
СВОБОДНАЯ ТРИБУНА

УДК 662.7

DOI: 10.15372/KhUR2022416

EDN: BQRTPI

Некоторые проблемы перехода на низкоуглеродное топливо

А. А. КАЛЫБАЙ¹, З. А. МАНСУРОВ^{2,3}, В. Г. САЛЬНИКОВ³¹Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт,
Алматы (Казахстан)²Институт проблем горения,
Алматы (Казахстан)

E-mail: zmansurov@kaznu.edu.kz

³Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
Алматы (Казахстан)

Аннотация

Проведен анализ актуальных проблем декарбонизации энергетического сектора и перспективных путей решения экологических проблем, связанных с выделением CO₂ при горении угля – одного из основных видов топлива для энергетических установок в мире и в особенности в России и Казахстане. Описаны технология и состав оборудования технологической линии низкотемпературной (не выше 75 °С) гидроконверсии энергетического угля в высококалорийное (теплота сгорания 45 МДж/кг), экологически чистое (очищенное от золы) жидкое гидрогенизированное угольное топливо (ГУТ) с низким содержанием углерода (менее 45 мас. %). Рассмотрены способы переработки угольного топлива в виде водоугольной суспензии. Обсуждены пути сохранения угольной отрасли, основанные на получении из энергетического угля гидрогенизированного угольного топлива с низкой себестоимостью, что обеспечит технически эффективный экологический чистый переход на низкоуглеродную энергетику с нулевым выбросом парниковых газов.

Ключевые слова: декарбонизация, уголь, гидрогенизированное угольное топливо

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в настоящее время более 80 % получаемой электрической и тепловой энергии связано с использованием угля на ТЭЦ [1], являющихся основным источником эмиссии CO₂ в атмосферу. Углекислый газ – важный фактор антропогенного влияния на атмосферу и усиления парникового эффекта. Поэтому перед мировым сообществом стоит исключительно важная цель по снижению углеродного следа энергетики.

В 2015 г. представители 196 стран подписали Парижское соглашение по климату, вступив-

шее в силу 4 ноября 2016 г. Цель соглашения – разработка и реализация стратегии снижения эмиссии парниковых газов (ПГ), в основном CO₂, путем уменьшения доли углеводородных источников в мировом энергобалансе за счет перехода на возобновляемые источники энергии и не содержащие углерод энергоносители, в первую очередь водород.

Как показано в [2], мировое производство энергии в 2019 г. составило 160 000 ТВт·ч, однако мировое производство энергии всеми видами возобновляемых источников в этом же году составило только 2 800 ТВт·ч, т. е. почти в 60 раз

меньше современного уровня. Следовательно, для достижения необходимых объемов производства возобновляемой энергии требуется дальнейшее расширение площади поверхности планеты, используемой для установок солнечных панелей, ветрогенераторов и других преобразователей, и выведение ее из экономического пользования и природных экосистем. Последствия таких действий трудно предсказуемы и несут в себе значительные риски нарушения термодинамического равновесия климатической системы.

Таким образом, в настоящее время остается актуальной задача поиска способов снижения углеродного следа при применении энергетических углей, значительные запасы которых находятся в Республике Казахстан (РК) и Российской Федерации.

Разработанная в 2008 г. и реализованная «Концепция развития угольной промышленности Республики Казахстан на период до 2020 года» была одобрена Постановлением Правительства РК от 28 июня 2008 г. № 644 [3]. Базовый объем потребления энергетических углей для нужд энергетики Казахстана на 2008 г. составлял 82.83 млн т/г. Согласно концепции, указанный объем должен был увеличиться к 2020 г. до 121.3 млн т/г или на 46.4 % от базового уровня [4]. Превалирование угля в энергетике Казахстана привело к общему выбросу ПГ в CO_2 -эквиваленте до 20.3 т/г на одного жителя страны, что более чем вдвое превышает аналогичный показатель Евросоюза (8.9 т/г).

В целом Казахстан по эмиссии ПГ занимает 22-е место в мире и обозначен коричневой зоной в Глобальном углеродном атласе [4, 5]. В 2019 г. Казахстан занял пятое место в мире по энергоемкости ВВП и второе по углеродоемкости национальной экономики (официальный сайт <https://energystats.enerdata.net/>).

Реальное положение дел в энергетической отрасли страны и ее официальная политика противоречат друг к другу. Так, в декабре 2012 г. Казахстан принял «Стратегию развития Казахстана до 2050 года» [6], дополненную в 2013 г. «Концепцией Республики Казахстан по переходу к «зеленой экономике»» [7]. Последний документ подчеркивает, что низкоуглеродное развитие экономики в первую очередь должно обеспечивать энергоэффективность и снижение энергоемкости ВВП на 30 % до 2030 г. и на 50 % до 2050 г. по сравнению с базовым уровнем 2008 г., рост доли альтернативных источников энергии в производстве электроэнергии до 50 % к 2050 г. по сравнению с уровнем 2012 г.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УГЛЯ

Казахстан занимает девятое место в мире по подтвержденным балансовым запасам угольных пород (33.6 млрд т), из которых 12.3 млрд т составляет бурый уголь. Забалансовые запасы угля Казахстана оцениваются в 28.6 млрд т, из них бурый уголь – 25.3 млрд т. Иначе говоря, общие запасы угля по бассейнам и месторождениям Казахстана превышают 62 млрд т. Следовательно, Казахстан не может отказаться от такого объема доступных и дешевых энергоносителей, а нуждается в экологически чистых, энергоэффективных технологиях, превращающих энергетический уголь в жидкие, высококалорийные топлива с низким углеродным содержанием.

Основные угольные бассейны – это Карагандинский, Экибастузский и Майкубенский, крупные месторождения – Кушокинское, Борлинское, Шубаркольское, Каражыринское, средние (например, Сарыадырское) и мелкие месторождения рассеяны по всей стране, за исключением Кызылординской области.

Более 60 % углей Казахстана относится к высокозольным и по метаморфизму характеризуются от газовой-жирных (ГЖ) до отощенно-спекающихся (ОС). Средневзвешенная зольность энергетических углей колеблется в пределах от 28 до 42 % и составляет в среднем около 38 % на массу (Экибастузский бассейн). Химический состав золы угля включает, %: SiO_2 60–66, Al_2O_3 24–33, Fe_2O_3 1.56–5.6, TiO_2 0.89–1.5, CaO 0.15, MgO 0.05, SO_3 0.21, P_2O_5 0.01, Na_2O 0.54, K_2O 0.14. Химический состав угля включает, %: С 80.24, Н 5.66, S 0.53, Cl 0.05, N 0.77, легко летучие вещества – 38; влажность – 2.78 %. Легко летучие вещества включают метан (80–90 %), этан (8–12 %), пропан-бутан (1.8–4 %) и другие газы (0.2–1 %).

Исходя из этого, уголь можно называть углеводородным соединением с низким содержанием водорода. Обычно такой уголь характеризуют средней углеводородной молекулой [7] $\text{C}_{96}\text{H}_{72}$, приблизительно содержащей 5.66 мас. % водорода. Структура этой молекулы схематически описывает большое количество конденсированных и неконденсированных бензольных колец, связанных между собой метильными, азотистыми, сернистыми и другими гетероатомными мостиками (рис. 1).

Такая структура угля формируется благодаря углерод-углеродным (C–C), углерод-водородным (C–H), углерод-сернистым (C–S), углерод-

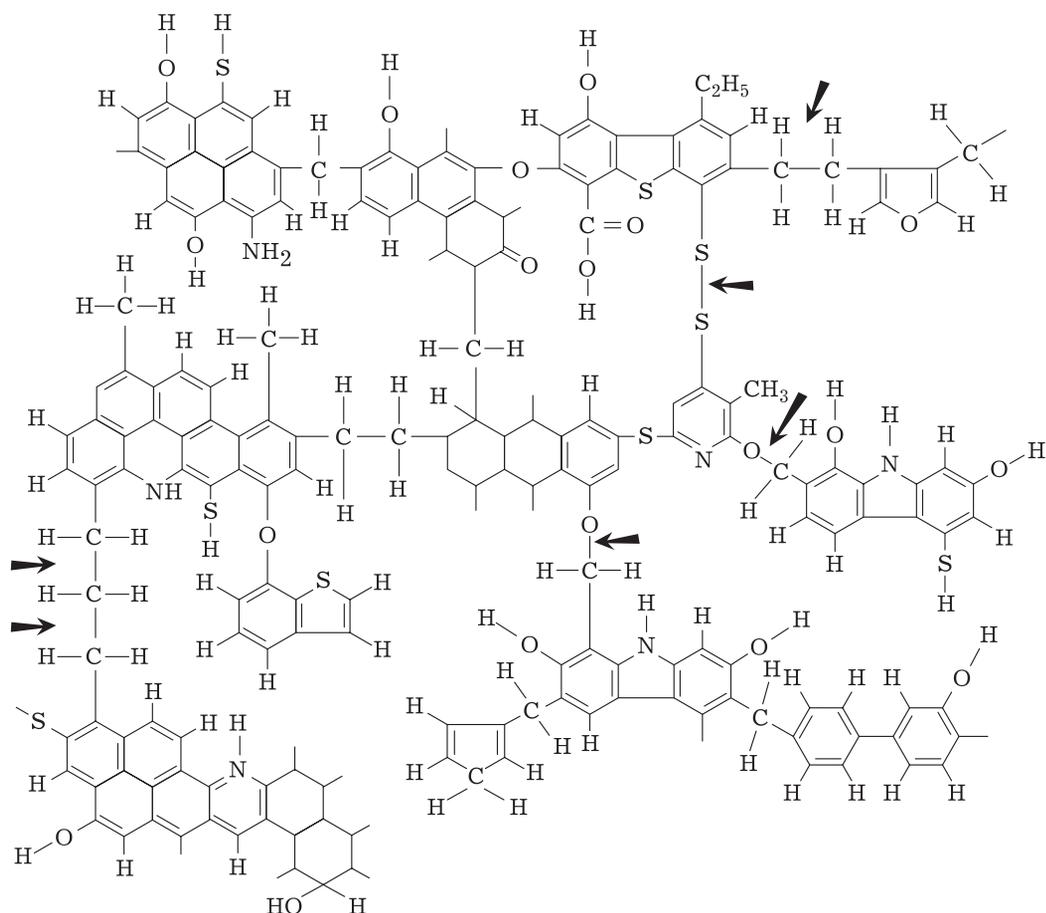


Рис. 1. Структура угля [7].

азотистым (C-N), углерод-кислородным (C-O) и другим углерод-гетероатомным связям.

ПУТИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ

Очевидно, что в настоящее время и в обозримом будущем полностью отказаться от использования углеродсодержащих источников энергии не позволяют технологические и экономические аспекты развития цивилизации. Скорее надо вести речь об углеродной нейтральности. Но в отличие от большинства определений, которые подразумевают под углеродной нейтральностью полный отказ от выбросов углерода, мы считаем, что углекислый газ (CO_2) является важной составной частью атмосферного воздуха, благодаря которому в природе происходит процесс фотосинтеза и формируется биосфера. Поэтому необходимо говорить не о полном отказе от эмиссии углекислого газа, а о достижении баланса между выбросами CO_2 и его поглощением. Именно это целесообразно считать углеродной нейтральностью. В этом контексте, на наш взгляд, перспективны два направления [8]:

1) Разработка перспективных технологий сжигания традиционных источников энергии (уголь, нефть, газ), направленных на максимально возможное снижение выбросов ПГ. Данные технологии получения энергии могут быть использованы для социально-экономического развития стран во время переходного периода на пути к усовершенствованным технологиям на основе альтернативных источников энергии.

2) Инвентаризация и развитие естественных и искусственных резервуаров CO_2 для достижения баланса между его поступлением и поглощением.

Другими словами, в качестве компромисса можно рассматривать обязательства стран сократить выбросы CO_2 до уровня, соответствующего углеродной емкости территории. Тогда вполне достижимой будет цель Климатического пакта по удержанию глобального потепления на уровне 1.5°C . В контексте вышеуказанного, в соответствии с общемировой тенденцией снижения эмиссии углеродсодержащих вредных выбросов актуальной проблемой является переход на альтернативные технологии.

Современные ограничения на топливные ресурсы и ограничения на загрязнение окружающей среды направили исследовательские программы по всему миру на внедрение новых методов и методик, которые не только обеспечивают рационализацию потребления топлива, но и поддерживают низкий уровень выбросов от различных устройств, в которых происходит их сгорание.

В Казахстане, имеющем огромные запасы угля, выработка электроэнергии на ТЭЦ, работающих на угле, составляет 84 % всей энергетики. В связи с этим проведен анализ разработок по использованию водоугольного топлива (ВУТ). Мировые запасы угля в несколько раз превышают запасы других видов топлива. По оценкам запасов угля достаточно на 200–250 лет. Это солидный срок, учитывая, что запасы нефти и газа должны истощиться гораздо раньше. Большая часть угля используется на электростанциях, вырабатывающих почти 40 % мировой электроэнергии, основными потребителями которой являются электроэнергетика и металлургия.

Мировой лидер в производстве угля – Китай, где в 2014 г. было добыто более 3.7 млрд т. На втором месте в мире по объему добычи угля находятся США, где в 2014 г. произведено 916.2 млн т угля, на третьем – Индия (668.4 млн т), на четвертом – Австралия (491.2 млн т), на пятом – Индонезия (470.8 млн т). В России, занимающей шестое место по добыче угля в мире, обладающей 5.5 % мировых запасов угля (около 200 млрд т), в 2014 г. произведено 4.4 % общемирового объема добываемого угля. В 2015 г. в России добыто 373.3 млн т [9–11].

Проведенные оценки применяемых в российской энергетике видов энергетических топлив показали, что масса загрязняющих веществ, образующихся при сжигании 1 тонны условного топлива (т. у. т.) газа, составляет около 5 кг/т. у. т., а при сжигании 1 т. у. т. жидких топлив и угля – в 60 раз больше, около 3000 кг/т. у. т. Таким образом, приведенные данные показывают, что значительное негативное воздействие на окружающую среду оказывают угольные и мазутные ТЭЦ, которые в основном используются для выработки электроэнергии.

ВАКУУМНО-ВОЛНОВАЯ ГИДРОКОНВЕРСИЯ УГЛЯ В ЖИДКОЕ НИЗКОУГЛЕРОДНОЕ ТОПЛИВО

Предлагается низкотемпературная (не выше 75 °С) вакуумно-волновая гидроконверсия энер-

гетического угля в жидкое низкоуглеродное энергетическое топливо под воздействием высокоинтенсивного магнито-электрического поля с использованием так называемого электрогидравлического эффекта (ЭГЭ) Л. А. Юткина [12]. При этом известная принципиальная электрическая схема получения ЭГЭ и новые схемы, нашедшие широкие промышленные применения, нами существенно изменены и дополнены новыми эффектами, сопутствующими ЭГЭ [13].

Технологическая линия низкотемпературной (не выше 75 °С) вакуумно-волновой гидроконверсии органической массы угля в гидрогенизированное угольное топливо (ГУТ) имеет принципиальную схему, состоящую из трех основных и двух вспомогательных групп оборудования и оснащения [1]. Первая группа состоит из комбинированных механических мельниц и электрогидравлических ударных измельчителей, снабженных собственными источниками электропитания двух типов: источник высокого напряжения (ИВН) и источник больших токов (ИБТ). Оба типа источников имеют малые мощности (не более 4 кВт) и питаются сравнительно небольшой электроэнергией (до 1 кВт·ч). Эта группа при ее производительности 50 м³/ч потребляет электрическую энергию 120 кВт·ч или 2.4 кВт·ч энергии на 1 м³ перерабатываемой угольной породы. В группу входят: установка грубого помола, перемалывающая глыбы размером до 300 мм (гранулометрический размер товарного угля) до частиц с максимальным размером до 3 мм; установка среднего помола, перемалывающая частицы размера до 3 мм в частицы с максимальным размером до 0.3 мм (300 мкм); установка (без механической части помола) тонкого помола, перемалывающая частицы до максимального размера 0.2 мкм (200 нм).

В первой установке (рис. 2) время загрузки, обработки и выгрузки занимают 5–6 мин, т. е. в течение 1 ч – от 10 до 12 раз. Следовательно, общий объем перерабатываемой водоугольной смеси с добавками составляет 50–60 м³/ч. В каждом цикле время обработки составляет 3–4 мин. Электродвигатель установки потребляет электрическую энергию 45 кВт·ч, имеет 900–1450 об/мин; загрузочный ленточный конвейер – 10 кВт·ч и 300 об/мин; подпитывающий реагентный насос – 5 кВт·ч и 900 об/мин; блоки ИВН и ИБТ совокупно до 2 кВт·ч. Следовательно, первая установка потребляет 62 кВт·ч электрической энергии, перерабатывая от 40 до 48 м³ угля в течение 1 ч.

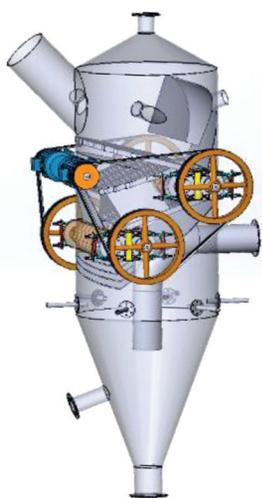


Рис. 2. Мельничный реактор [1].

Процесс проходит в специальном вихревом смесителе, входящем в состав третьей группы оборудования. Группа именуется как комплекс облагораживания углеводородов (КОУ) и имеет производительность 50 м³/ч. Общее энергопотребление КОУ не превышает 150 кВт·ч.

Комплекс облагораживания углеводородов производит экологически чистое (содержание углерода менее 45 %), высококалорийное (43–45 МДж/кг) жидкое гидрогенизированное угольное топливо (ГУТ). Его фракционный состав близок к стандартному топливу, темному бытовому (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что ГУТ по всем параметрам соответствует печному топливу (солярка) [14]. Единственное несоответствие – это низ-

кая температура вспышки ГУТ в закрытом тигле. Однако этот показатель не является браковочным. Тем более нами разработаны специальные горелочные устройства для ГУТ.

ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ВИДЕ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ

Водоугольное топливо (ВУТ), водоуголь — жидкое топливо, которое получают путем смешивания измельченного угля, воды и пластификатора. Используется на теплогенерирующих объектах в основном как альтернатива природному газу и мазуту, что позволяет существенно сократить затраты при производстве тепловой и электрической энергии. Для приготовления ВУТ применяют низкокалорийные и тощие угли и отходы углеобогащения, а также создают на их основе композиционные водоторфоугольные, водонефтеугольные и другие топливные составы. Исследования показали, что присутствие в смеси наночастиц угля положительно влияет на сгорание угольно-водной смеси.

Капельно-факельное сжигание является на сегодняшний день основным способом сжигания ВУТ, особенно в котлах малой и средней мощности [15]. На рис. 3 представлена упрощенная схема устройства котельной по сжиганию ВУТ. Водоугольное топливо доставляется на котельную в готовом виде [7].

К недостаткам технологии сжигания ВУТ можно отнести достаточно высокие требования к горелочному устройству (форсунке). На первых этапах применения ВУТ имел место высо-

ТАБЛИЦА 1

Характеристики гидрогенизированного угольного топлива [1]

Показатель, единицы измерения	НД* на методы испытаний	Нормируемое значение	Фактическое значение
Температура застывания, °С, не выше в период с 1 апреля до 1 сентября	ГОСТ 20287-91	-5.0	-8.0
Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С, не ниже	ГОСТ 6356-75	40	32
Плотность при 20 °С, кг/м ³	ГОСТ 3900-85	Не нормируется	871
Массовая доля серы, %, не более	ГОСТ 19121-73	0.2	0.14
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с, не более	ГОСТ 33-2000	8.0	4.8
Содержание механических примесей, %	ГОСТ 6370-83	Отсутствие	0.026
Содержание воды, %	ГОСТ 2477-65	Следы	Следы
Фракционный состав:			
10 % перегоняется при температуре, °С, не ниже	ГОСТ 2177-99	150	158
90 % перегоняется при температуре, °С, не выше	ГОСТ 2177-99	360	343

* Нормативный документ.

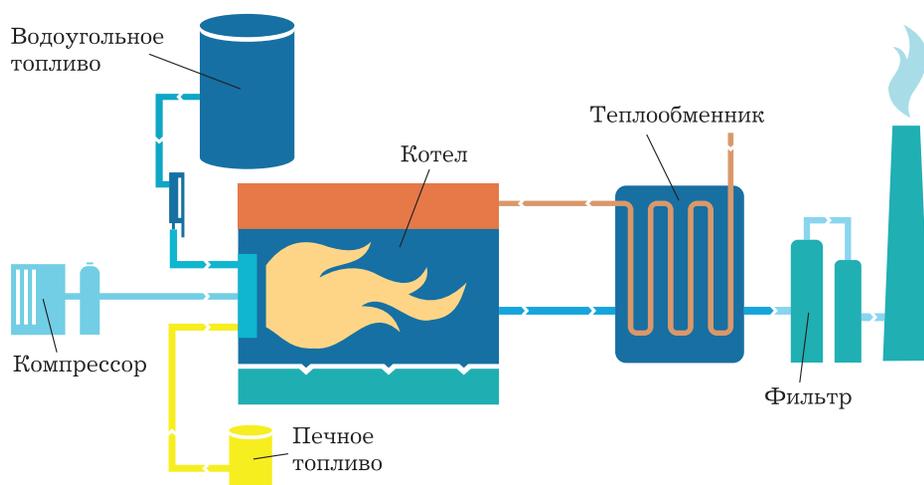


Рис. 3. Типовая схема устройства котельной по сжиганию водоугольного топлива.

кий абразивный износ форсунок [9]. Например, на Новосибирской ТЭЦ-5 первые форсунки служили не более 40 ч. Определенные ограничения применимости ВУТ связаны с его склонностью к расслаиванию в течение 1–2 сут, что требует использования специальных присадок-пластификаторов. Так как процесс горения ВУТ весьма нестабилен, то существует необходимость разрабатывать особую геометрию котлов и особое расположение точек подачи топлива и воздуха для обеспечения циркуляции горячих горючих газов в зоне воспламенения. Одним из основных инструментов для оптимизации конструкции котлов являются численные методы, позволяющие исследовать аэродинамику, процессы тепломассообмена и горения ВУТ в топочной камере.

Введение воды в топливо имеет два основных эффекта: 1) физическое воздействие в качестве регулятора распыления топлива, усиливающего режим предварительного смешивания топлива; 2) химическое воздействие в результате термической диссоциации воды при высокой температуре на активные радикалы – гидроксил (ОН) и атом водорода (Н), которые ускоряют окисление продуктов неполного сгорания, таких как твердые частицы, углеводороды ($C_n H_m$) и СО [16]. Более того, взаимодействие сажи и углеводородов с водяным паром приводит к образованию молекулярного водорода (H_2) [16]. В этом случае наблюдается глобальный положительный экологический эффект; снижение местной температуры (за счет потерь энергии на испарение воды) приводит к значительному снижению NO_x , а существование активных радикалов приводит к окислению СО и сажи. Таким образом, использование воды в топливе

оказывает благоприятное воздействие на соотношение сажа/ NO_x .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача сохранения энергетического (высококалорийного) угля, имеющего огромный природный запас, в качестве доступного и дешевого энергоносителя для экономики и населения и ее решение путем перехода от него к экологически чистому, высококалорийному, низкоуглеродному топливу (ГУТ) является основой для формирования государственной программы развития энергетики Казахстана “зеленым” способом.

Следует отметить, что в России существует аналог разработанному авторами топливу, который называется “Топливо, гидрогенизированное энергетическое” марки ТГЭ-40, где цифра 40 означает объемное количество ионизированной воды, добавленной в топливо (40 %) при содержании углеводородов 60 %. Поэтому было принято новое, более емкое наименование для низкоуглеродного топлива – “Гидрогенизированное угольное топливо” (ГУТ), которое подчеркивает его угольное происхождение.

Нами выбраны в Казахстане районные котельные РК-1 и РК-2 (Кокшетау) и ТЭЦ-1 (Степногорск), в которых планируется проведение модернизации под ГУТ.

Показано, что в период возможного топливного кризиса угольно-водные смеси могут играть заметную роль в качестве доступного, экологически чистого эффективного топлива, способствуя решению указанных проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Калыбай А. О программе перехода на низкоуглеродное топливо в энергетике Республики Казахстан // Горение и плазмохимия. 2021. Т. 19, № 4. С. 223–235.
- 2 Арутюнов В. С. Проблемы и вызовы водородной энергетики // Горение и плазмохимия. 2021. Т. 19, № 4. С. 245–255.
- 3 О Концепции развития угольной промышленности Республики Казахстан на период до 2020 года [Электронный ресурс]. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P080000644_ (дата обращения: 05.07.2022).
- 4 Стратегия низкоуглеродного развития Казахстана: Цели и пути трансформации [Электронный ресурс]. URL: <https://igtipc.org/images/docs/2020/550258684.pdf> (дата обращения: 05.07.2022).
- 5 Стратегия “Казахстан – 2050” [Электронный ресурс]. URL: <https://primeminister.kz/ru/gosprogrammy/strategiya-kazahstan-2050> (дата обращения: 05.07.2022).
- 6 Концепция по переходу Республики Казахстан к “зеленой экономике” (Утв. Указом Президента РК от 30 мая 2013 г. № 577). [Электронный ресурс]. URL: https://www.greenkaz.org/images/for_news/pdf/npa/konceptiya-po-perehodu.pdf (дата обращения: 05.07.2022).
- 7 Уайтхерей Д. Д., Митчел Т. О., Фаркаши М. Ожигания угля. М.: Химия, 1986. 256 с.
- 8 Мансуров З., Сальников В. Некоторые проблемы экологического сжигания водоугольных смесей // Горение и плазмохимия. 2021. Т. 19, № 4. С. 279–288.
- 9 Кузнецов В. А. Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена для перспективных технологий энергетического использования угольного топлива: Дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2018. 125 с.
- 10 Плакиткин Ю. А., Плакиткина Л. С., Дьяченко К. И. Угольная промышленность России на мировом рынке угля: Тенденции перспективного развития // Уголь. 2016. № 7. С. 12–16.
- 11 Исмагилов З., Михайлова Е. Актуальные проблемы угольной экономики и экологической переработки углей // Горение и плазмохимия. 2021. Т. 19, № 4. С. 257–264.
- 12 Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1986. 250 с.
- 13 Предварит. пат. РК 11314, 2002.
- 14 Справочник нефтепереработчика / Под ред. Ластовкина Г. А., Радченко Е. Д., Рудина М. Г. Л.: Химия, 1986. 648 с.
- 15 Алексеенко С. В., Мальцев Л. И., Кравченко И. В., Дектеров А. А., Кузнецов В. А. Обзор по приготовлению водоугольного топлива и его сжиганию в котлах // Горение и плазмохимия. 2021. Т. 19, № 4. С. 265–277.
- 16 Matthews K. J., Jones A. R. The effect of coal composition of coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // 8th Int. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization (Proceedings). USA, Orlando. Part 1, 1986. P. 388–407.