

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 665.765:621.771.014.2

Василий Иванович Мурко

ФГБОУ ВО «Сибирский индустриальный университет», директор Центра инновационных угольных технологий, доктор технических наук, профессор, Россия, Новокузнецк, e-mail: sib_eco@mail.ru

Виктор Иванович Карпенко

Филиал ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кандидат технических наук, доцент кафедры ТДиИТ, Россия, Новокузнецк, e-mail: vkarpenok@mail.ru

Марина Петровна Баранова

ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой системозенергетики, Россия, Красноярск, e-mail: marina60@mail.ru

Вячеслав Викторович Бухмиров

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: bao6095@mail.ru

Елена Николаевна Темлянцева

ФГБОУ ВО «Сибирский индустриальный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Особенности сжигания композиционных водоугольных топлив¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Россия обладает мощными запасами угля, в среднем до 173 млрд тонн, и, хотя доля угольной генерации в целом по России относительно невелика (около 20–22 %), в Сибирском федеральном округе она достигает 65 %. Россия не может отказаться от угля, но необходимо модернизировать и повысить энергоэффективность ТЭС и котельных, работающих на угле. В настоящее время разработаны технологии получения и использования композиционного водоугольного топлива (ВУТ) с разными добавками, в первую очередь органического происхождения, для улучшения его целевых характеристик. Исследование характеристик таких водоугольных суспензий показало перспективность их использования в качестве топлива в большой и малой теплоэнергетике как с экономической точки зрения, так и с точки зрения экологической безопасности. Однако отсутствие экспериментальных данных по сжиганию композиционных водоугольных топлив в стендовых и полупромышленных условиях сдерживает дальнейшее развитие технологии использования водоугольных топлив. В связи с этим актуальным является исследование особенностей сжигания композиционных водоугольных топлив из углей разной степени метаморфизма.

¹ Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект 23-29-00728).

The study is supported by a grant of the Russian Science Foundation (project 23-29-00728).

Материалы и методы. Для приготовления опытных партий композиционного водоугольного топлива использованы рядовые угли и угольные шламы различной стадии метаморфизма (марки Д, СС, Т), сжигание которых осуществлено на стендовой полупромышленной установке. Результаты исследования обработаны с использованием методов математической статистики и регрессионного анализа.

Результаты. Установлено влияние механической активации водоугольного топлива на вязкость и температуру его воспламенения и горения. Определены особенности сжигания композиционных водоугольных топлив с применением пневмомеханических форсунок двух типов. Определен состав вредных выбросов при сжигании водоугольных топлив.

Выводы. Установлена возможность использования композиционных водоугольных топлив для розжига котлов большой мощности. Показано что сжигание водоугольных топлив является экологически более безопасным по сравнению со сжиганием угольного и других видов топлива.

Ключевые слова: композиционное водоугольное топливо, механическая активация, пневмомеханические форсунки, температура воспламенения топлива, температура горения топлива

Vasily Ivanovich Murko

Siberian Industrial University, Director of the Center of Innovative Coal Technologies, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Russia, Novokuznetsk, e-mail: sib_eco@mail.ru

Viktor Ivanovich Karpenok

Branch of Kuzbass State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Technical Sciences and IT Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: vkarpenok@mail.ru

Marina Petrovna Baranova

Krasnoyarsk State Agrarian University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of System Energy Department, Russia, Krasnoyarsk, e-mail: marina60@mail.ru

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: bao6095@mail.ru

Elena Nikolaevna Temlyantseva

Siberian Industrial University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Features of combustion of composite coal-water fuel

Abstract

Background. Russia has large coal reserves, on the average up to 173 billion tons. Although, the share of coal generation in Russia is relatively small (about 20–22 %), it reaches 65 % in the Siberian Federal District. Russia cannot deny coal, but it is necessary to update and improve energy efficiency of Thermal Power Plants (TPP) and boiler houses that burn coal. Currently, technologies have been developed to produce and use composite coal-water fuel (CWF) with various additives, primarily of organic origin to improve its target characteristics. A study of the characteristics of such coal-water suspensions has proved the promising outlook of their use as fuel in large and small Thermal Power Plants, both from an economic and environmental safety points of view. However, the lack of experimental data on the issues of combustion of composite coal-water fuel in bench-scale and semi-industrial conditions hinders the further development of CWF technology. Thus, it is relevant to study the features of combustion of composite coal-water fuels from coals of varying degrees of metamorphism.

Materials and methods. To prepare experimental batches of composite CWF, raw coals and coal slurries of various stages of metamorphism (grades D, SS, T) have been used. They were burned in a bench-scale semi-industrial plant. The research results have been processed using the methods of mathematical statistics and regression analysis.

Results. The influence of mechanical activation of CWF on the viscosity and temperature of its ignition and combustion has been established. The features of combustion of composite coal-water fuel using pneumomechanical injectors of two types are determined. The composition of harmful emissions during the combustion of CWF has been determined.

Conclusions. The possibility to use composite coal-water fuel to ignite high-power boilers has been established. It has been proved that the combustion of CWF is environmentally safer compared to the combustion of coal and other types of fuel.

Key words: Composite water-coal fuel, mechanical activation, pneumomechanical injectors, ignition temperature of fuel, combustion temperature of fuel

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.005-012

Введение. Россия обладает мощными запасами угля, в среднем до 173 млрд тонн, и, хотя доля угольной генерации в целом по России относительно невелика (около 20–22 %), в Сибирском федеральном округе она достигает 65 %, а в Дальневосточном регионе до 93 %. Россия не может отказаться от угля, но необходимо модернизировать и повысить энергоэффективность ТЭС и котельных, работающих на угле.

В настоящее время для улучшения целевых характеристик топлив разработаны технологии получения и использования композиционного водоугольного топлива (ВУТ) из углей разной степени метаморфизма с разными добавками [1, 2]. Получены новые составы суспензионного водоугольного топлива с применением компонентов органического происхождения [3, 4]. Композиционное ВУТ удобно применять на объектах химических производств, где остается вода с большим содержанием метилового или этилового спирта или загрязненная другими веществами. Исследование характеристик таких водоугольных суспензий показало перспективность их использования в качестве топлива в большой и малой теплоэнергетике как с экономической точки зрения, так и с позиций экологической безопасности.

В ходе получения композиционных топлив возможно также использовать способность применяемых компонентов образовывать с тонкоизмельченными угольными частицами гранулы (метод масляной грануляции). Это позволяет совмещать процесс приготовления топлива и обогащения угля за счет удаления глинистых минеральных компонентов, что увеличивает рабочую теплоту сгорания. Получаемая в результате водоуглемасляная суспензия является промежуточным продуктом при дальнейшем ожигении угля путем механохимических и электроимпульсных воздействий [5, 6]. Использование дополнительного высокорекреационного органического компонента придает новые качества получаемому жидкому топливу из угля (снижение температуры вспышки и, соответственно, повышение устойчивости горения, существенное снижение температуры замерзания).

Композиционное водоугольное топливо можно использовать для растопки тепловых агрегатов, после чего можно перейти на обыкновенное водоугольное топливо. Для растопки желательно использовать марки угля с возможно большим содержанием летучих (например, угли марки Д или Г) либо угли марки Т с дополнительным содержанием спирта (вплоть до 30 %).

Композиционное ВУТ также используется в агрегатах, где желательно иметь возможно большее содержание дымовых газов, например в аэродинамических сушилках типа кипящего слоя или вихревых.

Целью исследования было выявление особенностей сжигания композиционных водоугольных топлив из углей и угольных шламов разной степени метаморфизма.

Материалы и методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на стендовой опытно-промышленной установке СибГИУ [7].

В ходе экспериментальных работ из различных марок углей были получены партии суспензионного водоугольного топлива с требуемыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками. Для получения ВУТ были использованы рядовые угли и угольный шлам различных стадий метаморфизма и зольности Кузнецкого угольного бассейна марок ДР, СС, Т. В табл. 1 представлена техническая характеристика этих углей.

На основе представленных углей были приготовлены опытные партии композиционных ВУТ с применением нефти и отработанных масел, метилового и этилового спиртов. Пробы ВУТ анализировали на содержание твердой фазы, на гранулометрический состав и вязкость. Показатели определяли стандартными методами согласно существующим ГОСТам и нормативным документам. Для приготовления топлива использовали молотковую дробилку и вибромельницу мокрого измельчения. Активацию топлива производили насосом-активатором.

Результаты исследований. В табл. 2 представлена характеристика водоугольного топлива, полученного путем мокрого помола в вибромельнице и обработанного в насосе-активаторе.

Таблица 1. Техническая характеристика углей

Марка угля	Химический состав, %			Высшая теплота сгорания, МДж/кг
	зольность, A^{daf}	влага, W^t	летучие, V^{daf}	
Д, Г	15,0–18,0	10,0–12,0	41,5–43,5	31,8
СС (шлам)	22,0–36,6	18,0–20,0	27,0	34,8
Т	16,0–20,0	6,0–10,0	8,0–14,0	34,8

Таблица 2. Характеристика опытных партий композиционного ВУТ

Наименование показателя	Технология приготовления	
	мокрый помол в вибромельнице	мокрый помол в вибромельнице + обработка в насосе-активаторе
Марка угля	СС	СС
Гранулометрический состав, %		
+0,355 мм	2,8	1,8
0,250–0,355 мм	5,2	4,4
0,160–0,250 мм	8,5	8,2
0,071–0,160 мм	26,2	25,2
–0,071 мм	57,3	60,4
Массовая доля твердой фазы, %	58,4	58,4
Зольность A^d , %	7,9	7,9

Анализ данных (табл. 2) показывает, что однократный пропуск ВУТ через насос-активатор обеспечивает увеличение выхода микронных частиц (кл. –0,071 мм) более чем на 3 % (абс.), что способствует как улучшению стабильности топлива (отсутствие осадка в течение более 30 суток), так и снижению его вязкости в 1,3 раза, что было зафиксировано также при обработке водоугольной суспензии специальным насосом-активатором на углехимическом комбинате в г. Хэган (КНР) [8].

Аналогичные результаты были получены и для опытных партий композиционного ВУТ, приготовленного из других марок углей (Д и Т) [9]. При приготовлении опытных партий композиционного ВУТ использовались исходный уголь и угольный шлам, предварительно обогащенный методом масляной грануляции с расходом масляного агента от 5 до 8 %.

В табл. 3 представлена характеристика композиционного ВУТ.

На рис. 1 представлены кривые течения композиционных водоугольных топлив, полученные путем обработки данных измерения вязкости ВУТ на ротационном вискозиметре REOTEST в диапазоне скоростей сдвига от 9 до 100 c^{-1} [1] по формулам:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; k – коэффициент консистенции, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹; n – индекс потока;

$$\tau = \tau_0 + \mu_{стр} \cdot \dot{\gamma}, \quad (2)$$

где τ_0 – начальное напряжение сдвига, Па; $\mu_{стр}$ – пластическая или структурная вязкость, Па·с.

Таблица 3. Характеристика опытных партий композиционного водоугольного топлива

№ партии	Предприятие	Марка угля, угольного шлама	Зольность A^d , %	Количество этилового спирта от общей массы ВУТ, %	Массовая доля твердой фазы, %	Теплота сгорания, МДж/кг (ккал/кг)	Стабильность, сут.
1	Разрез «Талдинский»	ДГ	4,8	15,0	62,2	24,1 (5763)	28
2	Шахта «Тырганская»	СС _ш	8,5	14,8	65,3	25,1 (6000)	>30
3	ОФ «Красногорская»	Т	8,0	15,0	65,2	25,5 (6100)	25

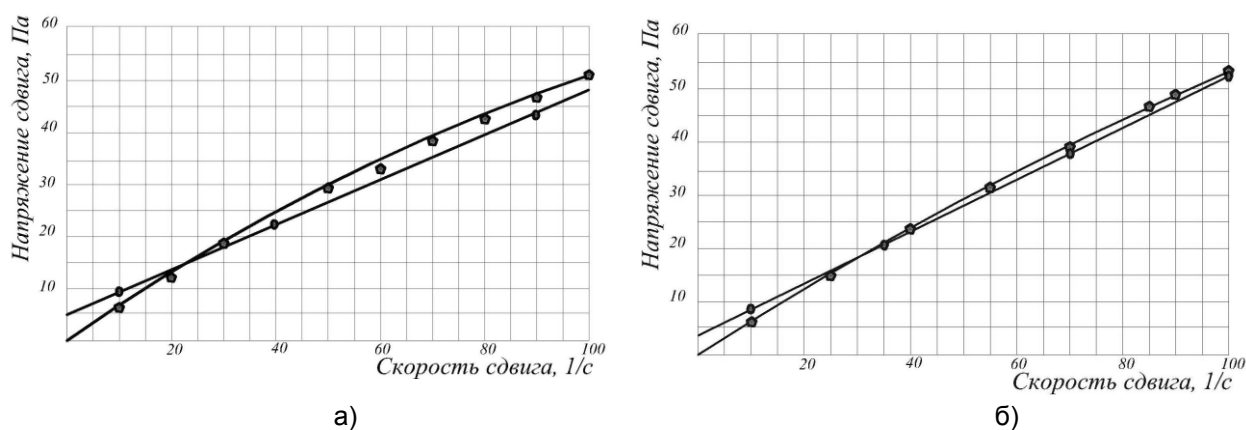


Рис. 1. Кривые течения композиционных водоугольных топлив: а – ВУТ с добавлением спирта не более 2 % (от жидкой фазы); б – ВУТ с добавлением спирта 30 % (от жидкой фазы)

Анализ полученных зависимостей (рис. 1) показывает, что как степенная модель (1), так и модель Бингама (2) практически одинаково описывают течение ВУТ в указанном диапазоне скоростей сдвига (среднеквадратическое отклонение не превышает 13 %). При этом наличие спиртового компонента не оказывает существенного влияния на структурно-реологические характеристики композиционного топлива.

Опытные партии ВУТ сжигались в вихревой адиабатической топке опытно-промышленной установки [7]. Сжигание осуществлялось путем тангенциальной подачи струи распыленного ВУТ и дутьевого воздуха в топку. Розжиг топлива осуществлялся с помощью дизельной горелки или плазмотрона. Для распыла композиционного водоугольного топлива использовалось два типа пневмомеханических форсунок – внутреннего и внешнего смешения.

Пневмомеханическая форсунка внутреннего смешения характеризуется тем, что распыляющий газовый агент (воздух или водяной пар) подается во внутреннюю цилиндрическую полость форсунки тангенциально, а газотопливная смесь через центральное сопло вылетает в камеру сжигания. Под действием аэродинамических сил и сил сопротивления окружающей среды происходит образование топливных водоугольных капель различного размера и чистых угольных частиц с размером, как правило, более 90–150 мкм [10, 11]. Каждая отдельная струя распыленного топлива представляет собой конус. При наличии четырех или более струй (для форсунки большой производительности) можно организовать большой полый конус.

Работа пневматической форсунки внешнего смешения [12] отличается тем,

что подача распыляющего газового агента (воздуха) осуществляется с внешней поверхности струи топлива. При этом за счет организованной крутки распыляющего воздуха осуществляется срыв топливной пленки с последующим образованием топливных капель. Струя распыленного топлива представляет собой полый конус.

В табл. 4 представлено сравнение работы форсунок двух типов (внутреннего и внешнего смешения).

В результате исследований установлено, что для надежной работы форсунки внутреннего смешения имеются более жесткие ограничения по максимальной крупности угольных частиц в ВУТ, для чего необходима установка фильтра тонкой очистки. Конструкция такого фильтра была разработана для стендовой и промышленных установок сжигания ВУТ [13]. Форсунка внешнего смешения менее требовательна к размеру твердых частиц в топливе, однако требует более высокого расхода (в 1,5 раза) распыляющего агента (табл. 4), а при повышении вязкости топлива качество распыла резко ухудшается, что сказывается на устойчивости режима горения.

На рис. 2 проиллюстрировано влияние активации топлива насосом-активатором на гидравлические характеристики топливного тракта при работе форсунки внутреннего смешения. Анализ полученных кривых показывает, что требуемый расход ВУТ (60 л/ч) обеспечивается при давлении 2,65 ати (для неактивированного топлива), в то время как для активированного топлива аналогичный расход достигается уже при давлении 1,5 ати.

Таблица 4. Характеристика работы форсунок

Наименование параметра	Тип форсунки	
	внутреннего смешения	внешнего смешения
Расход ВУТ, л/ч	60	60
Давление ВУТ, МПа	0,2–0,3	0,17
Содержание твердой фазы, %	62,0	62,0
Расход сжатого воздуха, нм ³ /ч	150	220
Давление сжатого воздуха, МПа	0,3	0,2

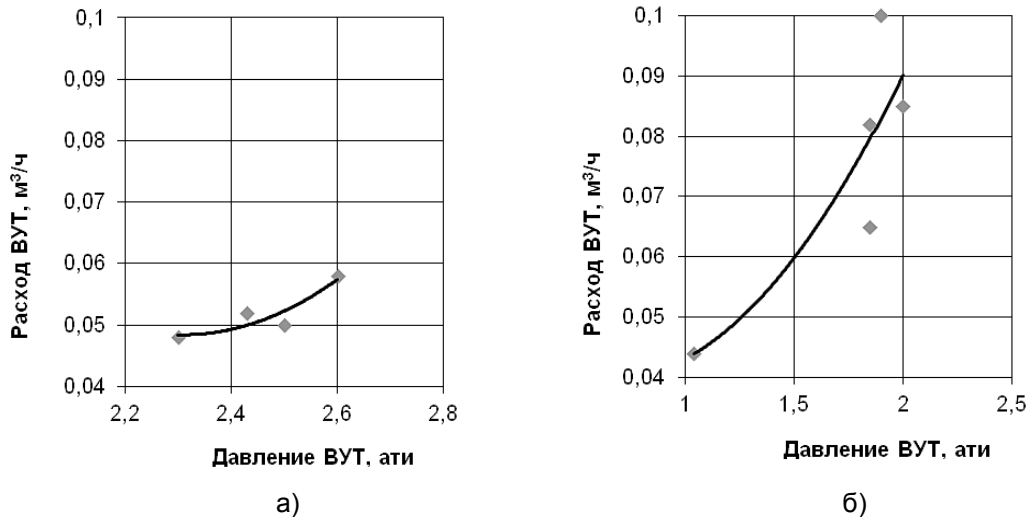


Рис. 2. Расходно-динамические характеристики тракта подачи топлива (форсунка внутреннего смешения): а – топливо не активировано; б – топливо активировано

Розжиг топки. Исследование розжига композиционного водонефтеугольного топлива показало, что указанный процесс в принципе аналогичен розжигу ВУТ без дополнительных компонентов. Меняется только температурный режим, и, ввиду того что низшая теплота сгорания композиционных топлив с добавлением нефти, отработанных масел и спирта выше в сравнении с обычным ВУТ, снижается расход топлива во время работы в стационарном режиме. Стационарный температурный режим в топке составляет 1050–1100 °С. Повышение указанного температурного уровня ведет к размягчению зольной части топлива и ее налипанию на окружающие твердые поверхности.

Установлено, что добавка спирта в количестве 15 % (масс.) от водной фазы при использовании угля марки ДГ снижает температуру воспламенения топлива на 100–150 °С. В этом случае для эффективного воспламенения необходимо повысить содержание спирта в воде до 30–35 %, тогда топливо воспламеняется в топке уже при температуре 200–250 °С. При подаче горячего дутья с температурой 150–200 °С (что легко осуществить на котлах ТЭЦ и ГРЭС) имеется возможность разжигать

топку на композиционном ВУТ при его первичном зажигании соляной горелкой или плазмотроном. Композиционное топливо, приготовленное из углей марки Т с применением спирта разжигается так же, как обычное водоугольное топливо. В данном случае спиртовой агент выполняет роль летучих веществ.

Содержание вредных веществ в топочных газах. Состав дымовых газов при сжигании водоугольного, композиционного и других видов топлива практически остается неизменным. Содержание вредных веществ в топочных газах при сжигании композиционного топлива показано на рис. 3.

Анализ состава топочных газов на наличие вредных веществ (рис. 3) показывает, что содержание СО с ростом температуры снижается до 100 мг/м³. Необходимо отметить, что при более тщательной регулировке количества дутьевого воздуха можно добиться снижения содержания СО до 50 мг/м³. При отборе проб газа за пределами топки количество СО еще ниже, что обусловлено дожиганием СО до СО₂. Содержание NO_x незначительно возрастает с ростом температуры, но остается на уровне, в несколько раз ниже, по сравне-

нию со сжиганием мазута, природного газа или пылевидного угольного топлива. Таким образом, сжигание ВУТ и композиционных жидких угольных топлив более экологично и более эффективно, чем сжигание других видов топлива.

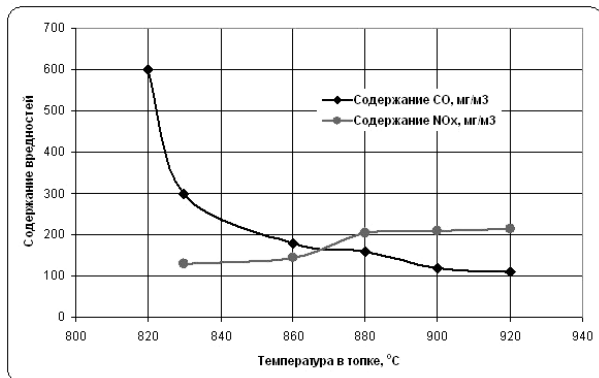


Рис. 3. Содержание вредных веществ в топочных газах

Выводы. Проведенные исследования позволили установить:

- возможность получения композиционного водоугольного топлива различного состава из углей и угольных шламов различной стадии метаморфизма с требуемыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками;
- возможность снижения вязкости композиционного топлива в 1,3–1,5 раза за счет его механической активации в насосе-активаторе;
- температурные режимы процесса розжига и стабильного горения композиционного ВУТ;
- уровень вредных выбросов при сжигании композиционных ВУТ.

Сравнительная характеристика работы форсунок ВУТ внутреннего и внешнего смешения позволила определить их достоинства и недостатки.

Список литературы

1. **Заостровский А.Н., Мурко В.И.** Технология получения и использования высокореакционного водоугольного топлива // Кокс и химия. – 2023. – № 9. – С. 18–26.
2. **Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е.** Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 308.
3. **Зенков А.В.** Свойства водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов и характеристики их распыления для

котлов промышленной теплоэнергетики: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – Томск, 2021.

4. **Валиуллин Т.Р.** Повышение эффективности сжигания композиционного жидкого топлива на тепловых электрических станциях по условиям его зажигания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – Томск, 2017.

5. **Обработка** водоугольной суспензии электроимпульсным способом / В.И. Мурко, М.Ю. Журков, С.Ю. Дацкевич и др. // Углекислотная и экология Кузбасса: тез. докл. XII Междунар. российско-казахстанского симпозиума. – Кемерово, 2023. С. 63.

6. **Получение** и использование углемасляного гранулята / В.И. Мурко, А.Н. Заостровский, А.Е. Аникин, Е.Н. Темлянцева // Кокс и химия. – 2022. – № 10. – С. 45–50.

7. **Разработка** и создание инновационного научно-образовательного кластера по комплексному использованию угля и продуктов его переработки / В.И. Мурко, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец и др. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. АС'2019: Труды XII Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) / под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. – Новокузнецк, 2019. – С. 48–53.

8. **Результаты** обработки водоугольной суспензии насосом-активатором / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко и др. // Углекислотная и экология Кузбасса: тез. докл. XII Междунар. российско-казахстанского симпозиума. – Кемерово, 2023. – С. 54.

9. **Результаты** исследования влияния механической активации на структурно-реологические характеристики угольных суспензий на основе фильтр-кеков / В.И. Мурко, Г.Д. Вахрушева, В.И. Федяев и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. – 2011. – Т. 4, № 6. – С. 601–612.

10. **Сенчурова Ю.А.** Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Политехнический институт ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Кемерово, 2008.

11. **Карпенко В.И.** Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в теплогенераторах малой и средней мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – Кемерово, 2022.

12. **Пат. 2346756** Российская Федерация МПК В05В 7/08. Пневматическая форсунка / Л.И. Мальцев; опубл. 02.20.2009.

13. Пат. 91885 Российская Федерация МПК В01D 35/00. Фильтр для очистки высоковязких жидкостей / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.Н. Звягин, Л.А. Смердов, В.И. Карпенко; опубл. 03.10.2010.

References

1. Zaostrovskiy, A.N., Murko, V.I. *Tekhnologiya polucheniya i ispol'zovaniya vysoko-reaktsionnogo vodougol'nogo topliva* [Technology of production and use of highly reactive coal-water fuel]. *Koks i khimiya*, 2023, no. 9, pp. 18–26.

2. Ovchinnikov, Yu.V., Boyko, E.E. *Tekhnologiya polucheniya i issledovaniya tonkodispersnykh vodougol'nykh suspenziy* [Technology of producing and studying finely dispersed coal-water suspensions]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2017, p. 308.

3. Zenkov, A.V. *Svoystva vodougol'nykh topliv s dobavleniem zhidkikh goryuchikh komponentov i kharakteristiki ikh raspyleniya dlya kotlov promyshlennoy teploenergetiki*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Properties of coal-water fuels with liquid combustible components and characteristics of their atomization for industrial thermal power boilers. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. – Tomsk, 2021.

4. Valiullin, T.R. *Povyshenie effektivnosti szhiganiya kompozitsionnogo zhidkogo topliva na teplovykh elektricheskikh stantsiyakh po usloviyam ego zazhiganiya*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of combustion of composite liquid fuel at thermal power plants according to the conditions of its ignition. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Tomsk, 2017.

5. Murko, V.I., Zhurkov, M.Yu., Datskevich, S.Yu., Bukharkin, A.A., Zhumaev, S.S., Karpenok, V.I. *Obrabotka vodougol'noy suspenzii elektroimpul'snym sposobom* [Treatment of coal-water suspension by electric pulse method]. *Tezisy dokladov XII Mezhdunarodnogo rossiysko-kazakhstanskogo simpoziuma «Uglekhimiya i ekologiya Kuzbassa»* [Proceedings of XII international Russian-Kazakh symposium “Coal chemistry and ecology of Kuzbass”]. Kemerovo, 2023, p. 63.

6. Murko, V.I., Zaostrovskiy, A.N., Anikin, A.E., Temlyantseva, E.N. *Poluchenie i ispol'zovanie uglemaslyanogo granulyata* [Production and use of coal-oil granulate]. *Koks i khimiya*, 2022, no. 10, pp. 45–50.

7. Murko, V.I., Protopopov, E.V., Temlyantsev, M.V., Chaplygin, V.V., Litvinov, Yu.A., Volkov, M.A. *Razrabotka i sozdanie innovatsionnogo nauchno-obrazovatel'nogo klastera po kom-*

pleksnomu ispol'zovaniyu uglya i produktov ego pererabotki [Development and creation of an innovative scientific and educational cluster on the integrated use of coal and processed products]. *Trudy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) «Sistemy avtomatizatsii v obrazovanii, nauke i proizvodstve. AS'2019»* [Proceedings of XII All-Russian scientific-practical conference (with international participation) “Automation systems in education, science, and production. AS'2019”]. Novokuznetsk, 2019, pp. 48–53.

8. Murko, V.I., Fedyaev, V.I., Karpenok, V.I., Vezhan, V.G., Jao, L., Li, D., Zhen', L., Chzhou, G. *Rezultaty obrabotki vodougol'noy suspenzii nasosom aktivatorom* [Results of treatment of coal-water suspension with an activator pump]. *Tezisy dokladov XII Mezhdunarodnogo rossiysko-kazakhstanskogo simpoziuma «Uglekhimiya i ekologiya Kuzbassa»* [Proceedings of XII international Russian-Kazakh symposium “Coal chemistry and ecology of Kuzbass”]. Kemerovo, 2023, p. 54.

9. Murko, V.I., Vakhrusheva, G.D., Fedyaev, V.I., Karpenok, V.I., Mastikhina, V.P., Dzyuba, D.A. *Rezultaty issledovaniya vliyaniya mekhanicheskoy aktivatsii na strukturno-reologicheskie kharakteristiki ugol'nykh suspenziy na osnove fil'tr-kekov* [Results of the study of influence of mechanical activation on the structural and rheological characteristics of coal suspensions based on filter cakes]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii*, 2011, vol. 4, no. 6, pp. 601–612.

10. Senchurova, Yu.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii szhiganiya vodougol'nogo topliva v vikhrevykh topkakh*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the technology of burning coal-water fuel in vortex furnaces. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Kemerovo, 2008.

11. Karpenok, V.I. *Sovershenstvovanie tekhnologii szhiganiya vodougol'nogo topliva v teplogeneratorakh maloy i sredney moshchnosti*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the technology of burning coal-water fuel in heat generators of low and medium power. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Kemerovo, 2022.

12. Mal'tsev, L.I. *Pnevmaticheskaya forsunka* [Pneumatic atomizer]. Patent RF, no. 2346756, 2009.

13. Murko, V.I., Fedyaev, V.I., Zvyagin, V.N., Smerdov, L.A., Karpenok, V.I. *Fil'tr dlya ochistki vysokovyazkikh zhidkostey* [Filter for purifying highly viscous liquids]. Patent RF, no. 91885, 2010.