

## АСПЕКТЫ ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ИЗ УГОЛЬНОГО ШЛАМА

Вилисов Н.Д., Фадеев П.И., Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р.

ФГАОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,  
Кемерово, e-mail: barom@kuzstu.ru

Целью работы является рассмотрение возможности использования шлама, предоставленного предприятием ООО «ГОФ Анжерская», в качестве водоугольного топлива. В работе проведен технический анализ трех проб угольного шлама: определение зольности, влажности, выхода летучих и высшей теплоты сгорания. В работе был проведен рассев шлама с целью определения гранулометрического состава. Представлены результаты определения задержки зажигания и времени горения водоугольного топлива, состоящего из шлама, влажность которого была доведена до 45-50%. Высокая задержка зажигания косвенно свидетельствует о низкой реакционной способности (высокой энергии активации) водоугольного топлива из шламов, что коррелирует с низкими значениями выхода летучих у представленных образцов. При этом третья проба шлама имеет высокую зольность относительно первой и второй проб шлама, в связи с этим длительность горения третьей пробы шлама значительно превышала время горения других образцов при меньшем объеме испытываемого образца. Полученные результаты показали, что теоретическое использование угольного шлама ООО «ГОФ Анжерская» в качестве водоугольного топлива может быть проблематичным вследствие малого показателя выхода летучих и требует дополнительных испытаний на действующем котле.

**Ключевые слова:** угольный шлам, задержка зажигания, водоугольное топливо, переработка угольных отходов, обогатительная фабрика

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 г. (FZES-2024-0001).*

## ASPECTS OF COAL-WATER FUEL COMBUSTION FROM COAL SLUDGE

Vililov N.D., Fadeev P.I., Ushakov K.Y., Bogomolov A.R.

*T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, e-mail: barom@kuzstu.ru*

The aim of the work is to consider the possibility of using the sludge provided by the Anzherskaya GOF LLC as a coal-water fuel. The paper presents a technical analysis of three samples of coal sludge: determination of ash content, humidity, volatile yield and higher calorific value. The sludge was sifted in order to determine the granulometric composition. The paper presents the results of determining the ignition delay and combustion time of coal-water fuel consisting of sludge, the humidity of which was brought to 45-50%. A high ignition delay indirectly indicates a low reactivity (high activation energy) of coal-water fuel from sludge, which correlates with low values of the volatile yield in the presented samples. At the same time, the third sludge sample has a high ash content, relative to the first and second sludge samples, due to which the combustion duration of the third sludge sample significantly exceeded the combustion time of other samples with a smaller volume of the tested sample. The obtained results showed that the theoretical use of coal sludge from Anzherskaya GOF LLC as a coal-water fuel may be problematic due to the low volatile yield and require additional testing on an operating boiler.

**Keywords:** coal sludge, ignition delay, coal-water fuel

*The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of project No. 075-03-2024-082/2 dated 15.02.2024 (FZES-2024-0001).*

### Введение

Основным сырьём для производства энергии в Кемеровской области – Кузбассе является уголь. Запасы угля в Кузбассе являются одними из самых больших в России, по различным оценкам, общие запасы угля в Кузнецком бассейне составляют от 600 до 700 миллиардов тонн [1], из которых значительная часть пригодна для разработки. Одной из стадий получения из угольного сырья товарного продукта, в том числе экспортного назначения, является обогащение на горно-обогатительных фабриках (далее – ГОФ). При реализации технологии

ГОФ имеются побочные продукты, которые относятся, с одной стороны, к отходам производства, а с другой – представляют потенциал в качестве топливных вторичных энергетических ресурсов. При этом только в одном Кузбассе накапливается около 30 млн тонн угольного шлама [2]. Проблема переработки шламов является важной задачей, так как переполненные шламохранилища или гидротвалы наносят большой вред окружающей среде. Выход шламов на обогатительных предприятиях составляет до 10% [3].

Существует несколько способов переработки угольного шлама [4]: химический, термический и физический способ.

Химическая переработка включает: производство ВУТ [5]; производство удобрений [6].

Метод термической переработки включает: сжигание и газификацию [7]; применение масляной агломерации [8].

Физический способ переработки включает в себя: складирование; использование в качестве стройматериала; обезвоживание и брикетирование [9] и нетермическую сушку мелкодисперсного угля [10].

Преобразование шлама в топливо (ВУТ или брикеты) является перспективным для ГОФ, так как на обогатительных фабриках имеется потребность в тепловой энергии, которая покрывается собственными котельными с котлами со слоевым сжиганием топлива. В данной работе рассматривается возможность сжигания шлама в виде водоугольного топлива (ВУТ). Угольные шламы содержат в себе как органическую, так и минеральную части. Основной проблемой угольных шламов является их высокая зольность (до 50%) и тонкодисперсность (менее 1 мм) [11], что ставит большой вопрос о целесообразности использования их без какой-либо подготовки в качестве топлива для предприятий энергетического комплекса. Обогащение угольных шламов или переработка их в композитное топливо позволит получить ценную топливную продукцию с минимальными затратами и теплотехническими характеристиками, пригодную для эффективного сжигания в энергоустановках.

Согласно изученным источникам [12], сжигание в вихревой адиабатической топке через форсунки суспензионного водоугольного топлива из различных марок углей с добавлением нефти и отработанных масел, метилового и этилового спиртов показало высокую эффективность. Водоугольное топливо из углей разной степени метаморфизма и тонкодисперсных угольных шламов ГОФ, даже с максимально низкими теплотехническими характеристиками, можно использовать в качестве топлива в энергетике [13-15].

**Целью исследования** является изучение возможности использования шлама ООО «ГОФ Анжерская» в качестве водоугольного топлива.

### Материалы и методы исследования

В качестве сырья в работе использовались 3 образца шлама, предоставленные ООО «ГОФ Анжерская».

Результаты технического анализа, выполненного согласно методикам ГОСТ, представлены в таблице 1. Теплота сгорания была получена с использованием калориметра Лесо АС500.

Из таблицы 1 видно, что зольность у шламов 1 и 2 находится на уровне добываемых углей марки Д некоторых месторождений. В связи с этим калорийность данных шламов по высшей теплоте сгорания достаточно высокая, более 5000 ккал. Отметим, что выход летучих веществ у шлама 1 и 2 низкий и составляет 10-14%. Это свидетельствует о том, что процесс горения можно организовать при более высокой температуре в слое колосниковой решетки и в объеме топки. Также отметим, что шлам 3 имеет высокую зольность, более высокую влажность по сравнению со шламами 1 и 2 и низкий выход летучих веществ, на уровне 6%. По этой причине теплота сгорания составляет 2921 ккал. Также по методике ГОСТ был проведен рассев шлама с целью определения гранулометрического состава проб шлама. Результаты представлены на рисунке 1.

По результатам анализа гранулометрического состава всех проб шлама определено, что в образцах 1, 2 и 3 гранулята крупностью менее 160 мкм находится незначительное количество и составляет от 3,1 до 5,7 мас.%. Это свидетельствует о том, что шламы имеют средний по крупности размер зерен. Основное массовое содержание по размеру гранулята находится выше 200 мкм, т.е. более 90 мас.%. Отметим, что размер частиц более 1 мм составляет от 5 до 11 мас.%. Это свидетельствует о том, что горение шламов 1 и 2 в виде водоугольного топлива (ВУТ) может начинаться в объеме топки с размерами частиц менее 160 мкм, а более крупные частицы будут гореть в слое, в котором температура достигает не менее 1200 °С, предварительно прогреваясь при движении в топке от форсунки до горящего слоя на решетке.

Таблица 1

Технический анализ шлама

Образец	Зольность, %	Влажность, %	Выход летучих, %	Теплота сгорания, МДж/кг
Шлам 1	24,45	14,55	10,67	21,16
Шлам 2	22,78	10,92	13,73	23,79
Шлам 3	43,83	17,35	5,90	12,23

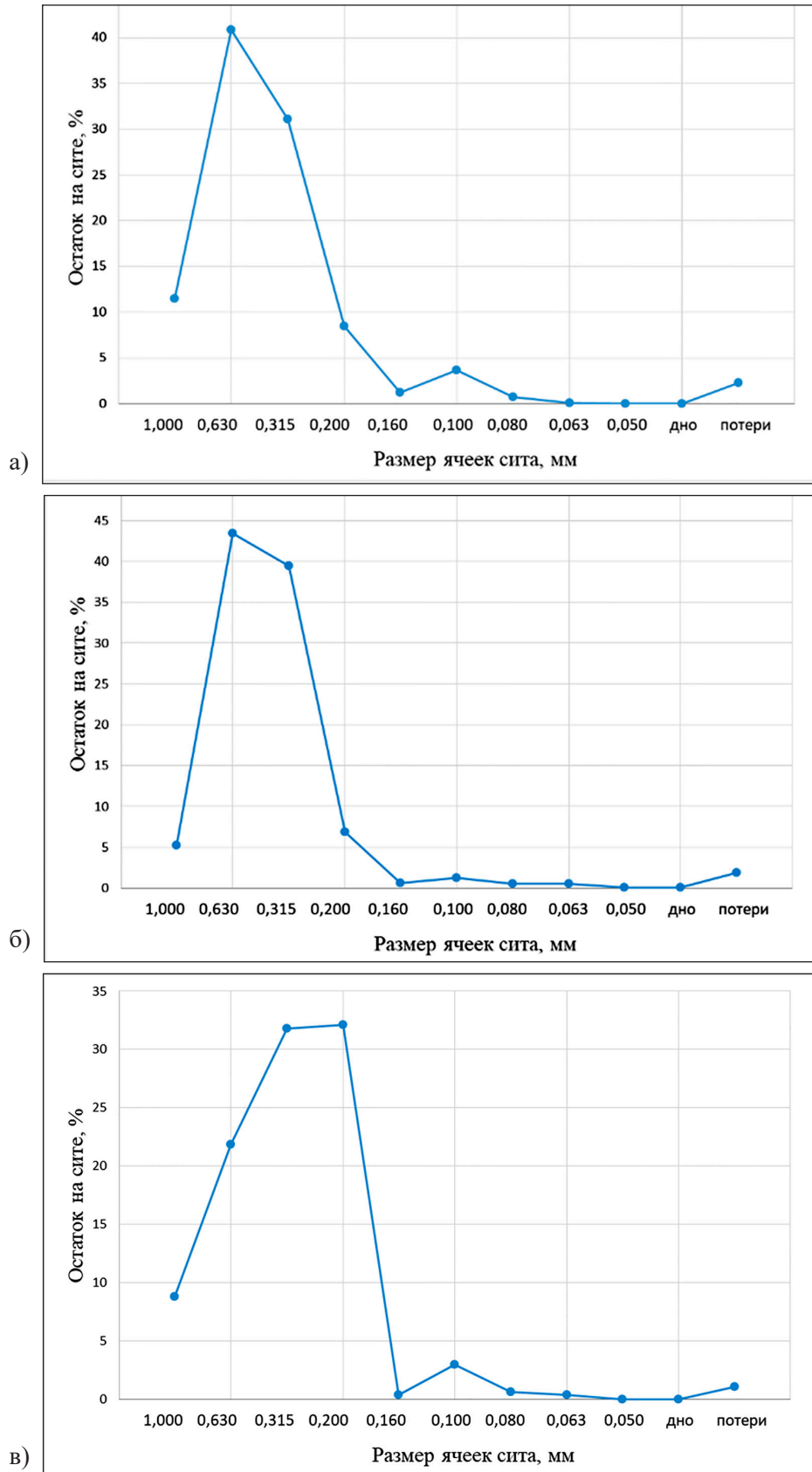


Рис. 1. Гранулометрический состав шлама: а – шлам 1; б – шлам 2; в – шлам 3

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

С целью определения пригодности шлама в качестве ВУТа для котла со слоевой топкой (на котельной ГОФ установлены 3 котла КВМ-1,6 (Гкал/ч) с шурующей планкой) и обоснования предполагаемых условий горения были проведены исследования задержки зажигания. Экспериментальные исследования времени задержки зажигания проводились при температуре 800 °С с использованием установки, состоящей из программируемой муфельной печи Plavka.Pro ПМ-2ПТР, высокоскоростной камеры Photron FASTCAM Mini UX и устройства для подачи образцов в камеру печи. Для исследований были подготовлены образцы ВУТ (смесь воды и шлама) с достижением консистенции ВУТ уровня текучего состояния.

С использованием высокоскоростной камеры Photron FASTCAM Mini UX были получены изображения капелек во время за-

жигания и прекращения горения, которые представлены на рисунке 2.

Как по сохранению формы зольного остатка процесса горения формы капли ВУТ, так и по изображениям на рисунке 2 можно сделать вывод, что горение ВУТа из шлама относится к модели прочного зольного каркаса, описанного авторами в работе [16]. В данной работе были описаны модели горения твердого топлива. Согласно этой модели предполагается, что размер частицы остается постоянной величиной.

После получения из шлама ВУТ, путем добавления в него воды, экспериментальным путем была определена его плотность. Как видно из рисунка 2, размер капли до горения и после горения не изменился. Принимая, что размер капли постоянная величина и зная плотность ВУТ, определили массу капли ВУТ. Результаты определения времени задержки зажигания и длительность горения капелек представлены в таблице 2.

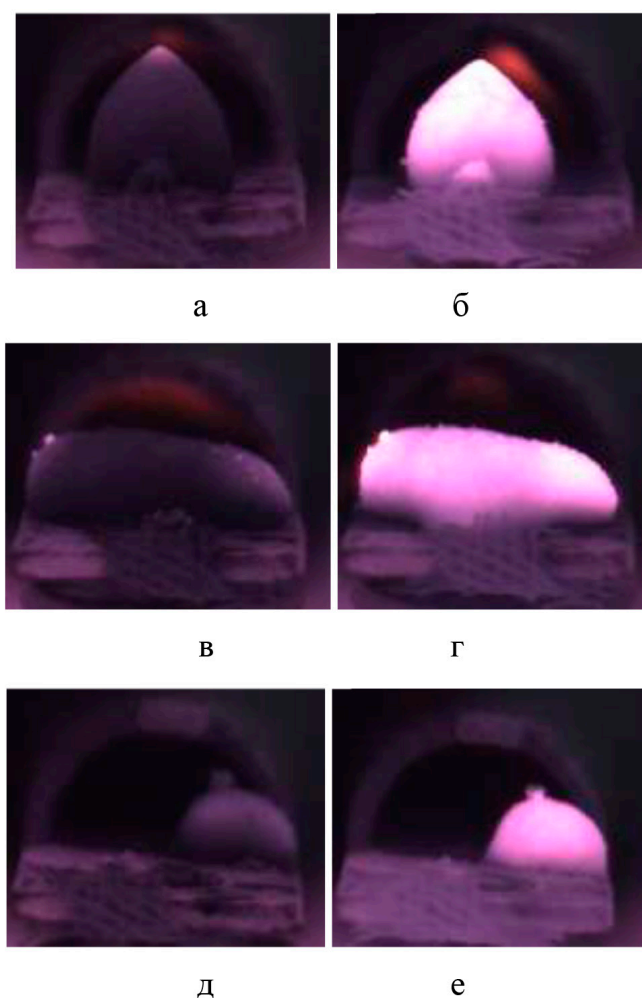


Рис. 2. Начало горения: а – ВУТ из шлама 1; в – ВУТ из шлама 2; д – ВУТ из шлама 3; конец горения: б – ВУТ из шлама 1; е – ВУТ из шлама 2; з – ВУТ из шлама 3

## Задержка зажигания

Образец	$t_{\text{печи}} = 800^{\circ}$							
	Масса частицы, мг	Условный диаметр частицы, мм	Объем образца, $\text{мм}^3$	Плотность ВУТ, $\text{кг}/\text{м}^3$	Масса капли ВУТ, мг	Начало горения, с	Конец горения, с	Время горения 1 г, с
Шлам 1 ( $W^p = 50\%$ )	50,50	5,00	65,42	1543,87	101,00	20,788	38,496	175,33
Шлам 2 ( $W^p = 45\%$ )	45,00	4,66	55,96	1462,12	81,82	20,152	38,016	218,33
Шлам 3 ( $W^p = 45\%$ )	24,90	4,00	33,49	1352,64	45,30	22,260	69,884	1051,30

Задержка зажигания более 20 секунд косвенно свидетельствует о низкой реакционной способности (высокой энергии активации) ВУТ из шламов, что коррелирует с низкими значениями выхода летучих у представленных образцов. При этом шлам 3 имеет зольность 43%, а шламы 1 и 2 – 23-25%, в связи с этим длительность горения шлама 3 значительно превышала время горения других образцов при меньшем объеме испытываемого образца.

## Заключение

В заключение можно отметить, что полученные результаты исследования показали:

– использование угольного шлама ООО «ГОФ Анжерская» в качестве водоугольного топлива может быть проблематичным вследствие малого показателя выхода летучих, и требуются дополнительные испытания на действующем котле;

– для ускорения процесса зажигания можно вводить присадку в ВУТ жидких органических компонентов, частично замещающих воду, например отработанного машинного масла, что создаст положительный эффект уменьшения задержки зажигания топлива.

## Список литературы

1. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Кемеровской области (на 15.06.2020 г.) [Электронный ресурс]. URL: <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/b689bdea84fd-b2a34e12d4e178eb3886.pdf> (дата обращения: 22.10.2024).
2. Малышев Ю.Н., Зыков В.М. Угольная промышленность России в XXI веке // Уголь. 2000. № 11. С. 51-55.
3. Серёгин А.И. Горлов Е.Г. Разработка технологических схем переработки угольных шламов в товарную продукцию // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 8. С. 342-346.
4. Шинкевич В.А. Способы переработки угольных шламов // Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС 2018» (Кемерово, 22-23 ноября 2018 г.). Кемерово: Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева, 2018. С. 303.1-303.5.

5. Олейникова М.И. Получение водоугольного топлива из шламов углеобогащения // Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2020. № 1. С. 132-144.

6. Броварова О.В., Кузьмин Д.В. Физико-химические свойства и биологическая активность гуматов, выделенных из угольного шлама // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 6 (92). С. 14-19.

7. Козлов В.А., Гарбер В. Сжигание высокозольных шламов как путь к безотходной технологии обогащения углей // Уголь. 2017. № 8. С. 140-148.

8. Папин А.В., Игнатова А.Ю., Злобина Е.С. Применение метода масляной агломерации для переработки твёрдых углесодержащих отходов // Ползуновский вестник. 2016. № 2. С. 163-166.

9. Ефимов В.И., Корчагина Т.В., Антонов А.И. К вопросу переработки угольных шламов // Уголь. 2018. № 2. С. 77-81.

10. Кириллов К.М., Козлов В.А., Чернышева Е.Н. Инновационная сушка «Кронос». Глубокое нетермическое обезвоживание угля и минералов // Уголь. 2015. № 6. С. 56-60.

11. Фоменко Т.Г., Благов И.С., Коткин А.М., Бутовецкий В.С. Шламы, их улавливание и обезвоживание. М.: НЕДРА, 1968. 203 с.

12. Мурко В.И., Карпенко В.И., Баранова М.П., Бухмиров В.В., Темлянцева Е.Н. Особенности сжигания композиционных водоугольных топлив // Вестник государственного энергетического университета. 2024. № 3. С. 5-12.

13. Баранова М.П., Мурко В.И. Особенности сжигания водоугольного топлива из углей разной степени метаморфизма в малой энергетике // Материалы IV-й Международной научно-практической конференции, посвящённой Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации, 300-летию Российской Академии наук, Году педагога и наставника в Российской Федерации и Году народной сплочённости в Республике Тыва (Кызыл, 19-20 октября 2023 г.). Кызыл: Издательство Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. С. 299-304.

14. Мурко В.И., Бухмиров В.В., Бушуев Э.Н., Джундубаев А.К., Султаналиев М.С., Темлянцева Е.Н. Технологическая оценка процессов сжигания водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече в Киргизской Республике // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2022. № 5. С. 12-17.

15. Мурко В.И., Папченков А.И., Голубин К.А., Шаншин А.Е. Обоснование технологических решений по переработке тонких угольных шламов на обогатительных фабриках АО «УК «КУЗБАССРАЗРЕЗУГОЛЬ» // Уголь. 2022. № 7 (1156). С. 27-33.

16. Шияев М.И., Афанасьев Ю.О., Богомолов А.Р. Модели горения частиц топлива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 2. С. 75-80.