

Обработка водоугольной суспензии электрическими импульсными разрядами

М.Ю. Журков^{1,*}, С.Ю. Дацкевич¹, В.И. Мурко², В.И. Карпенко², А.А. Бухаркин¹, А.С. Юдин¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

*zhurkov@tpu.ru

Аннотация. Работа посвящена развитию научно-технологических основ получения водоугольных суспензий (ВУС) с новыми технологическими и техническими характеристиками. Получение водоугольных суспензий с требуемыми структурно-реологическими и теплофизическими параметрами возможно путём комплексной обработки исходного материала (уголь, угольный шлам), для этого нами предлагается после механохимической обработки угля производить дополнительную обработку полученной суспензии электрическими импульсными разрядами. Результаты экспериментов показали, что при электроимпульсной обработке разных водоугольных суспензий был выделен синтез-газ, а их технологические параметры могут быть улучшены.

Ключевые слова: уголь, водоугольная суспензия, электроимпульсный способ, разряд, синтез-газ.

1. Введение

Объемы потребления угля в различных отраслях мировой экономики из года в год повышаются. При этом и в России, и в мире растет интерес к высокоэффективному использованию угля, как в энергетике, так и в направлении его глубокой переработки. Специалисты многих стран в перспективе прогнозируют увеличение потребления угля в общем энергетическом балансе. Прогнозируется также постепенный переход от чисто энергетического к энерготехнологическому и энергохимическому применению углей. Значительная доля перерабатываемых углей в будущем может быть представлена российским сырьем в силу его высокого качества и значительных запасов [1].

С повышением количества сжигаемого угля увеличивается и интенсивное загрязнение окружающей среды. Основными и наиболее значимыми загрязнителями являются оксиды азота (NO_x), оксиды серы/сернистый газ (SO_x), углекислый газ (CO_2) и твердые частицы углерода (С). Очевидно, что дальнейшее увеличение или сохранение на достигнутом уровне производимой энергии за счет сжигания угля невозможно без разработки и внедрения эффективных способов снижения негативного воздействия на окружающую среду при использовании данного вида топлива [2]. Одним из решений по снижению отрицательного воздействия угля на окружающую среду является использование водоугольного топлива, что позволяет в 1.5–3.5 раза снизить вредные выбросы в атмосферу [3].

В этой связи повышенное внимание уделяется водоугольным суспензиям (ВУС), причем точки зрения их применения не только в теплоэнергетике, но и в направлении глубокой переработки угля с выработкой синтез-газа. Особый интерес представляет использование ВУС, получаемых из отходов добычи и обогащения угля, объем накоплений которых на отвалах в России оценивается в 10–11 млрд. т. [4]. Вовлечение в энерготехнологическое использование больших объемов угля и угольных шламов требует разработки новых технологических процессов и управления этими процессами. В этой связи приобретают актуальность как процессы получения ВУС с новыми технологическими и техническими характеристиками, так и исследования в направлении разработки новых способов переработки ВУС и создания действующих образцов оборудования для нетопливного использования ВУС [5, 6]. При этом получение ВУС с заданными структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками возможно путём комплексной

обработки исходного материала (уголь, угольный шлам), что может существенно расширить область применения ВУС.

На основании существующих научных и практических результатов по электроимпульсному (ЭИ) разрушению горных пород и искусственных материалов известно, что разряд при электроимпульсном воздействии ориентируется по границам неоднородностей, что позволяет создавать технологии разделения и обогащения полезных ископаемых. Ранее было показано, что коэффициенты образования легких чистых фракций угля и тяжелых отходов при ЭИ дроблении угля выше, чем при механической обработке [7]. Нами в данной работе с целью получения ВУС с заданными характеристиками предлагается производить комбинированную обработку угля механохимическим и ЭИ воздействиями.

2. Экспериментальная установка

При реализации многофакторного воздействия на первом этапе нами производилась механохимическая обработка угля с целью получения ВУС для дальнейшей обработки разрядами. Для этого использован вибростенд типа СВУ-2, в котором возможно осуществлять как перемешивание (в смесительной камере), так и измельчение (в помольной емкости) исходных компонентов суспензионного угольного топлива. Технические характеристики вибростенда СВУ-2 представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Характеристики вибростенда СВУ-2.

	Элемент рабочего органа	
	Смеситель	Помольная емкость
Объем, л	3	4
Загрузка мелющими телами, % от объема	–	70–75
Объем загружаемого материала, л (кг)	2.5 (3)	1.0 (1.25)
Мелющие тела (стержни), шт	–	22

При приготовлении ВУС из угля в помольную емкость вибростенда загружали исходный материал (уголь), водопроводную воду и пластифицирующую добавку. Общая масса загружаемых компонентов составляла 1000 г. Продолжительность измельчения определяли визуально по достижению однородной консистенции суспензии (отсутствию комочков, водоотделения и осадка); в среднем время измельчения составляло 5 минут.

После измельчения в помольной емкости отбирали пробы ВУС для анализа на массовую долю твердой фазы, гранулометрический состав и вязкость. Остальную массу заливали в емкости вместимостью 500 мл для наблюдения за статической стабильностью, выявления образования осадка и водоотделения.

Определение структурно-реологических характеристик ВУС производили с использованием ротационного вискозиметра «RHEOTEST» в диапазоне скоростей сдвига от 1.0 до 437.4 с⁻¹ со стандартной системой цилиндров S2. Температура измерений составляла 20 ± 5 °С.

Для последующей обработки ВУС электрическими разрядами нами был разработан электроразрядный стенд, состоящий из генератора Маркса ГИН-250 номинальным напряжением 250 кВ и герметичной разрядной камеры с внутренним диаметром 110 мм. Камера выполнена из полипропилена, снабжена необходимыми патрубками для циркуляции жидкости по замкнутому контуру, манометром для контроля давления в камере и отборником проб газа (Рис. 1).

Объем разрядной камеры вместе с подводными шлангами составлял 4.8 л, при обработке камера была заполнена суспензией полностью. В связи с высокой электропроводностью обрабатываемой ВУС для достижения требуемого технологического

эффекта (электрический пробой ВУС) в качестве электродной системы выбраны стержневые электроды минимальной площади. Один из электродов заземлялся, другой подключался к генератору высоковольтных импульсов. Межэлектродное расстояние составляло 21 мм. Непрерывная циркуляция обрабатываемой жидкости осуществлялась при помощи импеллерного насоса типа Jabsco Junior pumpu 23670-4103 с возможностью подбора оптимальной производительности. Производительность циркуляции жидкости в экспериментах была неизменной и составляла 200 л/ч.

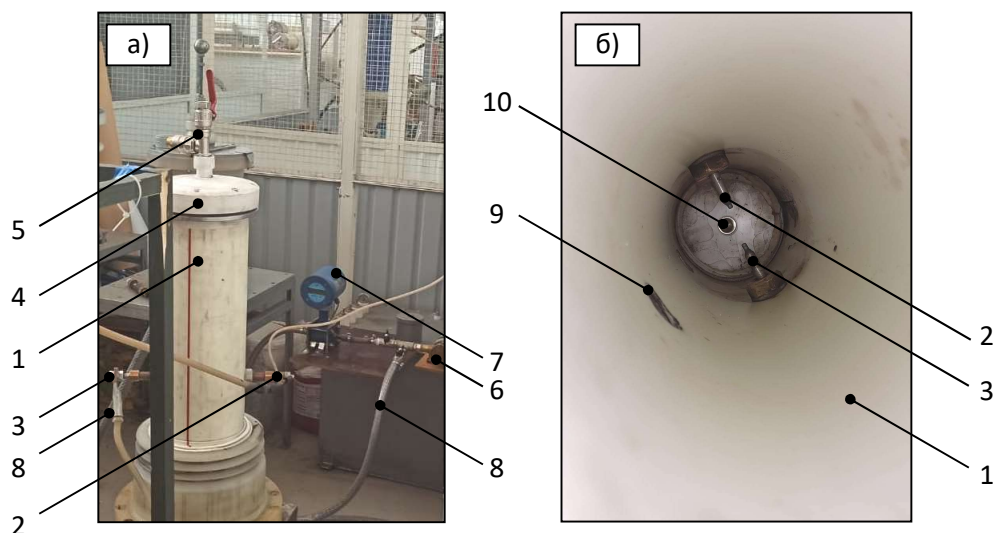


Рис. 1. Электроразрядный стенд для обработки ВУС:

а) общий вид без генератора импульсов, б) разрядная камера вид изнутри, сверху,
 1 – реактор (разрядная камера), 2 – высоковольтный электрод, 3 – заземленный электрод, 4 – герметичная крышка, 5 – устройство для отбора газа и контроля давления, 6 – циркуляционный насос, 7 – расходомер, 8 – подводящие шланги, 9 – нагнетательный патрубок, 10 – сливной патрубок

В ходе ЭИ обработки производилась непрерывная осциллография: пробивного напряжения и времени до пробоя при помощи малоиндуктивного омического делителя импульсного напряжения; разрядного тока при помощи пояса Роговского; измерение частоты следования импульсов, числа импульсов и времени обработки; а также измерение скорости циркуляции ВУС при помощи ультразвукового расходомера. После ЭИ обработки проводили повторное определение структурно-реологических характеристик ВУС. Также сразу после обработки производился отбор газа из рабочей камеры для его анализа, который проводился на газовом хроматографе Agilent 7890А.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Механохимическая обработка

Для экспериментальной обработки механическим способом использовались два материала: уголь марки «Д» Караканского месторождения, обогащенный методом масляной грануляции до зольности 3.4% (проба №1) и кек фильтр-пресса (отход обогащения угля) ОФ «Щедрухинская», обогащенный до зольности 16.6% (проба №2). В качестве масляного агента при обогащении как угля, так и кека фильтр-пресса, использовалось отработанное автомобильное масло. Количество применяемого масляного агента при обогащении составляло 5% от массы твердой фазы в процессе.

Результаты обработки материалов на вибростенде СВУ-2 приведены в Таблице 2. Как видно из характеристик ВУС, исходные образцы существенно различаются по зольности и гранулометрическому составу. При этом вязкость полученных суспензий различается

незначительно, вследствие этого нагрузка на перекачивающий насос при дальнейшей обработке этих материалов в электроразрядной установке была практически одинакова.

Таблица 2. Характеристики ВУС после механохимической обработки.

Номер пробы ВУС (марка угля)		№1 («Д»)	№2 («Ж»)
	0.355–1.0 мм	0.01	0.01
Гранулометрический состав, %	0.250–0.355 мм	0.08	0.04
	0.071–0.250 мм	32.53	5.07
	0–0.071 мм	67.38	94.87
Массовая доля твердой фазы, %		46.2	48.9
Зольность твердой фазы, %		3.4	16.6
Эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с^{-1} , мПа·с		133	119

3.2. Электроимпульсная обработка

ЭИ обработка каждого образца ВУС в разрядной камере осуществлялась в течение 10 минут сериями импульсов с паузами через каждые 2 минуты при частоте импульсов 3–4 имп/с и запасаемой энергии генератора около 400 Дж. В процессе обработки импульсами происходил нагрев ВУС разрядами, кроме того наблюдалось постепенное увеличение давления газа в разрядной камере до 1.6 бар.

На Рис. 2 приведены типичные осциллограммы пробоя ВУС. Как видно из рисунка, в ходе ЭИ обработки в предпробивной стадии наблюдаются существенные потери энергии на токи растекания, также происходит снижение амплитуды воздействующего напряжения вследствие высокой электропроводности обрабатываемой жидкости. Пробивное напряжение ВУС при используемом в экспериментах межэлектродном расстоянии составило $\sim 171 \text{ кВ}$.

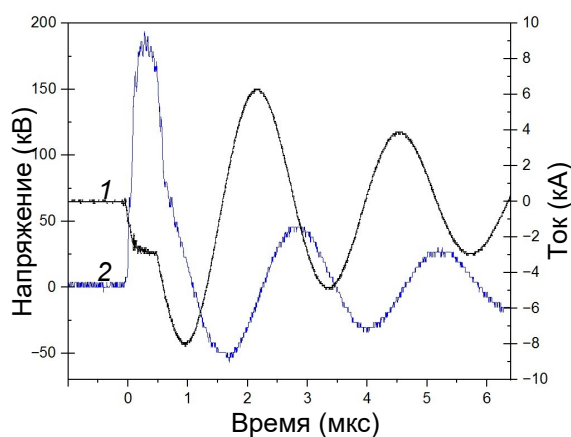


Рис. 2. Типичные осциллограммы тока (1) и напряжения (2) при пробое ВУС.

Полученные характеристики ВУС после ЭИ обработки приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Характеристики ВУС после электроимпульсной обработки.

Номер пробы ВУС (марка угля)		№1 («Д»)	№2 («Ж»)
Количество импульсов, имп.		1382	1384
	0.355–1.0 мм	0.02	0.61
Гранулометрический состав, %	0.250–0.355 мм	0.15	0.61
	0.071–0.250 мм	35.13	3.6
	0–0.071 мм	64.7	95.18
Массовая доля твердой фазы, %		46.25	48.90
Зольность твердой фазы, %		3.4	16.6
Эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с^{-1} , мПа·с		133	119

Результаты анализа проб газа, выделившегося при ЭИ обработке ВУС, представлены в Таблице 4. На Рис. 3 приведена хроматограмма для ВУС из углей Караканского месторождения после серии импульсов 1.2.

Как видно из данных Таблиц 2 и 3, физические характеристики суспензий до и после их ЭИ обработки практически не изменились. При этом, как свидетельствуют данные Таблицы 4, налицо произошедшая химическая реакция, которая выразилась в образовании газа.

Характеристики газа (анализ его химического состава) однозначно свидетельствуют о его «угольном» происхождении. В составе газа, образовавшегося при ЭИ обработке, обнаружены азот и кислород. Очевидно, что эти газы изначально находились в пространстве реакционного объема (в составе воздуха) и поэтому обнаружены в составе газовой фазы в значительном количестве. При достаточно продолжительном времени обработки суспензий электрическими импульсами содержание азота и кислорода в составе газовой фазы должно приблизиться к тем значениям, которые соответствуют содержанию этих элементов в составе органической массы угля.

Таблица 4. Результаты анализа проб газа после электроимпульсной обработки.

Номер пробы ВУС (марка угля)	№1 («Д»)			№2 («Ж»)				
	1.1	1.2	Среднее	2.1	2.2	2.3	Среднее	
Серия импульсов								
	H ₂	52.68	53.9	53.3	50.23	48.6	54.31	51.1
	N ₂ + O ₂	12.9	6.22	9.6	15.5	5.1	6.13	8.9
Содержание газов, %	CO	22.16	24.3	23.2	20.67	23.95	24.23	23.0
	CO ₂	6.31	5.16	5.7	3.9	5.7	5.9	5.2
	CH ₄	0.62	0.74	0.7	0.47	0.7	0.67	0.6
	C ₂ H ₆	0.6	0.56	0.6	–	–	–	–

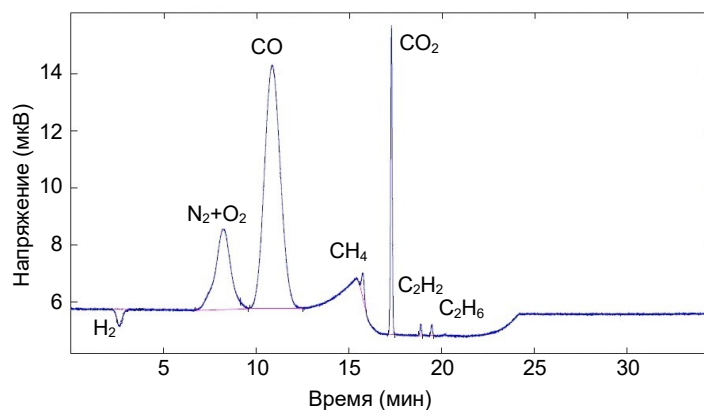


Рис. 3. Хроматограмма пробы выделившегося газа после ЭИ обработки водоугольной суспензии «Д».

Наблюдаемое совпадение характеристик суспензий до и после обработки (зольность и гранулометрический состав) объясняется крайне малым количеством прореагировавшего угля. При объеме суспензии, подвергшемуся ЭИ обработке, 4.8 литра количество образовавшегося газа не превысило 2 граммов, что соответствует десятым долям процента от органической массы угля. Данное значение соответствует пределам ошибки измерений.

Таким образом, видно, что при указанных выше условиях проведения эксперимента практически не установлено изменение органической массы угля.

4. Заключение

Поскольку на основании существующих научных и практических результатов по ЭИ разрушению горных пород и искусственных материалов известно, что разряд ориентируется по границам неоднородностей, а доизмельчения угольных частиц не наблюдалось, следует признать, что при обогащении методом масляной грануляции в концентрат извлекались частички угля или практически без сростков с породой (проба №1), или сростки угольных частиц с породными содержали столь мелкие породные включения, что даже при сравнительно высоких значениях зольности (проба № 2) воздействие электрических разрядов не разрушает связь между углем и породой.

Для проверки этой гипотезы следует провести обработку электрическими разрядами не концентрата, а исходного материала перед проведением обогащения методом масляной грануляции. Характеристики концентрата, полученного после ЭИ обработки, покажут пригодность его для получения водоугольных суспензий с особыми свойствами.

Состав газа, полученного при ЭИ обработке ВУС, показывает, что данный продукт пригоден для использования не только в качестве топлива, но и в качестве сырья для органического синтеза. В дальнейшем необходимо оценить технико-экономические показатели данного процесса.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект 23-29-00728).

5. Список литературы

- [1] V.I. Murko, V.I. Fedyaev, V.I. Karpenok, A.E. Shanshin, A.T. Mukhtarov, On the possibility of using fine coal waste of the processing plant «Energeticheskaya» as a basis for boiler fuel, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, vol. **13**(6), 657, 2020; doi: 10.17516/1999-494X-0254
- [2] R.S. Blissett, N.A. Rowson, A review of the multi-component utilisation of coal fly ash, *Fuel*, vol. **97**, 1, 2012; doi: 10.1016/j.fuel.2012.03.024
- [3] V.I. Murko, V.I. Karpenok, T.P. Belogurova, I.A. Mikhanoshina, Development of technology for integrated utilization of by-products of coal beneficiation, *Ugol' – Russian Coal Journal*, 4, 54, 2017; doi: 10.18796/0041-5790-2017-4-54-59
- [4] M.Ya. Shpirt, E.G. Gorlov, A.V. Shumovskii, Concept of a technological complex for coal waste processing with the production of a wide range of commercial products, *Solid Fuel Chemistry*, vol. **53**, 352, 2019; doi: 10.3103/S0361521919060090
- [5] D.O. Glushkov, S.Yu. Lyrshchikov, S.A. Shevyrev, P.A. Strizhak, Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste, *Energy Fuels*, vol. **30**, 3441, 2016; doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b02881
- [6] D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, L.I. Maltzev, Y.S. Podzharov, Effect of cavitation treatment of coal-water slurries on a droplet average size in a jet, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, vol. **335**(3), 70, 2024; doi: 10.18799/24131830/2024/3/4472
- [7] A.V. Kharlov, Generators for Electric-Discharge Technologies and Their Technical Applications (Review), *Instruments and Experimental Techniques*, vol. **65**(1), 2022; doi: 10.1134/S0020441221060154