023; 6:58–65.
6. Thiruvengadam R. [et al.] Boosting plant resilience: The promise of rare earth nanomaterials in growth, physiology, and stress mitigation. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2024; 208. DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.108519.
7. Reven C.G. [et al.] Comparative Study on Determination of Selected Rare Earth Elements (REEs) in Ion Adsorption Clays Using Handheld LIBS and ICP-MS. *Philipp. J. Sci*. 2022; 151(5):1599–1604.
8. Cai H. [et al.] PM-assisted synchronous reluctance machine for electric vehicles. *IEEE Trans. Ind. Electron*. 2014; 61(10):5741–5748.

9. Yatsenko V.A. Formation of new rare-earth mineral raw materials sources on the example of the Republic of Sakha (Yakutia). *Interexpo Geo-Sibir*. 2021; 3(1):248–256.

10. Valiev N. G. [et al.] Practice of application of leaching of metals from substandard raw materials and ore beneficiation waste. *Mining information and analytical bulletin*. 2023; 12-1:17–30.

11. Ronghong Lin [et al.] Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations. *Fuel*. 2017; 200:506–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.096>.

12. Honaker R. [et al.] Laboratory and Bench-Scale Testing for Rare Earth Elements. *Lab. Bench-Scale Test. Rare Earth Elem.* 2015. P. 538.

13. Yoon R.-H. [et al.] Hydrophobic-hydrophilic separation (HHS) process for the recovery and dewatering of ultrafine coal. *SME Annual Conference and Expo: The Future for Mining in a Data-Driven World*. 2016. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84988353007&partnerID=MN8TOARS>

14. Blissett R. [et al.] An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content. *Fuel*. 2014; 119:236–239. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.11.053.

15. James C.H. [et al.] Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash

from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China. *International Journal of Coal Geology*. 2010; 81(4):320–332. DOI: 10.1016/j.coal.2009.03.005.

16. Bennet S. T. [et al.] Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024; 12(3). DOI: 10.1016/j.jece.2024.112769.

17. Echeverry-Vargas L. [et al.] Recovery of light rare earth elements, cerium, lanthanum, and neodymium from alluvial gold mining waste from the Bagre-Nechí mining district in Colombia using acid leaching, oxalate precipitation and calcination. *Hydrometallurgy*. 2023; 216. DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.106009.

18. Tang M. [et al.] Study on extraction of rare earth elements from coal fly ash through alkali fusion – Acid leaching. *Minerals Engineering*. 2019; 136:36–42. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.01.027.

19. Cherkasova T.G. [et al.] Study of the tensile strength of granular material obtained from coal enrichment waste. *Ugol*. 2024; 11S:33–37.

20. Ivanov A.I., Barantsev D.A. Study of fractional composition and tensile strength of granulated technogenic raw materials. Collection of materials of the I International VII All-Russian Conference "Chemistry and chemical technology: achievements and prospects". Kemerovo: KuzGTU; 2024.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Christina O. Belousova – Student of Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: belousova@kuzstu.ru

Yuliya A. Vinidiktova – C. Sc. in Engineering, Associate Professor of Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: vinidiktovava@kuzstu.ru

Natalia A. Zolotukhina – C. Sc. in Engineering, Associate Professor of Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: zna.htnv@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Christina O. Belousova – data collection and analysis, writing the text, conclusions.

Yuliya A. Vinidiktova – review of relevant literature, writing the text.

Natalia A. Zolotukhina – formulation of a research task, scientific management, conceptualization of research, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

