

УДК 621; 697.432

DOI: 10.15372/ChUR2024619

EDN: ISFACK

Получение водоугольного топлива из углей Межегейского месторождения Республики Тыва

В. И. МУРКО¹, В. И. КАРПЕНОК², В. И. ФЕДЯЕВ¹, Г. Р. МОНГУШ³, М. П. БАРАНОВА⁴

¹Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия

E-mail: sib_eco@mail.ru

²Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
Новокузнецк, Россия

³Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,
Кызыл, Россия

⁴Красноярский государственный аграрный университет,
Красноярск, Россия

(Поступила 02.09.2024; принята к печати 25.09.2024)

Аннотация

Использование угля из Межегейского месторождения (Республика Тыва) является перспективным направлением для производства тепловой энергии. Однако необходимо учитывать особенности технологических свойств угля, связанных с его повышенными характеристиками спекания. Указанные особенности по применяемой технологии слоевого сжигания угля приводят к перерасходу топлива из-за его недожога и высокому содержанию вредных веществ в отходящих газах. Город Кызыл уже включен в федеральный проект “Чистый воздух”, что свидетельствует об актуальности настоящего исследования и необходимости внедрения новых методов использования данного энергоресурса. Для снижения выбросов и повышения эффективности использования угля в энергетике целесообразно внедрение технологии получения и сжигания водоугольного топлива (ВУТ) с учетом специфических свойств данного угля. В работе установлена возможность получения и использования экологически чистого ВУТ из угля Межегейского месторождения. Проведен анализ технических характеристик угля, получена опытная партия ВУТ, определены характеристики сжигания этого топлива в котельной установке. Приготовление и сжигание опытной партии ВУТ было проведено на стендовой установке Сибирского государственного индустриального университета (Новокузнецк). Показано, что при использовании технологии сжигания ВУТ содержание вредных веществ в дымовых газах существенно ниже предельно допустимых значений. Развитие данной технологии использования угля Межегейского месторождения позволит снизить расход топлива на теплогенерирующих установках и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: коксующийся уголь, водоугольное топливо, Межегейское месторождение, горение водоугольного топлива, экологичное использование угля

ВВЕДЕНИЕ

Республика Тыва обладает огромными запасами угля. Наиболее перспективным и подготовленным к промышленному освоению является

Межегейское месторождение, запасы которого смогут обеспечить в течение проектного времени существующие теплоэнергетические объекты региона. Уголь – это главное топливо в теплоэнергетике республики. Из-за ярко выра-

женных коксующихся свойств угля (марка Ж) этого месторождения использование его в энергетических целях на действующих теплоэнергетических установках имеет ряд проблем, в частности, это значительные выбросы вредных веществ в отходящих газах и перерасход топлива за счет значительного механического недожога. Решение проблемы снижения вредных выбросов для крупных городов и поселков республики чрезвычайно актуально, поскольку из-за высокого индекса спекаемости использование данного угля для слоевого сжигания приводит к повышенному содержанию продуктов неполного сгорания органической массы угля, так называемым химическим и механическим недожогам. Именно по этой причине город Кызыл вошел в федеральный проект “Чистый воздух” [1, 2]. Использование водоугольных суспензий в качестве энергетического топлива является одним из перспективных путей снижения вредных выбросов при сжигании углей. Данная технология показала максимальную эффективность при замене слоевого сжигания угля в котлах малой и средней мощности, где механический недожог достигает 25–40 % [3]. Использование водоугольных суспензий вместо рядового угля и пылеугольного топлива обеспечивает уменьшение выбросов в атмосферу NO_x (до 30 %) и CO (более чем в два раза). Образующаяся в процессе сгорания летучая зола эффективно улавливается существующим пылеулавливающим оборудованием (батареиные циклоны, тканевые фильтры, электрофильтры) [3]. Незначительное содержание механического недожога в уловленной пыли (не более 5 %) дает возможность использовать ее в других отраслях промышленности [4].

Цель работы – исследование возможности снижения вредных выбросов теплогенерирующих установок при использовании технологии сжигания водоугольного топлива (ВУТ), полученного из угля Межегейского месторождения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Характеристика исходного сырья

Для приготовления и сжигания опытной партии ВУТ на экспериментальном стенде Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ) была доставлена представительная проба угля Межегейского месторождения (Республика Тыва). Технические показатели пробы угля марки Ж Межегейского

месторождения представлены в табл. 1. Стандартными методами определены следующие характеристики: A^a – зольность топлива в аналитической пробе, мас. %; W^a – влага воздушно-сухого угля или влага аналитическая, мас. %; V^{daf} – выход летучих веществ на сухую беззольную массу топлива, мас. %; S_t^d – содержание общей серы на сухую массу, мас. %; Q_i – низшая удельная теплота сгорания, МДж/кг [3].

Элементный анализ угля был выполнен с использованием универсального элементного анализатора Vario EL Cube (Elementar, Германия), который предназначен для одновременного определения элементов C, H, N, S (табл. 2) [1].

Методика исследований

В ходе работы исследовали возможность получения суспензионного ВУТ с необходимыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками из спекающегося угля марки Ж [3]. Приготовление и сжигание ВУТ производилось на экспериментальном стенде СибГИУ, технологическая схема которого представлена на рис. 1 и 2. Стенд [5] состоит из участка приготовления ВУТ и участка сжигания.

Приготовление ВУТ (см. рис. 1) производилось следующим образом: исходный уголь (класс 0–50 мм) дробился в молотковой дробилке (1) до класса 0–6(10) мм. Из бункера (2) дробленый уголь шнековым питателем-дозатором (3) подавался в загрузочную воронку вибромельницы ВМ-60 (4); одновременно в мельницу из емкости (5) дозированно подавался водный раствор

ТАБЛИЦА 1

Технические характеристики угля марки Ж

Образец	A^a	W^a	$V^{\text{daf}}, \%$	$S_t^d, \%$	Q_i , МДж/кг
Ж	4.8–9	3.3	32.7–37.2	0.6–0.8	32.17

Примечание. A^a – зольность топлива в аналитической пробе; W^a – влага воздушно-сухого угля; V^{daf} – выход летучих веществ на сухую беззольную массу топлива; S_t^d – содержание общей серы на сухую массу; Q_i – низшая удельная теплота сгорания.

ТАБЛИЦА 2

Элементный состав органической массы угля марки Ж

Марка угля	Содержание элементов, мас. %					Атомное соотношение	
	C	H	N	S	O*	H/C	O/C
Ж	82.5	5.3	2.1	0	10.1	0.76	0.09

* Расчет по остатку.

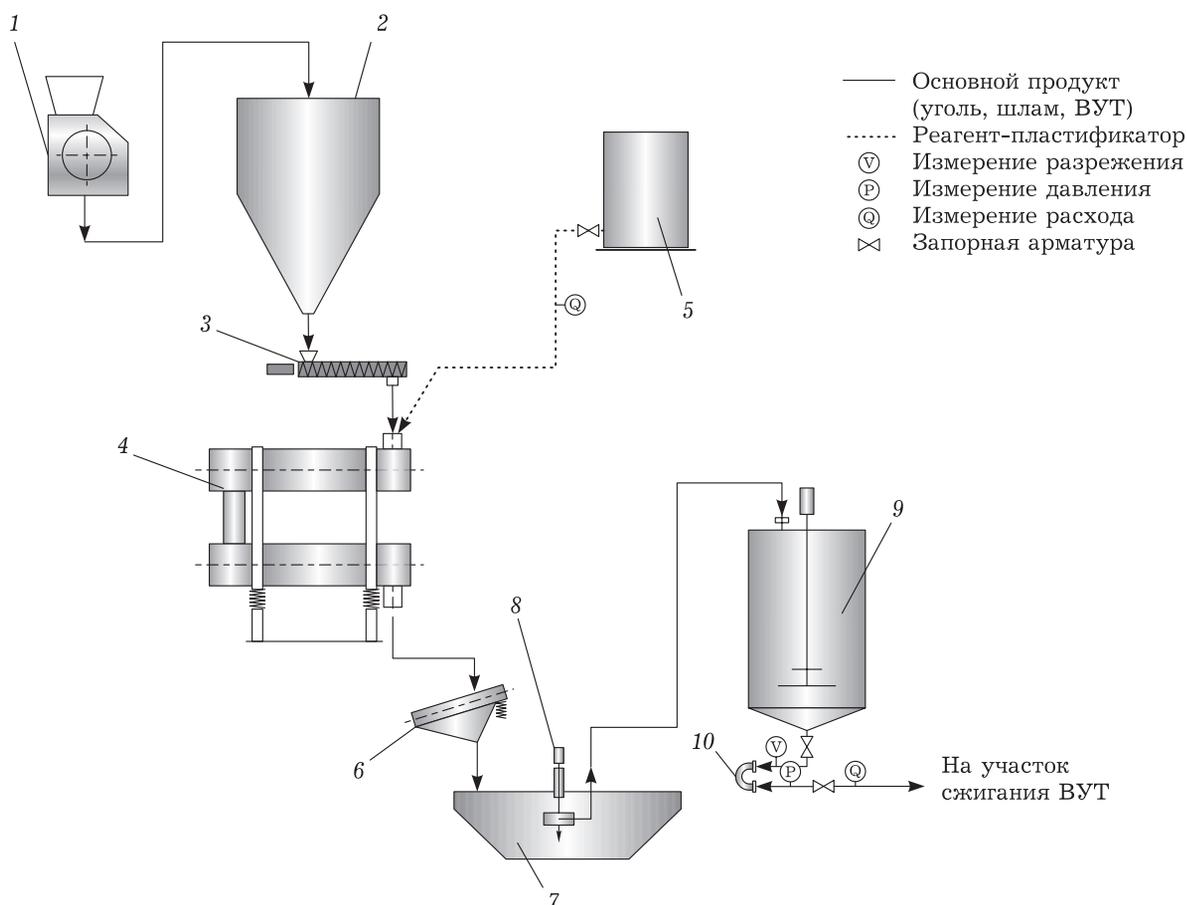


Рис. 1. Технологическая схема экспериментального стенда (участок приготовления ВУТ): 1 – дробилка предварительного дробления; 2 – бункер дробленого угля; 3 – питатель с инвертором; 4 – мельница вибрационная; 5 – емкость реагента-пластификатора; 6 – вибросито; 7 – зумпф (накопитель) для ВУТ; 8 – насос-активатор; 9 – аккумулярующая емкость ВУТ с ручным импеллером; 10 – насос перистальтический. ВУТ – водоугольное топливо.

реагента-пластификатора. Расход реагента-пластификатора составлял 0.3 % на твердую массу угля при содержании твердой фазы 51.0–52.0 %. Приготовленное в вибромельнице водоугольное топливо через вибросито (6) поступало в зумпф для ВУТ (7), из которого насосом-активатором (8) перекачивалось в аккумулярующую емкость (9), оборудованную ручным импеллером. Готовое ВУТ перистальтическим насосом (10) подавалось в расходную емкость ВУТ (11) на участке сжигания (см. рис. 2).

Сжигание полученной опытной партии ВУТ проводили согласно схеме (см. рис. 2). Предварительно осуществлялся прогрев вихревой топки (15). Для прогрева использовалась дизельная горелка WSO-12H (Wester Line, Италия) (22). За счет работы дизельной горелки достигалась температура в топке 620 °С, затем включалась пневмомеханическая форсунка ВУТ (14). Топливо на форсунку из расходной емкости (11)

подавалось дозирующим насосом (12) через фильтр тонкой очистки (13). Распыление ВУТ производилось сжатым воздухом от винтового компрессора (17). При достижении температуры в топке 950 °С дизельная горелка отключалась, и последующее горение распыляемого ВУТ осуществлялось без подсветки. Сжигание ВУТ производилось в вихревой адиабатической топке (15), в которую тангенциально подавалось распыленное ВУТ и вторичный дутьевой воздух от вентилятора (18). Образующиеся горячие газы через газовыпускное окно вихревой топки поступали в водогрейный котел (16). Охлажденные в котле газы удалялись через систему газоочистки (19) дымососом (20) через дымовую трубу в атмосферу. Нагретая в котле вода охлаждалась в аппарате воздушного охлаждения и возвращалась в котел (на схеме не показано).

В ходе экспериментальных работ фиксировались следующие показатели:

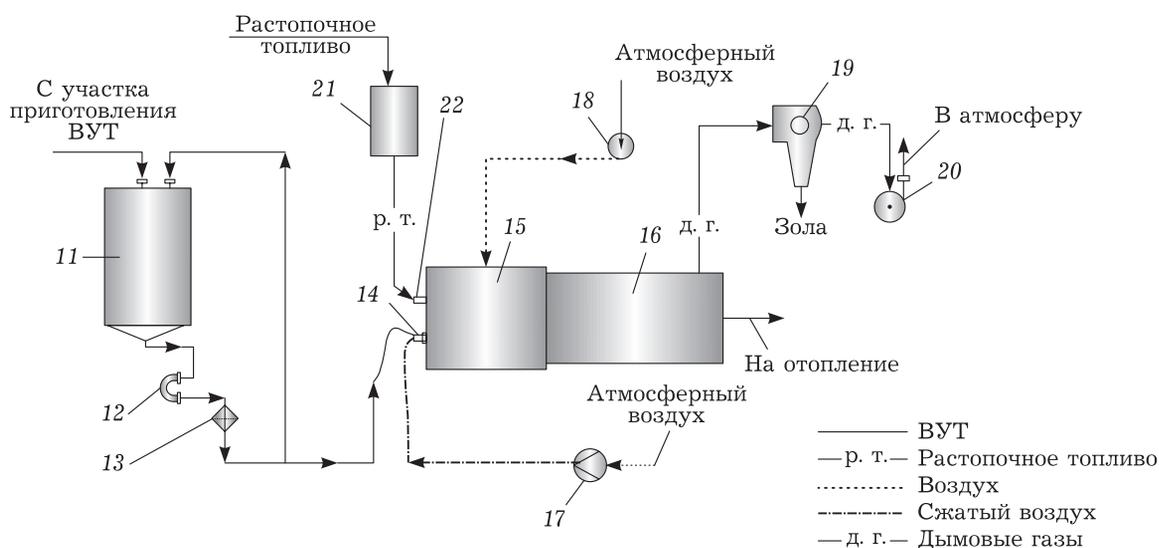


Рис. 2. Технологическая схема экспериментального стенда (участок сжигания ВУТ): 11 – расходная емкость ВУТ; 12 – насос перистальтический; 13 – фильтр тонкой очистки; 14 – форсунка ВУТ; 15 – топка вихревая; 16 – котел водогрейный; 17 – установка компрессорная; 18 – вентилятор дутьевой; 19 – золоуловитель; 20 – дымосос; 21 – емкость растопочного (дизельного) топлива; 22 – горелка растопочная. ВУТ – водоугольное топливо.

- расход и плотность топлива с помощью расходомера-плотномера OPTIMASS 1000 515 (Krohne, Германия), точность измерения 0.1 %;
- давление топлива в нагнетательной линии с помощью манометра АИР-20/М2 (Россия) с разделительной диафрагмой, точность измерения 0.1 %;
- давление сжатого воздуха с помощью манометра АИР-20/М2, точность измерения 0.1 %;
- расход сжатого воздуха с помощью расходомера Н250 (Krohne, Германия), точность измерения 0.1 %;
- температура в топке с помощью термопреобразователя ТПУ 0304 (Россия), точность измерения 0.05 %;
- теплотехнические характеристики котельной установки при сжигании ВУТ;
- состав вредных веществ в уходящих газах с использованием комплекса измерительной аппаратуры на базе газоанализатора ДАГ-16 (Россия), класс точности 1;
- визуальный контроль дымовых газов, выходящих из дымовой трубы.

В работе также был определен тип пластификатора и его количество на сухую массу угля. Полученные пробы ВУТ анализировали для определения массовой доли твердой фазы, гранулометрического состава, вязкости и зольности. Массовую долю твердой фазы определяли стандартным методом высушивания согласно ГОСТ 27314-91, гранулометрический состав методом мокрого отсева на ситах – согласно ГОСТ 2093-82, зольность – по ГОСТ 11022-95.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно определенным характеристикам (см. табл. 1), исследуемый образец угля является малозольным, с высоким выходом летучих веществ, малосернистым (содержание общей серы составляет менее 1 мас. %). Проба угля характеризуется закономерно высоким содержанием углерода и водорода в органической массе угля, отсутствием органической серы и низким содержанием кислорода (см. табл. 2).

В табл. 3 представлены технические характеристики полученных опытных партий ВУТ. Анализ данных показал, что полученная опытная партия является низкосольной и хорошо текучей (эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с^{-1} – менее $200 \text{ мПа} \cdot \text{с}$), что позволяет эффективно распылять ее при сжигании [6, 7]. Следует отметить, что повышенное содержание твердой фазы в ВУТ не повлияло на статическую стабильность топлива, что может быть связано со снижением активного порового поглощения жидкой фазы. Данная особенность должна быть исследована в дальнейшем более детально.

Сжигание ВУТ производилось при средней температуре $1095 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 4). Следует отметить, что при этих условиях отсутствовал процесс шлакования внутренних поверхностей топки. Визуально в ходе работы котельной установки, работающей на ВУТ, было установлено отсутствие механического недожога, так называемого “черного дыма”. Указанное явление характерно

ТАБЛИЦА 3

Технические характеристики полученных проб водоугольного топлива (ВУТ)

Показатель	Полученное значение
Массовая доля твердой фазы, мас. %	52.0
Зольность твердой фазы, мас. %	6.8
Эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с^{-1} , мПа·с	181
Статическая стабильность, сут	не менее 6
Низшая теплота сгорания (расчетная), МДж/кг	14.32
Гранулометрический состав, %:	
+0.355 мм	0.3
0.250–0.355 мм	1.4
0.160–0.250 мм	4.2
0.071–0.160 мм	21.0
–0.071 мм	73.1

ТАБЛИЦА 4

Параметры процесса сжигания водоугольного топлива (ВУТ)

Показатель	Измеренное значение
Расход ВУТ, кг/ч	80
Давление ВУТ, атм	1.6
Давление сжатого воздуха, атм	1.7
Температура в топке, °С	1095 (1000–1150)
Расход воды через котел, м ³ /ч	8
Разница температур воды на входе и на выходе из котла, °С	17
Теплопроизводительность котла, Гкал/ч	0.136
Температура выходящих газов из котла перед циклоном, °С	198

ТАБЛИЦА 5

Состав дымовых газов

Газ	Фактическое значение	Предельно допустимое значение согласно ГОСТ 28193-89
O ₂ , %	17.5	Не нормируется
RO ₂ ^a , %	3.1	Не нормируется
CO, мг/м ³	128	375
NO, мг/м ³	104	750 (в сумме для всех оксидов азота)
NO ₂ , мг/м ³	0	
SO ₂ , мг/м ³	0	400

^a Трехатомные газы, образующиеся при сжигании топлива (CO₂, H₂O).

для вихревого сжигания эффективно распыленного жидкого топлива в адиабатической топке.

В табл. 5 представлены результаты измерения содержания вредных веществ в дымовых газах при сжигании опытной партии ВУТ. Видно, что уровень вредных веществ в дымовых газах существенно ниже предельно допустимых значений. Это указывает на перспективность использования ВУТ в теплоэнергетических установках малой и средней мощности со слоевой системой сжигания, работающих на угле марки Ж.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведения демонстрационных испытаний установлено, что водоугольное топливо, приготовленное из угля Межегейского месторождения, обладает структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками, необходимыми для прямого сжигания в котельных агрегатах. Стабильное горение водоугольного топлива осуществляется в интервале температур 950–1150 °С, что обеспечивает ми-

нимально возможные значения вредных выбросов в дымовых газах, которые существенно ниже нормативных значений.

Таким образом, показана возможность комплексного, более полного и экологичного использования спекающихся углей, которые можно сжигать в виде суспензионного водоугольного топлива в теплоэнергетических установках. Разработаны технология и техническое обеспечение для приготовления и сжигания топлива из спекающихся углей Межегейского месторождения. Показано, что из этих углей можно приготовить суспензионное водоугольное топливо с наименьшей теплотой сгорания не менее 14.32 МДж/кг.

Работа выполнена в рамках базового проекта «Исследование ресурсосберегающих процессов углубленной переработки углей и вскрышных пород угленосных формаций и техногенных отходов» ТуВИКОПР СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Монгуш Г. Р., Баранова М. П., Чульдун К. К. Определение особенностей горения углей методами термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии // Журн. Сибирского федер. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2022. Т. 15, № 3. С. 346–355.
- 2 Монгуш Г. Р., Баранова М. П., Сапелкина Т. В. Физико-химические основы технологии получения сорбентов из каменных углей активацией гидроксидом калия // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30, № 5. С. 534–542.
- 3 Мурко В. И., Федяев В. И., Хямяляйнен В. А. Физико-технические основы водоугольного топлива. Кемерово: Кузбассвуиздат, 2009. 195 с.
- 4 Мурко В. И., Баранова М. П. Обоснование инновационных направлений использования продуктов обогащения угля // Горн. информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). 2022. № 6. С. 131–141.
- 5 Мурко В. И., Протопопов Е. В., Темлянец М. В., Чаплыгин В. В., Литвинов Ю. А., Волков М. А. Разработка и создание инновационного научно-образовательного кластера по комплексному использованию угля и продуктов его переработки // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. АС'2019: труды XII Всероссийской науч.-практ. конф. (с междунар. участием), Новокузнецк, 28–30 нояб. 2019 г. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2019. С. 48–53.
- 6 Musalam A. V., Qaraman A. F. A. The thermal behavior of the coal-water-fuel (CWF) // International Journal of Energy and Environmental Research. 2016. Vol. 4, No. 3. P. 27–36.
- 7 ПроЭнергоМаш: сайт. URL: <https://www.pem-energo.ru/> (дата обращения: 12.06.2024).