

УДК 624.365

Василий Иванович Мурко

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», доктор технических наук, директор Центра инновационных угольных технологий, Россия, Новокузнецк, e-mail: sib_eco@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, телефон (4932) 26-97-76, e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Евгений Николаевич Бушуев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-76, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Ахмет Курманбекович Джундубаев

НИИ энергетики и экономики при Минэнерго Кыргызской Республики, кандидат технических наук, зав. лабораторией теплоэнергетики, Кыргызская Республика, Бишкек, e-mail: niiee@niiee.kg

Мырзатай Сагынбаевич Султаналиев

НИИ энергетики и экономики при Минэнерго Кыргызской Республики, старший научный сотрудник, Кыргызская Республика, Бишкек, e-mail: es@es.kg

Елена Николаевна Темлянцева

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

Технологическая оценка процессов сжигания водоугольного топлива из бурого угля месторождения «Кара-Кече» Кыргызской Республики

Авторское резюме

Состояние вопроса. Бурые угли являются ценным природным ресурсом. Наиболее подготовленными к промышленному освоению в Кыргызской Республике являются бурые угли месторождения «Кара-Кече». Для решения проблем эффективного освоения бурого угля этого месторождения необходимо исследование организации прямого сжигания водоугольного топлива из этого угля без тепловой стабилизации факела дополнительными источниками тепловыделения.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования сжигания водоугольного топлива проведены на опытно-промышленном технологическом стенде Сибирского государственного индустриального университета (г. Новокузнецк).

Результаты. Получены структурно-реологические и теплотехнические характеристики опытной партии бурого угля месторождения «Кара-Кече», а также данные по организации эффективного сжигания водоугольного топлива.

Выводы. Бурый уголь месторождения «Кара-Кече» соответствует требованиям трубопроводного транспортирования и прямого сжигания в топках котлов ТЭЦ и котельных. Полученное водоугольное топливо из бурого угля эффективно сжигается в вихревой адиабатической топке и процесс сжигания аналогичен сжиганию водоугольного топлива из каменных углей марки Г.

Ключевые слова: бурый уголь, уголь месторождения «Кара-Кече», процесс сжигания водоугольного топлива, вихревая адиабатическая топка

Vasiliy Ivanovich Murko

Siberian State Industrial University, Doctor of Engineering Sciences, Director of Innovative Coal Technologies Center, Russia, Novokuznetsk, e-mail: sib_eco@mail.ru

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Evgeniy Nikolayevich Bushuev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Akhmet Kurmanbekovich Dzhundubaev

Research Institute of Energy and Economics, Ministry of Energy of the Kyrgyz Republic, Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory of Thermal Power Engineering, Republic of Kyrgyzstan, Bishkek, e-mail: niiee@niiee.kg

Myrzatai Sagynbaevich Sultanaliev

Research Institute of Energy and Economics, Ministry of Energy of the Kyrgyz Republic, Senior Researcher, Republic of Kyrgyzstan, Bishkek, e-mail: es@es.kg

Elena Nikolaevna Temlyantseva

Siberian State Industrial University, Candidate of Engineering Sciences, Acting Head of Heat Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: kafedra-TEE@yandex.ru

Technological assessment of processes of water-coal fuel combustion of brown coal of Kara-Keche deposit of Kyrgyz Republic

Abstract

Background. Brown coals are valuable natural resource. Brown coals of the Kara-Keche deposit are most of all ready for industrial development in the Kyrgyz Republic. To solve the problems of effective development of brown coal of this deposit, it is necessary to study the issues of direct combustion of water-coal fuel (WCF) without thermal stabilization of the flame with additional sources of heat release.

Materials and methods. Experimental studies of WCF combustion have been conducted at the experimental industrial technological stand of Siberian State Industrial University, Novokuznetsk city.

Results. Structural-rheological and thermal characteristics of a pilot batch of brown coal of the Kara-Keche deposit, as well as data on the organization of efficient combustion of WCF, have been obtained.

Conclusions. Brown coal of the Kara-Keche deposit meets the requirements of pipeline transportation and direct combustion in the furnaces of boilers of thermal power plants and boiler houses. The resulted water-coal fuel of brown coal is effectively burned in a vortex adiabatic furnace and the combustion process is like the combustion of WCF of hard coals of "G" type.

Key words: brown coal, coal of the Kara-Keche deposit, combustion of water-coal fuel, vortex adiabatic furnace

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.5.012-017

Введение. Бурые угли являются ценным природным ресурсом, область применения которого ежегодно расширяется. При глубокой переработке углей выделяют пять основных направлений их применения:

- углехимия (переработка с получением на основе углей химических продуктов);
- коксохимия (получение металлургического кокса и химических продуктов);
- получение углеродных материалов (в том числе, наноматериалов);
- получение тепловой и электрической энергии;
- переработка отходов (получение из техногенных отходов добычи и обогащения углей различных материалов, тепловой и электроэнергии) [1, 2].

Экономические и технологические факторы добычи, транспортировки и переработки бурых углей в значительной степени определяют перспективность применения их в коксохимии, энергетике и углехимии и конкурентоспособность продуктов, получаемых из них [3].

Одним из перспективных месторождений бурых углей Кыргызской Республики является Кавакское, общие геологические запасы бурого угля которого оцениваются в 2,5 млрд т [4].

Месторождения Кавакского бассейна содержат угли марок Б (бурый, группа ЗБ, подгруппе ЗБФ), которые по своим качественным харак-

теристикам могут использоваться для производства газа, брикетов, водоугольного топлива и синтетического жидкого топлива, получения органических кислот и активированного угля [4–7] и способны обеспечить развитие угольной промышленности и энергетики Кыргызской Республики на ближайшие десятилетия.

Наиболее подготовленными к промышленному освоению являются угли месторождения «Кара-Кече» Кавакского бассейна. Экономическая привлекательность разработки и применения бурых углей в значительной степени зависит от способов и технологии их транспортировки к потребителям в сложных горных условиях региона. Прогрессивным вектором развития этого направления являются гидротранспортные топливные системы [8, 9]. При их применении прямое сжигание водоугольного топлива после его гидротранспорта без предварительного обезвоживания или сушки позволяет достаточно эффективно решить задачу транспортирования угля с соблюдением требований по условиям надежности, экологичности и экономичности работы логистического терминала.

Экспериментальные исследования процессов сжигания кавакского бурого угля месторождения «Агулак» в виде водоугольного топлива (ВУТ) [10] показали, что затраты тепла на испарение влаги и снижение коэффициента полезного действия (КПД) брутто котлоагрегата

полностью компенсируются на стадии транспорта и топливоподготовки ТЭС.

В целях решения проблем эффективного освоения бурого угля месторождения «Кара-Кече» необходима организация прямого сжигания ВУТ из этого угля без тепловой стабилизации факела дополнительными источниками тепловыделения.

Для этого проведены эксперименты по сжиганию опытной партии ВУТ из бурого угля месторождения «Кара-Кече» Кавакского бассейна. Представительная проба угля представлена Госпредприятием Кыргызкомур.

Методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на опытно-промышленном технологическом стенде Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ) (г. Новокузнецк, РФ). Схеме участка сжигания топлива стенда представлена на рис. 1.

Линия сжигания ВУТ включает следующее основное оборудование:

- теплоизолированная вихревая камера сжигания (вихревая топка, горелочное устройство с форсункой, беспровальная решетка, дутьевые сопла, датчики температуры);
- водогрейный котел-утилизатор;
- пылеулавливающая система очистки дымовых газов (пылеуловитель вихревой, фильтр рукавный металлотканевый);
- аппарат воздушного охлаждения;
- дымовая труба;
- тягодутьевое и вспомогательное оборудование (дымосос, вентиляторы дутьевые, насос водяной, воздухопроводы, дымоходы, датчики давления, расходомер, датчики температуры);
- система регулируемой подачи топлива (расходная емкость, винтовой насос, фильтр тонкой очистки, датчики давления и температуры, расходомер, трубопроводы);

- компрессор, система подачи сжатого воздуха (ресивер, расходомер, регулятор давления, трубопроводы);

- пульт местного управления и система автоматического управления.

Отличительной особенностью прямого (непосредственного) сжигания распыленного ВУТ в потоке воздуха в пределах камеры горения является возможность организации параллельно протекающих процессов: горения частиц угля на поверхности агломерированных капель с одновременным испарением влаги из центральной части объема капель, которое интенсифицирует взаимодействие пара с угольными частицами.

Условия горения водоугольного топлива в обычных топочных устройствах в прямоточном факеле весьма неблагоприятны. Горение частиц топлива происходит в обедненной кислородом атмосфере в области с понижающейся температурой. Это затягивает процесс горения, увеличивает недожог и может привести к полному обрыву факела. Преодолеть эти недостатки удается при реализации процесса с многократной рециркуляцией частиц топлива к корню факела в зоне активного горения. Такой процесс реализуется в топках с факельным сжиганием угля при вихревом движении газов. В связи с этим вихревые топки, в которых реализуется принцип многократного возвращения частиц к корню факела, весьма эффективны для сжигания водоугольных суспензий [11].

Сжигание опытных партий суспензионного угольного топлива осуществляли в специальной теплоизолированной вихревой камере сжигания (вихревая топка с горизонтальной осью вращения распыленного топлива и топочных газов), футерованной шамотным кирпичом и оборудованной горелочным устройством.

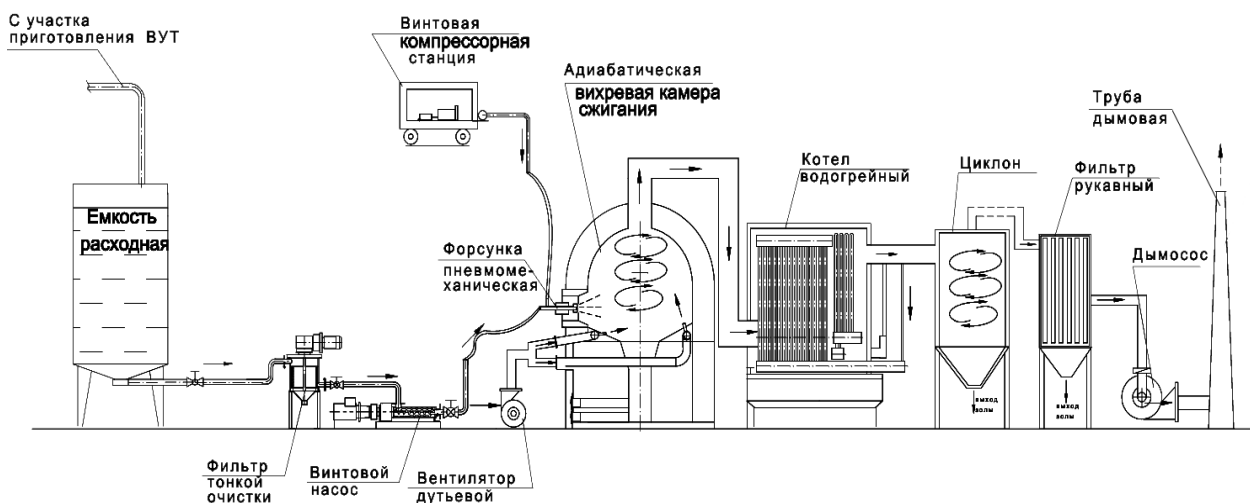


Рис. 1. Линия сжигания технологического стенда СибГИУ

Горелочное устройство установлено с фронта топки и крепится к раме конструкции топки. В горелочное устройство по оси установлена форсунка, а с боку к оси – растопочная соляная горелка. Топливо из расходных емкостей винтовым насосом подается через фильтр тонкой очистки к форсунке горелочного устройства. Регулирование производительности подачи топлива осуществляется путем изменения частоты вращения двигателя насоса с помощью частотного преобразователя. К форсунке одновременно с топливом подводится сжатый воздух от винтового ротационного компрессора для распыления ВУТ в пространство топки. Для обеспечения процесса горения в топку дополнительно тангенциально подается воздух от дутьевого вентилятора. Подача дутьевого воздуха в топку осуществляется через специальные дутьевые сопла, расположенные в кладке корпуса топки, тангенциально, по касательной к условной окружности. В нижней части камеры сжигания установлена беспровальная решетка, через которую подается дутьевой воздух от вентилятора. Подача воздуха предназначена для предварительного нагрева камеры сжигания с использованием любых видов твердого топлива (уголь, дрова и другие горючие материалы).

Температуру в камере сжигания и кирпичной кладке камеры контролировали с помощью термопар. Для измерения давления топлива и сжатого воздуха использовали датчики давления, расхода топлива и расхода сжатого воздуха. Результаты измерений фиксировали при помощи технологических измерителей.

Технология сжигания ВУТ в теплоизолированной вихревой топке включает в себя следующие операции:

- первоначальный разогрев топки до температуры 450–550 °С (осуществляется при помощи дизельной горелки или рядового угля);

- дальнейший прогрев топки до достижения температуры в топке 900–1000 °С и на внутренней поверхности кладки 400–500 °С путем совместной работы соляной горелки и форсунки ВУТ;

- подачу ВУТ и прекращение подачи дополнительного топлива при достижении заданной температуры в топке (900–1000 °С) и на внутренней поверхности кладки (400–500 °С) (при выполнении этих условий водоугольное топливо горит без «подсветки» и происходит стабильная эвакуация горячих газов по газоходу в водогрейный котел-утилизатор марки КВр-0,2 и далее через пылеулавливающую систему очистки газов в дымовую трубу; при этом нагретая котловая вода направляется в аппарат воздушного охлаждения воды или в систему отопления помещения);

- управление и визуальный контроль за процессом сжигания (осуществляется с пульта управления и системы автоматического управления).

Результаты исследования. Характеристики исходного угля и опытной партии ВУТ представлены в табл. 1.

Сжигание опытной партии ВУТ из бурого угля разреза «Кара-Кече» производилось из холодного состояния топки и включало рассмотренные выше технологические операции:

- розжиг и прогрев вихревой топки путем сжигания угля на беспровальной решетке до достижения в топке температуры 400–500 °С продолжительностью 3 ч;

- подачу диспергированного сжатым воздухом ВУТ в вихревую топку с «подсветкой» факелом соляной горелки до достижения в топке температуры 950 °С продолжительностью 1 ч (расход ВУТ в начале сжигания составил 40 кг/ч и постепенно увеличивался до 90 кг/ч);

- отключение соляной горелки, регулировки производительности насоса подачи ВУТ, дымососа и дутьевого вентилятора для обеспечения требуемой температуры топки, при которой возможно стабильное горение топлива без «подсветки» 950–1100 °С продолжительностью 0,5 ч.

Результаты сжигания серии опытных партий водоугольного топлива, приготовленных из бурого угля и отходов углеобогащения каменного угля (фильтр-кека) марки Г, представлены в табл. 2.

Таблица 1. Характеристики бурого угля разреза «Кара-Кече» и опытной партии ВУТ

Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение	
		уголь	ВУТ
Марка угля	–	БЗ	БЗ
Крупность частиц	мм	0-6	0-0,25
Влага общая	%	12,5	47,0
Зольность A^d	%	16,7	16,7
Выход летучих	%	28,7	28,7
Эффективная вязкость при скорости сдвига 81c^{-1}	мПа·с	–	не более 450
Стабильность	сут.	–	не менее 15
Низшая теплота сгорания	МДж/кг (ккал/кг)	20,23 (4800)	10,46 (2500)

Таблица 2. Результаты сжигания серии опытных партий ВУТ из бурого угля и отходов углеобогащения каменного угля (фильтр-кека) марки Г

Наименование показателя	Единица измерения	Числовое значение для ВУТ из:	
		бурого угля	фильтр-кека
Расход ВУТ	кг/ч	97	110
Низшая теплота сгорания (расчетная)	ккал/кг	2475	2160
Давление ВУТ	атм.	1,5	1,6
Давление сжатого воздуха	атм.	1,5	1,6
Расход воды через котел	м ³ /ч	5,4	5,4
Температура в топке	°С	1050	1020
Температура воды на входе в котел	°С	59	62
Температура воды на выходе из котла	°С	90	92
Теплопроизводительность котельной установки	Гкал/ч	0,167	0,162

При сжигании опытной партии ВУТ из бурого угля, так же как из отходов углеобогащения каменного угля марки Г, установлено, что температура в пространстве топки является параметром, легко управляемым путем изменения расхода топлива и дутьевого воздуха. Во время работы установки расход топлива (ВУТ) изменяли в интервале от 60 до 120 кг/ч. При этом температура в топке при подаче ВУТ изменялась в диапазоне 950–1100 °С.

Выход на стабильный режим работы без «подсветки» (из холодного состояния топки) вихревой топки сжигания ВУТ осуществлен через 5 ч работы при прогреве поверхности кладки топки до температуры 500–550 °С и при температуре в топке 1000–1100 °С. По мере прогрева кладки топки до температуры 600–650 °С расход водоугольного топлива можно увеличить до 90–100 кг/ч. В процессе сжигания ВУТ разрежение в топке поддерживали на уровне 50 Па.

При сжигании опытной партии ВУТ, приготовленного на основе бурого угля разреза «Кара-Кече», установлено, что устойчивое горение распыленных капель водоугольного топлива начинается сразу у среза форсунки без визуальной заметной зоны термической подготовки угля при температуре в зоне активного горения не менее 950 °С.

Выводы. Структурно-реологические и теплотехнические характеристики опытной партии, полученной из бурого угля, соответствуют требованиям трубопроводного транспортирования и прямого сжигания в топках котлов ТЭЦ и котельных.

Полученное водоугольное топливо из бурого угля месторождения «Кара-Кече» (Республика Кыргызстан) эффективно сжигается в вихревой адиабатической топке. При этом процесс сжигания аналогичен сжиганию ВУТ из каменных углей марки Г на основе отходов углеобогащения.

Изменение расхода ВУТ на основе бурого угля и фильтр-кека (97 и 110 кг/ч соответственно) объясняется разностью калорийности бурого угля и фильтр-кека (2500 и 2160 ккал/кг).

Целесообразно рассмотреть разработку технико-экономического обоснования для создания гидротранспортного энергетического комплекса на базе бурых углей разреза «Кара-Кече» с использованием технологии водоугольного топлива.

Список литературы

1. Прошунин Ю.Е., Школлер М.Б. О перспективных направлениях глубокой переработки каменных и бурых углей в Кемеровской области // Кокс и химия. – 2016. – № 2. – С. 10–16.
2. Кондиционирование угольных отходов с высоким содержанием влаги и золы / М.Б. Школлер, С.А. Казимиров, М.В. Темлянец, А.Е. Базегский // Кокс и химия. – 2015. – № 4. – С. 2–6.
3. Прошунин Ю.Е., Школлер М.Б., Лобанов В.В. Технологический проект проблемы и направления процессов глубокой переработки каменных и бурых углей // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24, № 3. – С. 405–418.
4. Кавакский буроугольный бассейн: перспективы комплексного использования сырья и экологические проблемы освоения / К.А. Кожобаев, К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, К.О. Дуйшеев // Горный журнал. – 2016. – № 8. – С. 66–71.
5. Мурко В.И., Федяев В.И., Хмяляйнен В.А. Физико-технические основы водоугольного топлива. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2009. – 196 с.
6. Совершенствование технологического комплекса по приготовлению и сжиганию суспензионного угольного топлива на основе отходов углеобогащения / В.И. Мурко, В.И. Федяев, Х.Л. Айнетдинов и др. // Уголь. – 2013. – № 4. – С. 50–52.
7. Угли Киргизии и их использование: сб. науч. тр. / под ред. А.С. Джаманбаева. – Фрунзе: Фрунзенский политехнический ин-т, 1980. – 133 с.
8. Зайденварг В.Е., Кондратьев А.С., Мурко В.И. Водоугольное топливо, трубопроводное транспортирование и сжигание на теплоэлектростанциях // Уголь. – 2019. – № 8(1121). – С. 76–82.
9. Гидротранспортные топливно-энергетические комплексы. Российско-Кыргызское научно-техническое сотрудничество в области теплоэнергетики / В.И. Мурко, А.К. Джундубаев, М.П. Баранова и др. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 250 с.
10. Экспериментальное сжигание кавакского бурого угля в виде водоугольной суспензии / Г.В. Козьмин, А.К. Джундубаев, Г.Н. Делягин и др. // Известия АН Кирг. ССР. – 1981. – № 6. – С. 3–9.

11. **Сжигание** угольных шламов с применением вихревых технологий / В.И. Багрянцев, С.А. Бровченко, М.В. Темлянцев и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 1(107). – С. 153–158.

References

1. Proshunin, Yu.E., Shkoller, M.B. O perspektivnykh napravleniyakh glubokoy pererabotki kamennykh i burykh ugley v Kemerovskoy oblasti [On promising directions of deep processing of black and brown coal in Kemerovo region]. *Koks i khimiya*, 2016, no. 2, pp. 10–16.

2. Shkoller, M.B., Kazimirov, S.A., Temlyantsev, M.V., Bazegskiy, A.E. Konditsionirovanie ugol'nykh otkhodov s vysokim sodержaniem vlagi i zoly [Conditioning of waste coal with high moisture and ash content]. *Koks i khimiya*, 2015, no. 4, pp. 2–6.

3. Proshunin, Yu.E., Shkoller, M.B., Lobanov, V.V. Tekhnologoproektnye problemy i napravleniya protsessov glubokoy pererabotki kamennykh i burykh ugley [Technological and design problems and directions of processes of deep processing of hard and brown coal]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2016, vol. 24, no. 3, pp. 405–418.

4. Kozhobaev, K.A., Tazhibaev, K.T., Tazhibaev, D.K., Duysheev, K.O. Kavakskiy burougol'nyy basseyn: perspektivy kompleksnogo ispol'zovaniya syr'ya i ekologicheskie problemy osvoeniya [Kavak lignite basin: prospects of integrated use of raw materials and environmental problems of development]. *Gornyy zhurnal*, 2016, no. 8, pp. 66–71.

5. Murko, V.I., Fedyayev, V.I., Khyamyaynen, V.A. *Fiziko-tekhnicheskie osnovy vodougol'nogo topliva* [Physical and technical foundations of coal-water fuel]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2009. 196 p.

6. Murko, V.I., Fedyayev, V.I., Aynetdinov, Kh.L., Yakovenko, A.V., Voskoboynikov, P.S. Sovershenstvo-

vanie tekhnologicheskogo kompleksa po prigotovleniyu i szhiganiyu suspenzionnogo ugol'nogo topliva na osnove otkhodov ugleobogashcheniya [Improvement of technological complex for preparation and combustion of slurry coal fuel based on waste coal]. *Ugol'*, 2013, no. 4, pp. 50–52.

7. Dzhamanbaev, A.S. *Ugli Kirgizii i ikh ispol'zovanie: sbornik nauchnykh trudov* [Coal of Kyrgyzstan and its use: proceedings]. Frunze: Frunzenskiy politekhnicheskiy institut, 1980. 133 p.

8. Zaydenvarg, V.E., Kondrat'ev, A.S., Murko, V.I. Vodougol'noe toplivo, truboprovodnoe transportirovanie i szhiganie na teploelektrostantsiyakh [Water-coal fuel, pipeline transportation and combustion in thermal power plants]. *Ugol'*, 2019, no. 8(1121), pp. 76–82.

9. Murko, V.I., Dzhundubaev, A.K., Baranova, M.P., Biybosunov, A.I., Kulagin, V.A. *Gidrotransportnye toplivno-energeticheskie komplekсы. Rossiysko-Kyrgyzskoe nauchno-tekhnicheskoe sotrudnichestvo v oblasti teploenergetiki* [Hydro transport fuel and energy complexes. Russian-Kyrgyz scientific and technical cooperation in the field of thermal power engineering]. Krasnoyarsk: Sibirskiy federal'nyy universitet, 2015. 250 p.

10. Koz'min, G.V., Dzhundubaev, A.K., Delyagin, G.N., Kashirin, F.T., Borzionova, V.I. Eksperimental'noe szhiganie kavakskogo burougol'nyy v vide vodougol'noy suspenzii [Experimental combustion of Kavak brown coal in the form of water-coal suspension] *Izvestiya AN Kirg. SSR*, 1981, no. 6, pp. 3–9.

11. Bagryantsev, V.I., Brovchenko, S.A., Temlyantsev, M.V., Rybushkin, A.A., Kazimirov, S.A. Szhiganie ugol'nykh shlamov s primeneniem vikhrevykh tekhnologiy [Combustion of coal sludge using vortex technologies]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 1(107), pp. 153–158.