

Оригинальная статья

УДК 622.749

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-53-65

**РАЗРАБОТКА И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННЫХ УГОЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В СИБИРСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ИНДУСТРИАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

© 2024 г. В. И. Мурко, Ю. Е. Прошунин, М. В. Темлянцев, Е. Н. Темлянцева,
К. В. Беляев

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Статья посвящена юбилею кафедры теплоэнергетики и экологии (90 лет). Приводятся научные результаты, полученные в области инновационных угольных технологий, в том числе при участии сотрудников кафедры. Основные исследования выполнены в экспериментальной лаборатории, созданной при реализации проекта «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения». Разработаны технико-экономические обоснования создания миниТЭЦ на отходах углеобогащения обогатительных фабрик АО «УК «Кузбассразрезуголь» и других угольных компаний, перевода угольных котлов котельных на водоугольное топливо и бизнес-план по созданию технологического комплекса по частичной замене пылеугольного топлива водоугольным топливом, приготовленным из угольных шламов ОФ, на теплоэнергетических объектах ЕВРАЗ ЗСМК. Представлены основные технологические направления, развиваемые Центром инновационных угольных технологий (ЦИУТ) СибГИУ в области углеобогащения и переработки угля, которые связаны с экологически безопасными способами утилизации тонкодисперсных угольных шламов с использованием технологий водоугольного топлива и окускования (брикетирования), дообогащения методом масляной грануляции, а также принципиально новые – ожижение угля путем экстремальных механохимических и электрофизических воздействий на водоугольную суспензию. Описаны результаты по разработке и созданию локальных энергоисточников путем использования газификации бурых и низкометаморфизированных каменных углей. Показана возможность экологически чистой утилизации золошлаковых отходов и породных отвалов обогатительных фабрик. Представлены разработки уникального оборудования ЦИУТ (бикамерная вибромельница, реактор-смеситель, фильтры грубой и тонкой очистки, насос-активатор, адиабатическая вихревая камера сжигания и др.) для приготовления и эффективного сжигания водоугольного топлива на основе угля и тонкодисперсных угольных шламов.

Ключевые слова: инновационные угольные технологии, отходы углеобогащения, водоугольное топливо, угольный шлам, масляная грануляция, газификация водоугольной суспензии, газификация кускового угля, международное сотрудничество

Благодарности: авторы выражают признательность специалистам Центра инновационных угольных технологий Сибирского государственного индустриального университета и ООО «Научно-производственный центр "Сибэкотехника"» за предоставленные материалы.

Финансирование: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00728).

Для цитирования: Мурко В.И., Прошунин Ю.Е., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Беляев К.В. Разработка и развитие инновационных угольных технологий в Сибирском государственном индустриальном университете. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):53–65. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-53-65](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-53-65)

Original article

CREATION AND DEVELOPMENT OF INNOVATIVE COAL TECHNOLOGIES AT THE SIBERIAN STATE INDUSTRIAL UNIVERSITY

© 2024 V. I. Murko, Y. E. Proshunin, M. V. Temlyantsev, E. N. Temlyantseva, K. V. Belyaev

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The article is dedicated to the anniversary of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology (90 years). The scientific results obtained in innovative areas of technology, including with the participation of the department staff, are presented. The main studies were carried out in the experimental laboratory created during the implementation of the high-tech project "Development of technology and creation of a pilot model of an operating energy-generating complex operating on coal washing waste". Feasibility studies have been developed for the creation of a mini CHPP on coal washing waste from the washing plants of JSC «Kuzbassrazrezugol» and other southern enterprises, the transfer of coal boilers of boiler houses of washing plants (WPP) to water-coal fuel and a business plan for the creation of technological complexes for partial replacement of pulverized coal fuel with water-coal fuel prepared from southern WPP sludge at the thermal power facilities of EVRAZ ZSMK. The article presents the main technological directions developed by the Center of Innovative Coal Technologies (CICT) of SibSIU in the field of coal beneficiation and coal processing related to environmentally friendly methods of utilization of fine coal sludge (FCS) using coal-water fuel (CWF) technologies and agglomeration (briquetting), additional enrichment, oil granulation method, as well as a fundamentally new one - coal oxidation using extreme mechanomechanical and electrophysical effects on coal-water suspension chemistry. The article describes the results of development and creation of local energy sources using gasification of brown and low-metamorphosed hard coals. The possibility of utilization of environmentally friendly ash and slag waste and rock dumps of enrichment plants is shown. The developments of unique equipment of the Central Institute of High Technologies (bi-chamber vibratory mill, reactor-mixer, coarse and fine filters, pump-activator, adiabatic vortex combustion chamber, etc.) for heating and efficient combustion of coal-water fuel based on both coal and FCS are presented. Within the framework of international scientific and technical cooperation, the Institute of High Technologies of the Academy of Sciences of Heilongjiang and the Heilongjiang University of Science and Technology have been signed.

Keywords: Department anniversary, innovative coal technologies, coal enrichment waste, coal-water fuel, coal sludge, oil granulation, gasification of coal-water suspension, gasification of coal

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the colleagues of the Center of Innovative Coal Technologies and the Scientific and Production Center "Sibecotechnika" for providing the materials for the article.

Funding: The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation No. 23-29-00728.

For citation: Murko V.I., Proshunin Y.E., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Belyaev K.V. Creation and development of innovative coal technologies at the Siberian State Industrial University. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):53–65. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-53-65](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-53-65)

Введение

Защита окружающей среды от загрязнений промышленных предприятий, рациональная и безопасная добыча, транспортировка и потребление ископаемых топлив очень важны для Кемеровской области – Кузбасса, ведь от них зависят здоровье граждан, численность населения, а также эффективность экономической деятельности региона. В настоящее время особое внимание уделяется развитию технологий, способствующих росту угледобычи, повышению эффективности перера-

ботки угля и снижению негативного воздействия угольной отрасли на окружающую среду. Сибирский государственный индустриальный университет во взаимодействии с научно-исследовательскими институтами и организациями (ВНИИГидроуголь, Новокузнецкое отделение института ВНИИПИгидротрубопровод, ООО НПЦ «Сибэко-техника») успешно развивает тематику экологически чистых угольных технологий. Главным достижением в этой области можно считать успешную реализацию в 2010 – 2012 гг. совместно с



Рис. 1. Экспериментальная лаборатория СибГИУ

Fig. 1. SibGIU Experimental Laboratory

ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой» высокотехнологичного проекта «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения». В рамках этого проекта была создана экспериментальная лаборатория (рис. 1), позволяющая исследовать в стендовых условиях процессы приготовления, гидротранспортирования, хранения и сжигания водоугольных суспензий, полученных на основе различного сырья (угля, промпродукта, угольных шламов). Созданная лаборатория позволяет также решать научно-технологические задачи в области обогащения угля и других полезных ископаемых, переработки золошлаковых отходов. Фактически в настоящее время в СибГИУ создан научно-технологический кластер по комплексному использованию угля и продуктов его переработки с получением новых продуктов: водоугольного топлива, углеуголемасляной суспензии, углемасляного гранулята, комбинированных топливных и технологических брикетов, полуккокса, генераторного и синтез-газа, угольной нефти и др. [1 – 3].

Указанные выше научные направления реализуются созданным в университете Центром инновационных угольных технологий (ЦИУТ).

Лабораторное оснащение Центра включает в себя оборудование:

- для обогащения угля и угольных шламов;
- для переработки угля, включая его дробление и классификацию;
- для приготовления суспензионного водоугольного топлива (ВУТ) как на основе рядового угля и его отсевов, промпродукта, так и тонкодисперсных отходов углеобогащения (бикамерная вибромельница, реактор-смеситель, фильтры грубой и тонкой очистки, насос-активатор);
- для гидротранспортирования полученного «жидкого» угля по трубопроводу и его хранения в емкостях;
- для получения углемасляного гранулята и, на его основе, углеводомаляной суспензии;
- для получения брикетов на основе угля, тонкодисперсных отходов углеобогащения, углемасляного гранулята и др.;
- для сжигания полученных видов топлива в котельной установке с топливной адиабатической камерой слоевого и вихревого типов;
- для глубокой переработки углеводомаляной суспензии с получением синтетической угольной нефти;
- получения твердеющей закладки на основе породы углеобогатительных фабрик и золошла-

Характеристика топлива, приготовленного на основе фильтр-кеков ОФ
Table 1. Characteristics of fuel prepared on the basis of filter cakes OF

Показатель	Ед. изм.	Технологические комплексы				
		ОФ «Кедровская»	ОФ «Коксовая-Бачатская»	ОФ «Краснобродская-Коксовая»	ОФ «Энергетическая»	
		28.09.2021.	13.10.2021	18.10.2021	06.10.2021	26.10.2021
Грансостав						
0,355 – 1,0 мм	%	0,4	0,1	0,3	0,5	–
0,250 – 0,355 мм	%	0,3	0,7	1,5	0,7	0,1
0,071 – 0,250 мм	%	14,9	23,3	21,4	17,4	13,6
0 – 0,071 мм		84,4	75,9	76,8	81,4	86,3
Массовая доля твердой фазы	%	58,3	58,5	57,8	57,7	58,3
Зольность твердой фазы	%	29,3	22,0	25,3	21,2/21,2	21,2
Эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с ⁻¹	мПа·с	356	119	148	252	341
Низшая теплота сгорания	ккал/кг (МДж/кг)	3026 (12,6)	3482 (14,5)	3206 (13,4)	3483 (14,5)	3525 (14,7)
Энергоемкость приготовления	кВт·ч/т	15,0	15,0	15,0	не более 10,0	15,0
Себестоимость приготовления / в т.ч. стоимость добавки	руб./т	450/150	450/150	450/150	не более 400/150	450/150

ковых отходов (ЗШО), золы угольных теплоэлектростанций (ТЭЦ), государственных районных электростанций (ГРЭС) и котельных, в том числе при сжигании ВУТ;

– для получения гидросмеси на основе породы и ЗШО для заполнения выработанных карьеров при их рекультивации.

Центр имеет современную углехимическую лабораторию, а также пользуется аналитическим оборудованием центра коллективного пользования «Материаловедение», где проводятся различные виды анализа углей и продуктов их переработки [4].

Основные результаты

При участии работников и студентов кафедры теплоэнергетики и экологии на базе ЦИУТ проводятся исследования в рамках выполняемых грантов и хоздоговоров.

Ниже представлены основные научные и практические результаты разработки и внедрения по различным направлениям.

Утилизация тонкодисперсных угольных шлаков

Для решения проблемы накопления токсичных тонких угольных шламов на обогатительных фабриках предложена технология приготовления и сжигания ВУТ, полученного на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения. В качестве

примера в табл. 1 и 2 представлены результаты приготовления и сжигания ВУТ ОФ АО УК «Кузбассразрезуголь».

Разработанные технология и оборудование для утилизации угольных шламов путем приготовления на их основе водоугольного топлива и его сжигания вихревым способом обеспечивают:

- необходимые структурно-реологические характеристики;
- статическую стабильность;
- высокую эффективность сжигания с уровнем вредных выбросов существенно ниже допустимых значений [5].

По результатам выполненных исследований разработано предварительное технико-экономическое заключение создания котельного модуля на ВУТ производительностью 7,56 МВт (6,5 Гкал/ч), собственной миниТЭЦ мощностью 6 и 12 МВт и строительства альтернативной котельной на ВУТ взамен угля мощностью 11,223 МВт (9,65 Гкал/ч). В указанных исследованиях активное участие принимали студенты кафедры В.В. Вишняк и Е.К. Щеголев, которые успешно выступили на молодежном XI Инновационном Конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» [6].

На АО УК «Кузбассразрезуголь» предусматривается внедрение рассматриваемой технологии при строительстве новых объектов по обогащению угля.

Результаты сжигания опытных партий ВУТ, приготовленного на основе фильтр-кеков ОФ
Table 2. The results of burning experimental batches of VUT prepared on the basis of filter cakes OF

Наименование параметра	Ед. изм.	Фактическое значение					
		ОФ «Кедровская»	ОФ «Коксовая-Бачатская»		ОФ «Краснобродская-Коксовая»	ОФ «Энергетическая»	
		15.10.2021	15.10.2021	26.10.2021	19.10.2021	19.10.2021	26.10.2021
Низшая теплота сгорания	ккал/кг (МДж/кг)	3026 (12,16)	3482 (14,57)	-	3206 (13,42)	3483 (14,58)	3483 (14,58)
Расход ВУТ	кг/ч	77	65	-	75	70	75
Давление ВУТ	атм. (МПа)	2,0 (0,20)	1,8 (0,18)	-	1,9 (0,19)	2,0(0,20)	2,0 (0,20)
Давление сжатого воздуха	атм. (МПа)	2,0(0,20)	1,8 (0,18)	-	1,9 (0,19)	2,0(0,20)	2,0(0,20)
Температура в топке	°С	1050	1050	-	1050	1100	1100
Температура газов на входе в котел	°С	500	500	-	500	650	620
Температура воды на входе в котел	°С	86	78	-	71	88	73
Температура воды на выходе из котла	°С	53	45	-	38	54	40
Расход воды через котел	м³/ч	4,8	4,8	-	4,8	4,8	5,0
Теплопроизводительность топки	ккал/ч	0,158	0,158	-	0,158	0,163	0,165
Температура перед циклоном	°С	167	194	192	183	198	184
Разрежение перед циклоном (статическое)	кгс/м²	-53,6	-57,7	-63,8	-51,1	-70,16	-50,73
Скорость газа перед циклоном	м/с	23,1	25,6	22,9	24,5	28,5	20,7
Расход газов							
перед циклоном	м³/ч	2607	2890	2589	2766	3222	2337
при нормальных условиях	нм³/ч	1621	1693	1506	1607	1875	1358
Содержание в дымовых газах							
O ₂	%	18,4	17,2	17,6	17,5	17,7	17,3
RO ₂	%	2,3	3,4	3,0	3,2	3,0	3,3
CO	мг/м³	86,1/375*	356/375*	170,5	161,8/375*	187,5/375*	235,2
NO	мг/м³	56,1/750*	54,9/750*	70,56	79,8/750*	79,8/750*	64,3
NO ₂	мг/м³	0/750*	2,0/750*	0	2,0/750*	2,0/750*	0
SO ₂	мг/м³	8,0/1200*	0/1200*	0	8,0/1200*	0/1200*	0
* – нормативы удельных выбросов (ГОСТ Р50831 – 95).							

Другим важным направлением утилизации угольных шламов является строительство технологических комплексов по приготовлению ВУТ при обогатительных фабриках с гидротранспортной доставкой полученного топлива на близлежащую угольную ТЭЦ (ГРЭС). Для реализации

указанного направления разработан бизнес-план по частичной замене пылеугольного топлива водоугольным топливом, доставленным гидротранспортом Западно-Сибирской ТЭЦ. При этом на промплощадке Западно-Сибирской ТЭЦ оборудуется участок приема и хранения ВУТ с насос-

ной станцией подачи топлива в существующие котлы. Существенными положительными факторами этого проекта помимо высокой экономичности (снижение стоимости топлива при замене 1 т угля на эквивалентное количество ВУТ составляет 700 руб.) являются отсутствие необходимости замены тягодутьевого оборудования ввиду только частичной замены пылеугольного топлива водоугольным (до 25 – 30 % по калорийности) и снижение вредных выбросов в дымовых газах (NO_x) до 30 %.

Одним из направлений утилизации угольных шламов является окускование с получением на их основе брикетного топлива [7; 8]. Существующая технология брикетирования с применением связующих веществ существенно повышает себестоимость процесса, поэтому использование рассматриваемой технологии для брикетирования угольных шламов экономически нецелесообразно. Большое внимание в Центре было уделено технологии брикетирования угольных шламов без использования связующих веществ [9].

Влажность a , при которой шлам переходит в относительно сыпучее состояние и создаются предпосылки для его переработки, составляет порядка 14 – 15 % [10]. Исследованиями по брикетированию угольных шламов углей различной стадии метаморфизма, проведенными специалистами СибГИУ и ООО НПЦ «Сибэкотехника», показано, что для получения прочных брикетов без использования связующих веществ влажность исходной шихты, подаваемой в брикетный пресс, должна составлять 15 – 20 %. С учетом исходной влажности угольного шлама, составляющей 20 – 45 %, разработана технологическая схема брикетирования, отличительной особенностью которой является возврат в голову процесса части высушенных брикетов (рис. 2). Таким образом, обеспечивается требуемая влажность исходной шихты для получения качественных брикетов. Кроме того, разработана технологическая линия безопасной термической сушки брикетов, изготовленных из угольных шламов с высоким выходом летучих веществ (рис. 3).

Фильтр-кек с площадки хранения подается погрузчиком в приемное устройство ленточного конвейера, которым доставляется в смеситель-брикетировщик. Одновременно из промежуточного бункера отсева сухих брикетов часть отсева подается обратно в смеситель-брикетировщик, а другая их часть подается в бункер топлива для работы теплогенератора с получением горячего агента для сушила. Сырые спрессованные брикеты вибропитателем подаются на ленточное сушило, работа которого основана на омывании

(обтекании) высушиваемых брикетов потоком сушильного агента. Одновременно на ленточное сушило подается сушильный агент.

Высушенные брикеты ленточным конвейером передаются в бункер готовых брикетов; далее брикеты направляются потребителю.

В качестве сушильного агента применяется смесь дымовых газов теплогенератора и отработанного сушильного агента. Эта смесь имеет температуру не выше 200 °С и пониженную концентрацию кислорода.

Сушильный агент циркулирует по замкнутому контуру (рис. 3). Соответствующая количеству добавляемых дымовых газов часть сушильного агента сбрасывается через дымовую трубу в атмосферу, а основная масса смешивается с дымовыми газами теплогенератора, температура смеси доводится до 200 °С и эта смесь направляется в качестве рабочего сушильного агента в сушильный агрегат. В теплогенераторе в качестве топлива используется ВУТ, приготовленное из фильтр-кека обогатительной фабрики. В дымовую трубу дымососом подается только часть отработанного сушильного агента.

Для предотвращения загрязнения атмосферы при возможном пылении, а также при непредвиденном выделении летучих веществ из брикетов (например, при отказе контролирующих приборов и повышении температуры сверх 220 °С), сушильный агрегат дополнительно оборудуется аспирационной системой. Аспирационный поток направляется в топку теплогенератора в качестве дутьевого воздуха. Пыль и непредвиденно выделившиеся летучие вещества содержатся в дутьевом воздухе в ничтожно малых концентрациях, поэтому исключаются пожаро- и взрывоопасность, но при попадании в пространство топки угольная пыль и возможно содержащиеся в воздухе летучие вещества угля неизбежно сгорят. Таким образом, исключается загрязнение атмосферы при работе сушильного агрегата, предлагаемая схема сушки обеспечивает взрыво- и пожаробезопасную сушку брикетов из угольных отходов марки Г.

Для обеспечения рабочих параметров сушильного агента дымовые газы теплогенератора смешиваются с отработанным сушильным агентом. Управление процессом смешивания отработанного сушильного агента с горячими газами теплогенератора осуществляется по температуре сушильного агента на входе в сушилку. Заданное значение температуры поддерживается регулированием количеств сжигаемого топлива в теплогенераторе или сбрасываемого в трубу отработанного сушильного агента [11].

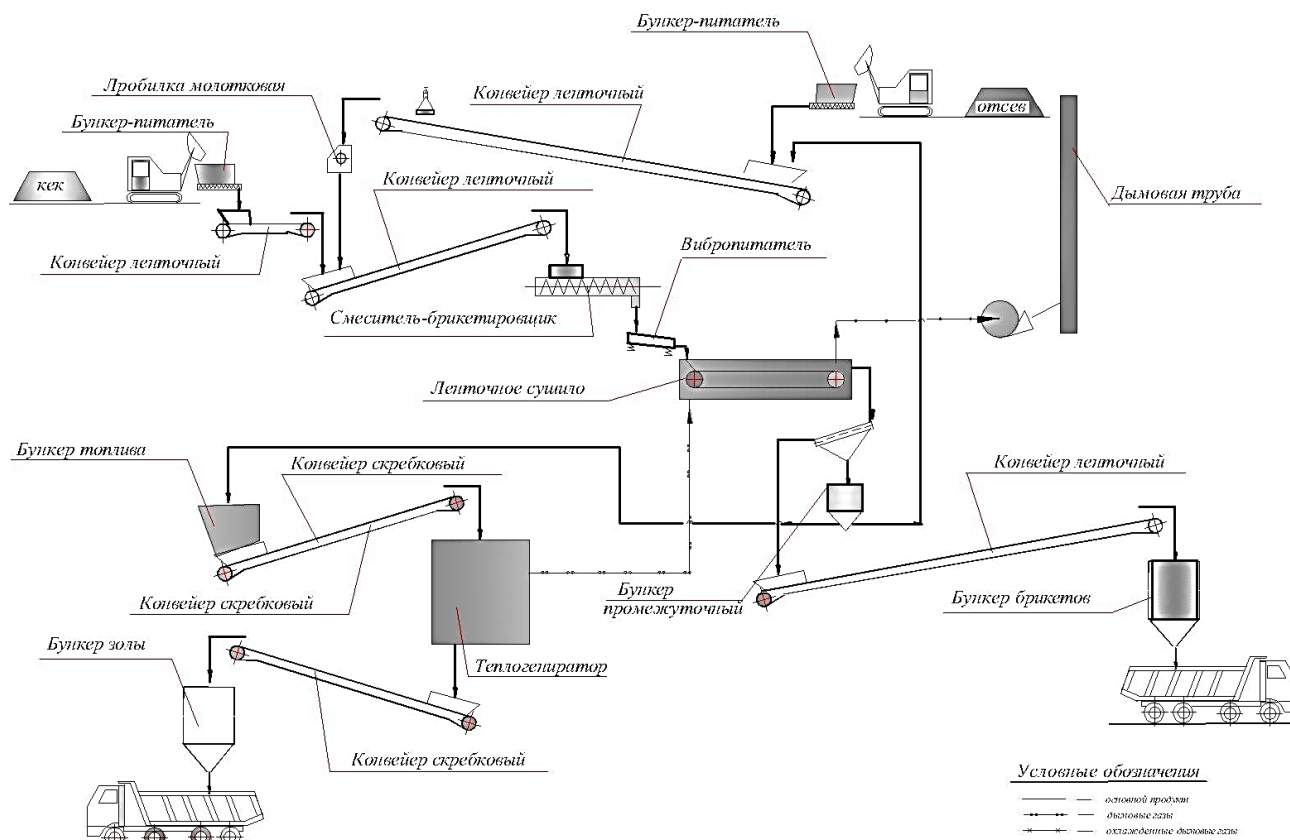


Рис. 2. Технологическая схема брикетирования угольных шламов без связующих веществ
Fig. 2. Technological scheme of briquetting coal sludge without binders

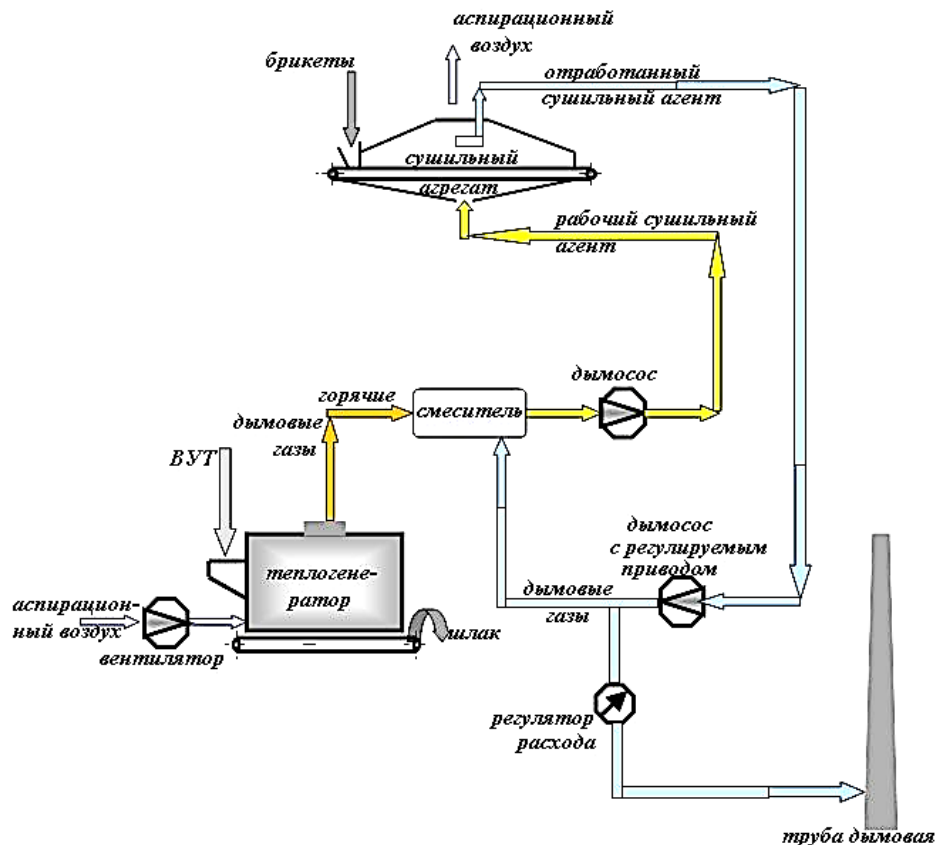


Рис. 3. Схема термической сушки брикетов
Fig. 3. Scheme of thermal drying of briquettes

Таким образом, выполненными исследованиями подтверждено, что одним из перспективных направлений переработки отходов является брикетирование шламов без применения связующих добавок.

Альтернативным решением, развиваемым в ЦИУТ, является применение для дообогащения тонких угольных шламов углемасляной грануляции. Эти исследования проводились с участием студентов кафедры Е.А. Глобиной, Н.С. Бобровникова, А.С. Кулаковского. Материалы исследований по этой теме были опубликованы в научных журналах [12]. Экспериментами подтверждена возможность обогащения тонких угольных шламов методом масляной грануляции с получением малозольного (порядка 10 %) гранулята (при исходной зольности шламов 30 % и более). Предварительные исследования показали возможность получения из масляного гранулята топливных брикетов, которые обладают необходимой механической прочностью для их дальнейшего транспортирования и использования потребителем. Процесс брикетирования позволяет снизить влажность получаемого масляного гранулята в два – три раза и отказаться от процесса обезвоживания брикетов. Показано, что добавка к углю до 8 % масляного агента изменяет коксуюемость в лучшую сторону, увеличивая механическую прочность и снижая выход коксовой мелочи [13].

Газификация кускового угля марок Б2 и Д

Для решения проблемы использования низкосортных и малокалорийных углей предложена технология переработки угля в местах его добычи с использованием процесса газификации добываемого полезного ископаемого и получением конкурентноспособных продуктов с высокой добавленной стоимостью, в том числе углеводородного газа, жидких смолистых веществ, полукочка [14; 15]. При этом образующийся твердый остаток (шлак) не выбрасывается с газами в атмосферу, а организованно выгружается в специальный накопитель [16]. Учитывая наличие значительного количества местных теплопотребителей, целесообразна организация локальных экологически чистых теплоисточников без создания дорогостоящих теплотрасс.

На основе проведенных экспериментальных исследований предложена технология слоевой газификации кускового угля, в которой в качестве газифицирующего агента используются воздух и водяной пар (паровоздушная газификация). Исследования проводились на разработанном и изготовленном экспериментальном образце газогенератора с использованием углей марок Б2 и Д. Герметичность полости газификатора достигнута

специальной конструкцией загрузочного и разгрузочного устройств. В процессе газификации был получен топливный газ с теплотой сгорания до 7,0 МДж/м³, который может эффективно сжигаться в топке водогрейного или парового котла. Исследования проводились с участием студентов кафедры В.В. Вишняка и Е.К. Щеголева. На основании проведенных исследований были разработаны и изготовлены полупромышленные образцы газификаторов непрерывного действия слоевого типа с тепловой производительностью по газу 1,5 МВт (рис. 4) [16].

Ожижение угля путем экстремальных механохимических и электрофизических воздействий на водоугольную суспензию

В рамках выполнения гранта РНФ № 23-29-00728 была разработана и создана установка для ожижения угля путем экстремальных механохимических и электрофизических воздействий на водоугольную суспензию (ВУС).

Стендовая установка состоит из двух блоков: подготовки и механохимической обработки и обработки ВУС электроимпульсными разрядами. Важным усовершенствованием установки является совмещение блоков подготовки и механохимической обработки ВУС и блока обработки ВУС электроимпульсными разрядами на единой технологической площадке.

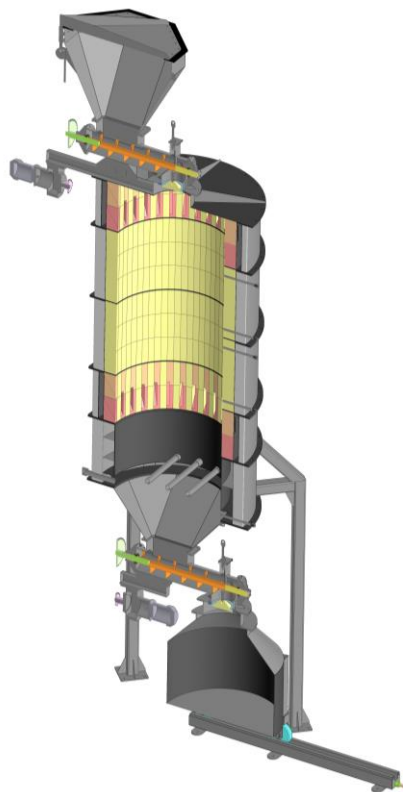


Рис. 4. Общий вид слоевого газификатора
Fig. 4. General view of the layered gasifier

Блок подготовки и механохимической обработки ВУС включает емкость с мешалкой для предварительного смешивания измельченного угля с водным раствором реагента-пластификатора (при необходимости) и реагентом-растворителем, насос-кавитатор, разделительную емкость, емкость для сбора обработанного продукта, запорную арматуру [17].

Блок обработки ВУС электроимпульсными разрядами содержит источник высоковольтных импульсов, узел обработки суспензии с разрядной камерой, насос перекачки ВУС через узел обработки с измерительным участком (расход, давление), сборную емкость. Конструкция разрядной камеры выполнена таким образом, чтобы обеспечить максимально возможный объем прокачиваемой через камеру пробы суспензии.

Исследованиями установлено, что при подготовке ВУС возможно снизить ее зольность до 2,0 – 2,5 % на сухую массу с использованием метода масляной грануляции, при этом крупность частиц составляет не более 50 мкм. Были проведены эксперименты по обработке образцов ВУС разрядами сериями по 10 и 20 мин при частоте следования импульсов 2 – 3 имп./с и расходе ВУС 0,2 м³/ч. После обработки отобраны пробы газа, которые исследованы на газовом хроматографе. Полученные результаты показали, что при обработке ВУС электроимпульсным способом выделены оксид углерода СО и водород в соотношении около 1:1, что соответствует синтез-газу [18]. Отмечено также снижение содержания органической массы угля после обработки.

Полученные результаты позволяют осуществить наиболее полный перевод органической массы ВУС в газожидкую фазу.

Перспективные технологические направления по переработке угля

Наиболее перспективными технологическими направлениями переработки угля являются:

- получение сверхчистых угольных концентратов с зольностью менее 2,0 – 2,5 %;
- газификация водоугольных суспензий с зольностью более 20 %;
- увеличение эффективности влияния пылеугольного топлива, вдуваемого в домны за счет применения полукокса, полученного из бурых углей;
- трансформация углей низкой стадии метаморфизма в угли высокой стадии метаморфизма;
- газификация жидких продуктов коксования с получением синтез-газа.

Международное сотрудничество

Центр инновационных угольных технологий осуществляет международное научно-

техническое сотрудничество с институтами и университетами Китая. В рамках международной деятельности в 2024 году было подписано два соглашения о сотрудничестве в области научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с Институтом высоких технологий Академии наук провинции Хэйлунцзян (г. Харбин) и Хэйлунцзянским научно-техническим университетом.

В рамках подписанных Соглашений с китайскими партнерами ведутся научно-исследовательские работы, направленные на улучшение структурно-реологических характеристик ВУС [19]. На созданной с участием сотрудников ЦИУТ пилотной установке в цехе приготовления ВУС углехимического комбината г. Хэган (провинция Хэйлунцзян, КНР) были проведены испытания работы экспериментального образца насоса-активатора. Насос-активатор конструкции ООО НПЦ «Сибэкотехника» был изготовлен на Кузнецком экспериментальном механическом заводе в г. Новокузнецк. Принцип работы аппарата заключается в обработке поступающей водоугольной суспензии путем воздействия сдвигового деформирования на жидкую структуру в зазоре 0,5 мм между двумя перфорированными (неподвижным и подвижным) дисками при относительной частоте вращения 1500 об./мин. Результаты испытаний показали, что эффективная вязкость ВУС (при средней массовой доле твердой фазы 65,6 %) при однократном проходе через насос-активатор снижается до 37,3 % (от 365 до 229 мПа·с, при скорости сдвига 100 с⁻¹). Кроме того, установлено, что срединный диаметр частиц угля в ВУС при проходе через насос-активатор снижается на 16,7 % (с 87,6 до 73 мкм), а стабильность суспензии повышается более чем в два раза. Положительные результаты позволили приступить к разработке промышленного образца насоса-активатора производительностью не менее 40 м³/ч [20].

Заключение

Научно-техническая деятельность ЦИУТ, сотрудников кафедры «Теплоэнергетика и экология» и ООО НПЦ «Сибэкотехника» направлена на создание современных и эффективных инновационных угольных технологий. В процессе проведения научно-исследовательских работ активное участие принимают студенты кафедры. За последние годы опубликовано более 10 научных статей, издано 2 учебных пособия и 2 монографии, сделано более 15 докладов на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях. Подготовлена и защищена 1 кандидатская диссертация по теме «Совершенствование технологии сжигания водоугольного топ-

лива в теплогенераторах малой и средней мощности», специальность 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика (Карпенко В.И).

Осуществляется активное международное научно-техническое сотрудничество с институтами и университетами Китая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перекрест Н.В., Затеякин О.А. Теоретические подходы к определению понятия устойчивого развития горнодобывающего предприятия. *Вестник СибГИУ*. 2023;1(43):116–126.
2. Zhang Yuxing, Xu Zhiqiang, Liu Dinghua, Chen Yang, Zhao Wei, Ren Guanlin. The influence of water occurrences in CWSs made of lignite and bituminous coal on slurring performances. *Powder Technology*. 2022;398:117150. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117150>
3. Kundu T., Das S.K., Biswal D.K., Angadi S.I. Mineral Beneficiation and Processing of Coal. *Clean Coal Technologies*. 2021;1–38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68502-7_1
4. Мурко В.И., Протопопов Е.В., Темлянцев 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. В кн.: *Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019. Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 28–30 ноября 2019 года, под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева*. Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2019:48–53.
5. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И., Шаньшин А.Е., Мухтаров А.Т. О возможности использования тонкодисперсных отходов углеобогащения ОФ «Энергетическая» в качестве основы для котельного топлива. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2020;13(6):667–668. EDN: MJC VGB. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0254>
6. Вишняк В.В., Щеголев Е.К. Разработка технологических решений локальных тепловых источников на основе слоевых газогенераторов непрерывного действия. В кн.: *Кузбасс: образование, наука, инновации. Материалы XI Инновационного конвента, Кемерово, 08 февраля 2023 года*. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2023:17–19.
7. Wang N., Shen R., Wen Z., De Clercq D. Life cycle energy efficiency evaluation for coal development and utilization. *Energy*. 2019;179:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.111>
8. Guo Pibin, Kong Juan, Guo Yanshan, Liu Xiuli. Identifying the influencing factors of the sustainable energy transitions in China. *Journal of Cleaner Production*. 2019 215:757–766. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.107>
9. Баранова М.П. Трансформация органической массы низкосортных углей и отходов углеобогащения. В кн.: *Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28 – 31 марта 2023 года*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023:480–482. EDN PGW FVG
10. Zhang Y., Xu Z., Tu Y., Wang Y., Li J. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry. *Powder Technology*. 2020;366:552–559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.005>
11. Xiao J., Wang S., Duan X., Ye S., Wen J., Zhang Z. Rheological models for temperature and concentration dependencies of coal water slurry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2022;42(4):1185–1203. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1696780>
12. Глобина Е.А., Бобровников Н.С., Мурко В.И., Кулаковский А.С. Совершенствование технологии обогащения угольных шламов с получением различных товарных продуктов. В кн.: *Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации". Материалы XII Инновационного конвента, Кемерово, 08 февраля 2024 года*. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2024:23–26. EDN: KIOTVN
13. Filippov S.P., Keiko A.V. Coal gasification: at the crossroad. technological factors. *Thermal Engineering*. 2021;68:209–220. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030046>
14. Oh Gunung, Ra Ho Won, Yoon Sung Min, Mun Tae Young, Seo Myung Won, Lee Joe-Goo, Yoon Song Jun. Syngas production through gasification of coal water mixture and power generation on dual-fuel diesel engine. *Journal of the Energy Institute*. 2019;92(2): 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.009>
15. Xin L., An M., Feng M., Li K., Cheng W., Liu W., Hu X., Wang Z., Han L. Study on pyrolysis characteristics of lump coal in the context of underground coal gasification. *Energy*. 2021;237:121626. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121626>
16. Вишняк В.В., Карпенко В.И., Мурко В.И. Обоснование создания локальных тепловых источников на основе угольных газогенера-

- торов непрерывного действия. В кн.: *Енисейская теплофизика: Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28 – 31 марта 2023 года / Отв. за выпуск Д.В. Платонов*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023:29–31. EDN: TBILYW
17. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Sharypov O.V. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. 2021;303:121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>
 18. Nussupbekov R., Khassenov A.K., Karabekova D.ZH., Nussupbekov U.B., Stoev M., Bolatbekova M.M. Coal pulverization by electric pulse method for water coal fuel. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2019;4(96):80–84. EDN XXGTGX. <https://doi.org/10.31489/2019Ph4/80-84>.
 19. Qian X., Wang D., Wang J., Chen S. Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China. *Resources Policy*. 2019;74:101447. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101447>
 20. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И., Вежан В.Г., Яо Л., Ли Д., Жень Л., Чжоу Г. Результаты обработки водоугольной суспензии насосом-активатором. В кн.: *Углекислотная и экология Кузбасса: XII Международный российско-казахстанский симпозиум. Сборник тезисов докладов, Кемерово, 03 – 06 июля 2023 года*. Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, 2023:64. EDN: DFPTWL
- ### REFERENCES
1. Perekrest N.V., Zatepyakin O.A. Theoretical approaches to defining the concept of sustainable development of a mining enterprise. *Bulletin of SibGIU*. 2023;1(43):116–126. (In Russ.).
 2. Zhang Yuxing, Xu Zhiqiang, Liu Dinghua, Chen Yang, Zhao Wei, Ren Guanlin. The influence of water occurrences in CWSs made of lignite and bituminous coal on slurring performances. *Powder Technology*. 2022;398:117150. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117150>
 3. Kundu T., Das S.K., Biswal D.K., Angadi S.I. Mineral Beneficiation and Processing of Coal. *Clean Coal Technologies*. 2021;1–38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68502-7_1
 4. Murko V.I., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Chaplygin V.V., Litvinov Yu.A., Volkov M.A. Development and creation of an innovative scientific and educational cluster for the integrated use of coal and its processing products. In: *Automation systems in education, science and production. AS'2019: Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation), Novokuznetsk, November 28 – 30, 2019, S.M. Kulakov, L.P. Myshlyaev eds*. Novokuznetsk: Publishing House of the SibGIU Center, 2019:48–53. (In Russ.).
 5. Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Shanshin A.E., Mukhtarov A.T. On the possibility of using fine-dispersed waste from the enrichment of Energeticheskaya as a basis for boiler fuel. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and technology*. 2020;13(6):667–668. (In Russ.). EDN: MJCvGB. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0254>
 6. Vishnyak V.V., Shchegolev E.K. Development of technological solutions for local thermal sources based on continuous-acting layered gas generators. In: *Kuzbass: education, science, innovation: Materials of the XI Innovation Convention, Kemerovo, February 08, 2023*. Kemerovo: Kemerovo State University, 2023:17–19. (In Russ.).
 7. Wang N., Shen R., Wen Z., De Clercq D. Life cycle energy efficiency evaluation for coal development and utilization. *Energy*. 2019;179:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.111>
 8. Guo Pibin, Kong Juan, Guo Yanshan, Liu Xiuli. Identifying the influencing factors of the sustainable energy transitions in China. *Journal of Cleaner Production*. 2019 215:757–766. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.107>
 9. Baranova M.P. Transformation of organic matter of low-grade coals and coal washing waste. In: *Yenisei thermal physics. Abstracts of the I All-Russian scientific conference with international participation, Krasnoyarsk, March 28 – 31, 2023*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023:480–482. (In Russ.). EDN PGWfVG
 10. Zhang Y., Xu Z., Tu Y., Wang Y., Li J. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry. *Powder Technology*. 2020;366:552–559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.005>
 11. Xiao J., Wang S., Duan X., Ye S., Wen J., Zhang Z. Rheological models for temperature and concentration dependencies of coal water slurry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2022;42(4):1185–1203. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1696780>

12. Globina E.A., Bobrovnikov N.S., Murko V.I., Kulakovskiy A.S. Improving the technology of coal sludge enrichment to produce various commercial products. In: *The Innovation Convention "Kuzbass: education, science, innovation": Materials of the XII Innovation Convention, Kemerovo, February 08, 2024*. Kemerovo: Kemerovo State University, 2024:23–26. (In Russ.). EDN: KIOTVN
13. Filippov S.P., Keiko A.V. Coal Gasification: At the Crossroad. Technological Factors. *Thermal Engineering*. 2021;68:209–220. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030046>
14. Oh Gunung, Ra Ho Won, Yoon Sung Min, Mun Tae Young, Seo Myung Won, Lee Joe-Goo, Yoon Song Jun. Syngas production through gasification of coal water mixture and power generation on dual-fuel diesel engine. *Journal of the Energy Institute*. 2019;92(2): 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.009>
15. Xin L., An M., Feng M., Li K., Cheng W., Liu W., Hu X., Wang Z., Han L. Study on pyrolysis characteristics of lump coal in the context of underground coal gasification. *Energy*. 2021;237:121626. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121626>
16. Vishnyak V.V., Karpenko V.I., Murko V.I. Justification for the creation of local thermal sources based on continuous coal-fired gas generators. In: *Yenisei thermophysics: Abstracts of the I All-Russian Scientific Conference with international participation, Krasnoyarsk, March 28 – 31, 2023 / Ed. for the issue of D.V. Platonov*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023:29–31. (In Russ.). EDN: TBILYW
17. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Sharypov O.V. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. 2021;303:121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>
18. Nussupbekov R., Khassenov A.K., Karabekova D.ZH., Nussupbekov U.B., Stoev M., Bolatbekova M.M. Coal pulverization by electric pulse method for water coal fuel. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2019;4(96):80–84. EDN XXGTGX. <https://doi.org/10.31489/2019Ph4/80-84>
19. Qian X., Wang D., Wang J., Chen S. Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China. *Resources Policy*. 2019;74:101447. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101447>
20. Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenko V.I., Important V.G., Yao L., Li D., Zheni L., Zhou G. Results of treatment of coal-water suspension with a pump activator. In: *Coal Chemistry and Ecology of Kuzbass: XII International Russian-Kazakh Symposium. Collection of abstracts, Kemerovo, 03 – 06 July 2023*. Kemerovo: Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023:64. (In Russ.). EDN: DFPTWL

Сведения об авторах

Василий Иванович Мурко, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, директор Центра инновационных угольных технологий, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sib_eco@mail.ru
SPIN-код: 1092-6052

Юрий Евгеньевич Прошунин, д.т.н., профессор кафедры открытых горных работ и электромеханики, директор Института горного дела и геосистем, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: proshunin_ue@mail.ru
SPIN-код: 3991-6628

Михаил Викторович Темлянецев, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: uchebn_otdel@sibsui.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666
SPIN-код: 6169-5458

Елена Николаевна Темлянцева, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru
SPIN-код: 9096-4256

Кирилл Вадимович Беляев, магистрант кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: belkir1976@mail.ru

Information about the authors:

Vasily I. Murko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Director of the Center of Innovative Coal Technologies, Siberian State Industrial University
E-mail: sib_eco@mail.ru
SPIN-код: 1092-6052

Yuri E. Proshunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Opencast Mining and Electromechanics, Director of the Institute of Mining and Geosystems, Siberian State Industrial University
E-mail: proshunin_ue@mail.ru
SPIN-код: 3991-6628

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Elena N. Temlyantseva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

SPIN-код: 9096-4256

Kirill V. Belyaev, Graduate student of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: belkir1976@mail.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 02.09.2024

После доработки 06.09.2024

Принята к публикации 09.09.2024

Received 02.09.2024

Revised 06.09.2024

Accepted 09.09.2024