

О ПРОГРАММЕ ПЕРЕХОДА НА НИЗКОУГЛЕРОДНОЕ ТОПЛИВО В ЭНЕРГЕТИКЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

А.А. Калыбай

АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт»,
ул. Нурпейсова, 2А, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В работе изложены технология и состав оборудования технологической линии низкотемпературной (не выше 75 °С) гидроконверсии энергетического угля на высококалорийное (теплота сгорания 45МДж/кг, экологически чистое (очищенное от золы) жидкое гидрогенизированное угольное топливо (ГУТ) с низким содержанием углерода (менее масс. 45%), способы сжигания ГУТ (топливная аппаратура и инновационная горелка), средства улавливания и утилизации парниковых газов (плазмохимический реактор) и производства наноматериалов (углерод, кремний, алюминий, титан и др.) Цель статьи – указать пути сохранения угольной отрасли, вырабатывая из энергетического угля ГУТ с низкой себестоимостью, наноматериалов высокой добавленной стоимости и осуществляя технически эффективный экологический чистый переход на низкоуглеродную энергетику с нулевым выбросом парниковых газов (ПГ).

Ключевые слова: уголь энергетический, содержание углерода, теплота и полнота сгорания, зольность, летучие вещества, гидрогенизированное угольное топливо, парниковый газ, наноматериалы.

1. Введение

Программа «Модель мировой экономики на период до 2030 года» (ММЭ-2030) [1], разработанная Международным энергетическим агентством (МЭА) по заказам правительств 26 стран с ведущей экономикой, показывает, что энергетическую и экологическую безопасность мировой экономики на 83% обеспечивают нефть, природный газ и уголь (42%). Например, Китай, являющийся второй по объему экономикой мира, на угле вырабатывает 84% необходимой для его экономики энергии. По выбросам ПГ Китай более чем в 2 раза превышает уровень выбросов ПГ США. Казахстан с долей 0,2% в мировой экономике удовлетворяет потребность энергетической отрасли исключительно на ископаемых энергоносителях (88,72%), из которых 77,7% приходится на энергетический уголь [2].

В связи с этим была разработана «Концепция развития угольной промышленности Республики Казахстан на период до 2020 года», одобренная 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 тонн в год. По прогнозу Концепции указанный объем должен подрасти к 2020 г. до 121,3 млн тонн в год или на 46,4% от базового уровня [3]. Превалирование угля в энергетике Казахстана привело к общему выбросу ПГ в CO₂ – эквиваленте до 20,3 тонн в год на одного жителя страны, что более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель Евросоюза (8,9 тонн/год). В целом, Казахстан по эмиссии ПГ занимает 22-ое место в мире и обозначен коричневой зоной в Глобальном углеродном атласе [2, 3]. В 2019 г. Казахстан занял пятое место в мире по энергоемкости ВВП и второе по углеродоемкости национальной экономики (официальный сайт Всемирного банка <https://yearbook.enerdata.ru>).

Реальное положение дел в энергетической отрасли страны и ее официальная политика противоречат друг к другу. Так, в декабре 2012 г. Казахстан приняла «Стратегию развития Казахстана до 2050 года» [4], дополненную в 2013 г. «Концепцией Республики Казахстан по переходу к «зеленой экономике» [5]. Послед-

ний 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.

В целях гармонизации указанных обязательств и фактическое положение дел в энергетике, Казахстан отменил документ [3] в 2010 г. и принял Экологический кодекс Республики Казахстан [6] в марте 2021 г. В кодексе заложены всеобщие принципы, такие как «Загрязнитель платит и исправляет», «Внедрение наилучших доступных технологий», «Плата за эмиссии» и другие. Наряду с Кодексом разрабатывается «Стратегия низкоуглеродного развития Республики Казахстан: цели и пути трансформации». На проект этой стратегии, вынесенный на рассмотрение научного сообщества и общественности в 2020 г., сделана ссылка за номером [2]. В Стратегии указывается что более 40% объема выбросов ПГ приходится на энергетику. Основная причина этого явления заключается в чрезмерно большом объеме использования энергетического угля в энергетике, изношенности основных энергогенерирующих мощностей и их инфраструктуры, высокой зависимости населения от угля, названной [2] «энергетической бедностью», отсутствие масштабных инвестиций в энергетическую отрасль и ее инфраструктуру. Кроме того, не сформированы рыночные механизмы ценообразования на энергию, а наоборот наблюдается широкомасштабное присутствие государства в определении предельных тарифов под видом контроля субъектов естественных монополий [2]. На этом фоне кажется проблематичным выполнение NDC (*Nationally Determined Contribution*), являющегося основным показателем национального уровня вклада в глобальное снижение выбросов ПГ. NDC было внесено Правительством Казахстана в ООН в сентябре 2015 г., а в декабре того же года Казахстан подписал Рамочную конвенцию ООН об изменении климата [7]. Рамочная конвенция, именуемая Парижским соглашением по климату, ратифицирована Парламентом РК. Этим самым Казахстан разделяет цели данной Конвенции, предусматривающие, во-первых, удержание температуры атмосферы Земли на уровне не выше 2 °С по сравнению с доиндустриальным периодом,

во-вторых, ограничение роста температуры не выше 1,5 °С от доиндустриального уровня.

Казахстан также является стороной глобального и универсального по характеру документа ООН «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», принятого в сентябре 2015 г. и отвечающего на 17 главных вызовов, стоящих перед человечеством. В частности номер 7, из Целей устойчивого развития (ЦУР) обязывает Казахстан обеспечить «всеобщий доступ к недорогому, надежному и современному энергоснабжению населения страны, удвоение глобального показателя повышения энергоэффективности и создание безтопливной энергетики» [8].

Статья ставит целью развитие в Казахстане низкоуглеродной энергетики с нулевым выбросом парниковых газов (ПГ) на новом энергоносителе ГУТ. Оно имеет низкую себестоимость производства и доступную цену реализации. ГУТ сопоставимо по теплоте и полноте сгорания природным газом, но значительно дешевле его и безопаснее при транспортировке и хранении. ГУТ позволяет сохранить угольную отрасль и развивать на ее основе наноиндустрию.

2. Физико-химический состав энергетического угля

Казахстан занимает 9-ое место в мире по подтвержденным балансовым запасам угольных пород (33,600 млрд тонн), из которых 12,300 млрд тонн составляет бурый уголь. Забалансовые запасы угля Казахстана оцениваются в 28,600 млрд тонн, из них бурый уголь – 25,400 млрд тонн. Иначе говоря, общие запасы угля по бассейнам и месторождениям Казахстана переваливают за 62 млрд тонн. 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 бассейны – это Карагандинский, Экибастузский и Майкубинские, крупные месторождения – Кушюкское, Борлинское, Шубаркольское, Каражыринское, средние как 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: SiO₂ – 60–66%; Al₂O₃ – 24–33%; Fe₂O₃ – 1,56–5,6%; TiO₂ – 0,89–1,5%; CaO – 0,15%; MgO – 0,05%; SO₃ – 0,21%; P₂O₅ – 0,01%; Na₂O – 0,54%; K₂O – 0,14%. Химический состав угля включает: углерод – 80,24; водород – 5,66; сера – 0,53; хлор – 0,05; азот – 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 (УВС) с низким содержанием водорода. Обычно такой уголь характеризуют средней углеводородной молекулой [9] C₉₆H₇₂, приблизительно содержащей 5,66% масс водорода. Структура этой молекулы схематически описывает большое количество конденсированных и неконденсированных бензольных колец, связанных между собой метильным, азотистым, сернистым и другими гетероатомными мостиками (рис. 1).

Такая структура формируется благодаря углерод-углеродным (С-С), углерод-водородным (С-Н), углерод-сернистым (С-S), углерод-азотистым (С-N), углерод-кислородным (С-O) и другим углерод-гетероатомным связям.

Теплота сгорания измеряется (таблица 1) в МДж/кг. Фактическая теплота сгорания угля выражается в среднем 28 МДж/кг в зависимости от объема сохранившихся газовых включений. Именно, высвобожденные газы (метан), ответственные за взрывы в шахтах, самовозгорание измельченных угольных фракций при хранении и другие неприятные процессы, обеспечивают горючесть топлива. Поэтому желательно их сохранить в составе топлива. Для этого нужно знать где они хранятся в угольных породах.

В целом угольные породы представляют собой мультимер, образовавшийся под действием высокого пластового давления и имеющий пористо-трещиноватую слоистую структуру с

Таблица 1. Теплотехнические и механические характеристики энергетического угля

Высшая теплота сгорания на сухую массу	31,557
Высшая теплота сгорания на рабочее состояние	30,610
Низшая теплота сгорания на рабочее состояние	20,444
Температура плавления, °С	1400
Коэффициент размолосопособности, ед.	1,5
Пластометрическая усадка, мм	44
Индекс свободного вспучивания S1	1/2
Индекс Poga R1, ед.	0

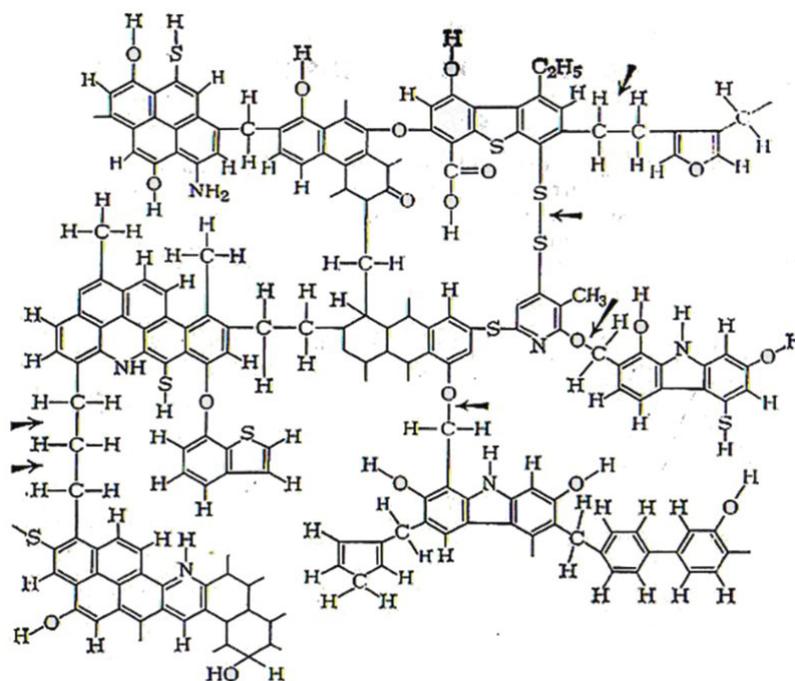


Рис. 1. Структура угля [9].

блочным строением. Такие олигомеры (блоки) при добыче отделяются от пласта и в виде отдельных глыб идут в добытые угольные породы. При подготовке товарного угля из пород они дробятся до гранулометрического размера (не более 300 мм) и очищаются от золы и других пустых пород.

Проблема пористости товарного угля изучена неплохо. В частности, в работе [10] экспериментально установлено количество пор на 1 см^3 ($10^8 \div 10^{12}$) и их размеры (несколько десятков нм). Авторы [10] также показали, что трещины – это те поры, соединенные вдоль слоев в магистрали, их размеры также невелики (десятки мкм). Порода в первую очередь раскалывается по слоям и трещинам при дроблении до 200–300 мкм. Только при дроблении до нанометрических размеров будут задействованы поры, и высвободится основная масса газов, содержащихся в порах и в целом в породе. Следовательно, при переводе угольных пород до наноразмерной пыли (менее 150 нм) газовыделение и сохранение газов, как горючую массу, становятся одной из основных проблем.

Рассмотрим затраты на производство тепловой энергии для отопления районными котельными РК-1 (на мазуте) и РК-2 (на угле) г. Кокшетау. Совокупная нагрузка (присоединенная) РК-1 и РК-2 составляет 500 Гкал/ч, количество тепла на отопление – 201 Гкал/ч. Из этих 500 Гкал/ч 426 Гкал/ч вырабатывается на угле и 74 Гкал/ч – на мазуте марки М-100. Расход угля составляет 308981,9 т/год, мазута 7745,4 т/год при длительности отопительного сезона в 5208 ч (217 дней), из которых около 50 дней приходится на наиболее холодный период с пиковыми нагрузками на котлы и расход энергоносителей. РК-1 и РК-2 совокупно закупают электрическую энергию порядка 67 млн кВт.ч у КЭГОК и РЭК.

Учитывая паспортные значения теплоты сгорания энергетического угля и мазута, фактические объемы этих энергоносителей, длительность отопительного сезона и объем купленной электрической энергии, получаем, что РК-1 и РК-2, совокупно передавая 201 Гкал/ч на отопление, имеют рентабельность в 22%. Значит 78% вырабатываемой и закупленной ими энергии тратится на их производственные нужды и издержки производства. При этом РК-1 и РК-2 остаются убыточными предприятиями, несмотря на дотацию (2 млрд КЗТ) из областного бюджета. Руководство ГКП ПВХ «Кокшетау Жылу», кому принадлежат РК-1 и РК-2 вместе с тепловыми сетями, заяв-

ляет, что фактические их убытки составляют 4,5 млрд КЗТ и что эти котельные производят «золотое тепло».

Такое положение дел имеет место практически во всей энергетической отрасли Казахстана и порождает высокую энергоемкость ВВП и «энергетическую бедность» населения страны. Отметим, что перевод котельных на природный газ с теплотой сгорания в 45 МДж/кг не решает вопрос. Во-первых, газ – это дорогое топливо, во-вторых, он снижает потребление энергоносителя всего в 1,5 раза, в-третьих, при этом нужно будет отстроить дорогую инфраструктуру с соблюдением высоких мер безопасности и правил хранения. Поэтому наша задача заключается в переводе котлов на более калорийное (45 МДж/кг) жидкое топливо, беззольное с содержанием углерода менее 45% масс. и ниже, сопоставимое по цене с углем, не требующее ни предварительной растопки и подсветки факела мазутом. При этом полностью сохраняется инфраструктура (исключаются пульпопровод и золоотвал) меняются дробильное отделение и система пылеприготовления, котлоагрегаты и их горелки, теплообменные устройства и водогрейные тракты, насосный парк и вентиляционная группа.

3. Вакуумно-волновая гидроконверсия угля в жидкое низкоуглеродное топливо

Рассматривается энергетический уголь с зольностью 40 масс.%, имеющий среднюю плотность 1400 кг/м^3 [11]. Органическая масса угля составляет порядка 680 кг в 1 т породы, согласно таблице 1, и имеет среднюю плотность 1200 кг/м^3 . При этом органическая масса имеет объем $0,567 \text{ м}^3$ или 25,3 моль. Этот объем заполнен молекулами со строением, указанным на рис. 1. Вопросами ожижения угля и производства синтетического топлива промышленного применения занимались многие, начиная с лауреата Нобелевской премии по химии Ф. Берггуса. Его способ заключался в термодинамическом превращении угля в нефть при высокой температуре, под высоким давлением в атмосфере водорода с добавлением определенного количества растворителя угля. Затем данный способ модифицировался с участием различных катализаторов, полимерных материалов и реагентов, являющихся донорами водорода. Однако, на сегодняшний день отсутствует технология получения синтетического жидкого углеводо-

родного топлива из органической массы угля (ОМУ), равного по цене углю, сопоставимого по теплотворной способности и выбросам парниковых газов с природным газом. Такое топливо стоит значительно дороже нефти и термины «угольная нефть» и «жидкоугольное топливо» это не более чем жаргон. Поэтому предлагается низкотемпературная (не выше 700 °С) вакуумно-волновая гидроконверсия энергетического 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 принципиальная электрическая схема получения ЭГЭ, известная со времен автора, и новые схемы, нашедшие широкие промышленные применения [13], нами существенно изменены и дополнены новыми эффектами, сопутствующими ЭГЭ [14-16].

По Юткину [12] ЭГЭ – это энергоэффективный способ преобразования электрической энергии (без посредства промежуточных передаточных звеньев) в механическую энергию (работу) с высоким КПД. В основе ЭГЭ лежит ранее неизвестное явление резкого увеличения гидравлического и гидродинамического влияний ударных действий импульсного электрического разряда в токопроводящей среде с максимальным укорочением длительности импульса на максимально крутом фронте и форме, близкой к апериодической. Поэтому высокое напряжение в несколько десятков киловольт, поданное на разрядные электроды, порождает ток в импульсе с амплитудой в десятки тысяч ампер. Это вызовет резкое, почти мгновенное, и экспоненциальное возрастание давления разрушительного действия в среде.

В свою очередь, импульсный ток с силой в десятки тысяч ампер вызывает магнитное поле (импульсное) с напряженностью в несколько десятков тысяч эрстед. Оно порождает лавинообразные расщепления и ионизацию молекул органической и неорганической масс угля, погруженного в электропроводящую среду (вода). Иначе говоря, происходят дробление, измельчение и истирание угля и элементов золы до нужных размеров, ионизация составляющих их молекул, а также молекул воды. Поскольку эти ионы в свободном состоянии живут всего $10^{-9} \div 10^{-11}$ с, они вступают в интенсивные химические процессы синтеза углеводородных молекул, разрывая сначала прочные химические и сорбционные связи. Происходят другие необратимые химические

и физические изменения в угольных породах и воде.

Технологическая линия низкотемпературной (не выше 75 °С) вакуумно-волновой гидроконверсии ОМУ в ГУТ имеет принципиальную схему, состоящую из трех основных и двух вспомогательных групп оборудования и оснащение. Это – группа (первая) комбинированных механических мельниц и электрогидравлических ударных измельчителей, снабженных своими источниками электропитания двух типов: источник высокого напряжения (ИВН), источник больших токов (ИБТ). ИВН и ИБТ имеют малые мощности (не более 4 кВт) и питаются сравнительно не большой 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, имеющие 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).

Таким образом, сырье при выходе из каскада мельниц, входящих в первую группу, перемалывается до размера 200 нанометров и ниже, превращается в устойчивую (нераспадающуюся) водотопливную смесь с высокой долей УВС среднего нефтяного дистиллята (солярка) и мазута. Первая установка группы имеет загрузочный бункер объемом 5,6 м³, в который загружается сырье 5 м³ в каждые три минуты. Сырье в 5 м³ состоит из угольной породы (до 300 мм) объемом 4 м³ и 1 м³ водорастворимого сложного реагента, включающего добавки: эмульгирующие; депрессирующие; снижающие вязкость и выполняющие роль растворителя угля. Состав реагента и рабочие характеристики источников питания ИВН и ИБТ определены в результате длительных экспериментальных работ и охраняются в режиме не раскрываемой информации (ноу-хау). В таком же режиме охраняются конструкции ИВН и ИБТ, рабочих органов электродов и их массогабаритные и присоединительные размеры. Отметим лишь рабочие диапазоны работ (таблица 2).

В первой установке (рис. 2а) время загрузки, обработки и выгрузки занимают 5–6 мин, т.е. в

Таблица 2. Рабочие диапазоны

Напряжение (кВ)	Сила тока (мА)	Мощность (кВт)	Энергия (кДж)	Длительность времени разряда (мкс/мс)	Частота (Гц)
0,75÷100	0,1÷24	1,0÷1,2	0,1÷1,25	не более – 36	20÷2000

течение часа – от 10 до 12 раз. Следовательно, общий объем перерабатываемой водоугольной смеси с добавками составляет $50\div 60 \text{ м}^3/\text{ч}$. В каждом цикле время обработки составляет от 3-х до 4-х мин. Электродвигатель установки потребляет электрическую энергию 45 кВт.ч, имеет 900÷1450 оборотов в мин; загрузочный ленточный конвейер – 10 кВт.ч и обороты 300 в мин; подпитывающий реагентный насос – 5 кВт.ч; 900 оборотов в мин; блоки ИВН и ИБТ совокупно до 2 кВт.ч. Следовательно, первая

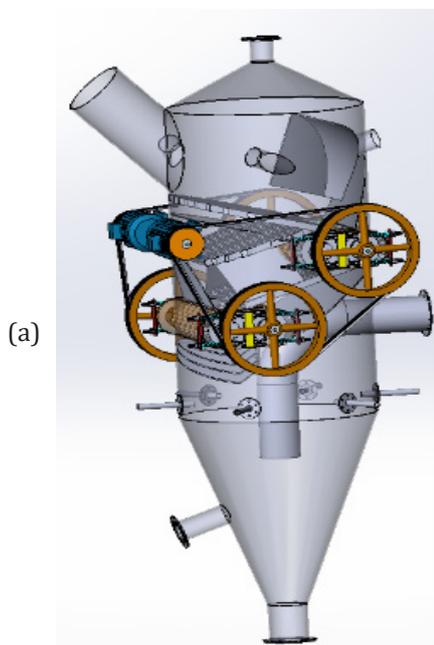
установка потребляет 62 кВт.ч электрической энергии, перерабатывая от 40 до 48 м^3 угля в течение 1 ч.

Последующие две установки группы непрерывного действия (рис. 2б, 3) перерабатывают смесь в проточном режиме. Общее энергопотребление составляет не более 58 кВт/ч или вся группа, указанные выше – 120 кВт/ч для производства не менее 50 м^3 продукции в ч.

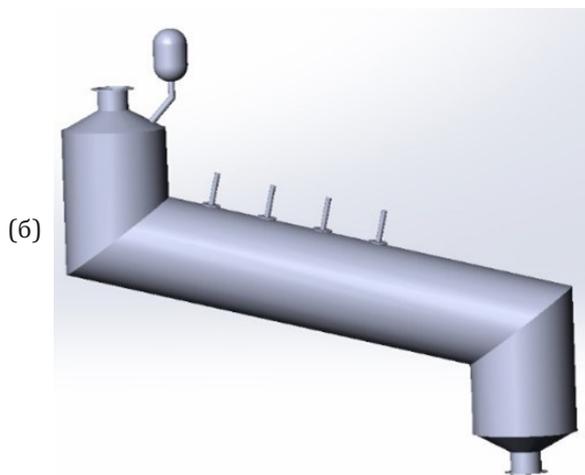
Во вторую группу в качестве отдельного узла входят два гидроциклона (внешнее похоже на реактор в рис. 3), отделяющие зольную часть от топливной эмульсии. Общее энергопотребление гидроциклонов – 90 кВт/ч.

После отделения золы (40%) эмульсия содержит ОМУ порядка 24 м^3 при производительности технологической линии 50 $\text{м}^3/\text{ч}$. Добавляются далее в эмульсию активированные высокомолекулярные жидкие коксохимические отходы (КХО) порядка 6 $\text{м}^3/\text{ч}$. КХО содержит (таблица 3) большое количество ароматических УВС, включая нафталин (порядка 36%), что делает эти отходы хорошими растворителями угля.

В эту смесь нанопорошка угля и растворителя из КХО (таблица 3) добавляем порядка



(а)



(б)

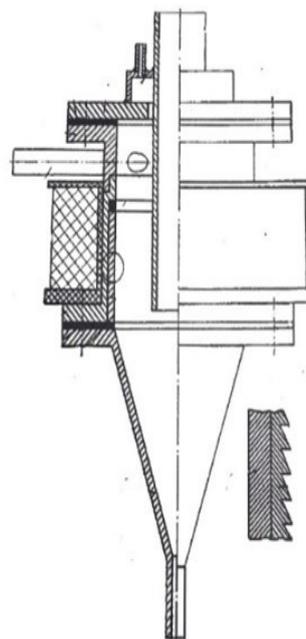


Рис. 3. Группа подготовка водоугольной суспензии (гидроциклон).

Рис. 2. Мельничные реакторы: (а) – механическая мельница; (б) – реактор электрогидравлических ударов).

Таблица 3. Газохроматографический состав КХО

№	Время удерживания, мин	Площадь пика	Соединение	%
1	5,4	758799	Толуол	2,55
2	16,1	231029	Фенол	0,78
3	16,3	51569	Пиридин, 2,4,6-триметил	0,17
4	17,6	111497	Бензол, 1-этил-4-метил-	0,37
5	17,8	82902	Фенол, 2-метил-	0,28
6	18,2	263311	Фенол, 4-метил-	0,88
7	20,5	8518028	Нафталин	28,59
8	21,8	469919	Хинолин	1,58
9	22,2	1482402	Нафталин, 2-метил-	4,98
10	23,5	408287	Бифенил	1,37
11	23,7	128100	Нафталин, 1,6-деметил-	0,43
12	24,8	877090	Бифенилен	2,94
13	25,2	618351	Аценафтена	2,08
14	25,5	807529	Дибензофуран	2,71
15	26,5	1586800	Флоурен	5,33
16	26,7	96772	9Н-ксантен	0,32
17	26,9	142231	Дибензофуран, 4-метил-	0,48
18	27,0	65071	1,1'-дифенил, 2,2', 5,5'-тетраметил-	0,22
19	28,8	80278	Дибензотиофен	0,27
20	29,2	3624895	Фенантрен	12,17
21	29,3	939011	Антрацен	3,15
22	30,1	279543	Карбазол	0,94
23	30,2	249992	Антрацен, 2-метил-	0,84
24	30,7	271220	4Н-циклопента фенантрен	0,91
25	32,3	2662912	Флюорантен	8,94
26	32,6	1852582	Пирен	6,22
27	32,7	141079	Бензо [b] нафто [1,2-d] фуран	0,47
28	33,7	99888	7Н-бензо [c] флоурен	0,34
29	33,7	398178	11Н-бензо [b] флоурен	1,34
30	35,7	108593	Бензо [b]нафто [1,2-d] тиофен	0,36
31	35,8	171811	Циклопента [CD] пирена	0,58
32	36,0	82648	Нафто (2,1-e) хинолин	0,28
33	36,5	805914	Бензо [a] антрацен	2,71
34	36,8	435160	Трифенилен	1,46
35	37,1	98931	Бензо (с) карбазол	0,33
36	42,6	788828	Бензо [K] флуорантен	2,65

10 м³/ч активированную воду и доводим объем смеси до 50 м³. Процесс проходит в специальном вихревом смесителе, входящем в состав третьей группы оборудования. Группа именуется как комплекс облагораживания углеводородов (КОУ) (рис. 4) и имеет производительность 50 м³/ч. Общее энергопотребление КОУ не превышает 150 кВт.ч.

КОУ 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 (таблицы 4 и 5).

Из таблиц 4 и 5 следует что ГУТ по всем параметрам соответствует печному топливу (солярке) [13]. Единственное несоответствие – это низкая температура вспышки ГУТ в закрытом тигле. Однако, этот показатель не является браковочным. Тем более нами разработаны специальные горелочные устройства для ГУТ.

4. Физические и химические аспекты низкотемпературной вакуумно-волновой гидроконверсии угля в жидкое топливо

После первой группы оборудования в топливной смеси появляются наночастицы угольных пород, имеющих следующие показатели: содержание углерода – 92,74%, зольность – 2,16%, летучие вещества – 3,10%, влажность – 2,00%.

Основная задача заключается в формировании ГУТ из таких наночастиц углерода путем их гидрирования и образования первичных спиртов из них при дальнейшей переработке.

Исходя из позиции полного использования потенциалов низкосортных угольных пород, предлагается два оперативных варианта технологии вакуумно-волновой конверсии угольных пород магнитоэлектрическим полем:

- сухая конверсия с производством нанопорошков углерода, оксидов металлов и без производства ГУТ;
- гидроконверсия с производством нанопорошков оксидов металлов и ГУТ для энергетики.

Технология вакуумно-волновой конверсии угольных и углеводородных соединений магнитоэлектрическим полем, низкотемпературными и акустическо-волновыми воздействиями патентована [14]. Также патентованы реализующие ее основные наномолекулярные реакторы. В целом, технологию реализует од-

Таблица 4. Результаты испытаний

№	Наименование определяемых показателей, единицы измерения	Обозначение НД на методы испытаний	Нормируемые значения	Фактические значения
1	Цвет	СТ РК 2951-2017	От бесцветного до черного	Темно-коричневый
2	Зольность %, не более	ГОСТ 1461-75	0,02	0,01
3	Коксуемость 10%-ного остатка, % не более	ГОСТ 19932-99	0,35	0,19

Таблица 5. Результаты испытаний

№	Наименование определяемых показателей, единицы измерения	Обозначение НД на методы испытаний	Нормируемые значения	Фактические значения
1	Температура застывания, °С не выше в период с 1 апреля до 1 сентября	ГОСТ 20287-91	минус 5,0	минус 8,0
2	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С, не ниже	ГОСТ 6356-75	40	32
3	Плотность при 20 °С кг/м ³	ГОСТ 3900-85	не нормируется	871
4	Массовая доля серы, %, не более	ГОСТ 19121-73	0,2	0,14
5	Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с, не более	ГОСТ 33-2000	8,0	4,8
6	Содержание механических примесей, %	ГОСТ 6370-83	отсутствие	0,026
7	Содержание воды, %	ГОСТ 2477-65	следы	следы
8	Фракционный состав	ГОСТ 2177-99		
	10% перегоняется при температуре, °С не ниже		150	158
	90% перегоняется при температуре, °С не выше		360	343

ноименная с ней технологическая линия, отвечающая требованиям технических условий ТУ 3689-001-38281705-2012 («РОСТЕСТ – МОСКВА», 2012), утвержденных Федеральным агентством по технологическому регулированию и метрологии РФ. Технологическая линия сертифицирована в соответствии с требованиями международного стандарта ISO-9001-2008 и имеет Сертификат соответствия РФ №С-RU. АГ98.В.05607-ТР 1457858 (Сертификат соответствия № С-RU. АГ98. В. 09607 – ТР 1457858, РФ).

Угольные породы в целом, низкосортные угли в особенности имеют многоуровневую гетерогенность, созданную четко различимыми органическими металло-минеральными составляющими. Органическое вещество угля согласно наиболее адекватным представлениям [15] и снимкам, полученным атомным силовым микроскопом (SMM – 200Т), сканирующим электронным (SEM) и просвечивающим электронным (TEM) микроскопами, рентге-

новским дифрактометром высокого разрешения, состоит из не конденсированных и конденсированных ароматических (бензольных) и разветвленных алифатических структур [16]. Каждая из этих структур формирует ярко выраженные кристаллитные (пакетные) образования с металло-минерологическими включениями. Такие образования имеют слоистую структуру из 3-7 слоев с толщинами от 1.8 нм до 4.8 нм [10]. В целом пакеты (кристаллиты) имеют пористо-трещиноватые строения с микро-нанопорами с линейными размерами от 10⁻⁶м до 10⁻⁹м и концентрацией в одном см³ от 10¹¹ до 10²⁰ единиц [17, 18]. По справочным данным, характерные величины сопротивления угольных пород к деформациям составляют не более 1,5÷1,7 МПа и коэффициент их крепости (размолоспособности) не превышает величину 1,6 [19].

Подытоживая изложенные, можем заключить, что уголь имеет характерный химиче-

ский состав, вещества которого сформировали кристаллитные образования со слоистой структурой из бензольных ядер и алифатических углеводородов с многочисленными металло-минеральными включениями, связанными между собой электромагнитными силами. Монокристаллиты и их агломераты испещрены большим количеством трещин и микро-нанопор, других ослаблений и поверхностных разрывов. Именно, эти особенности химического состава, строения и структуры, электромагнитная природа взаимодействия атомов и молекул угля составляют основные физические, физико-химические и химические механизмы получения из угольных пород наноматериалов и жидкоугольного низкоуглеродного топлива широкого промышленного применения. Иначе говоря, из указанных механизмов складывается технологическая основа процесса вакуумно-волновой гидроконверсии углеродных и углеводородных соединений на материалы и продукты.

С учетом сказанного, рассмотрим физические (механические) и механохимические аспекты процесса формирования частиц наноразмеров угольных пород, затем электромагнитные закономерности этого процесса во вращающемся электромагнитном поле с угловой скоростью от 50 до 3000 об/сек. Следовательно, линейная скорость у стенки камеры с радиусом 0,20 м и на радиусе 0,15 м соответственно могут достичь величины: $V_{0,2} = 480$ м/сек; $V_{0,15} = 360$ м/сек. Если примем среднюю плотность ρ_c угольных пород равной 1600 кг/м³, то динамическое давление имеет величину у стенки $P_{0,2} \approx 184$ МПа и на радиусе 0,15 м $P_{0,15} \approx 103$ МПа. Послойные распределения скоростей и связанных с ними динамических давлений свидетельствуют о том, что породы испытывают, во-первых, растягивающие усилия опережающего слоя на отстающие от него слои; во-вторых, на каждый слой по вертикали давят усилия не менее 100 МПа при вертикальном расположении реактора. А это означает что, с одной стороны, породы, имея слабую сопротивляемость к растягивающим усилиям, начинают разрушаться (в основном по трещинам) и образовываться новые нанопоры и микротрещины в более мелких их кусках, с другой стороны, под действием динамического давления будет идти процесс закрытия пор и содержащиеся в них газы участвуют в микровзрывах, которые в свою очередь разрушают породы и в их более мелких кусках создают новые нанопоры и микротрещин [20].

Теплота сгорания ГУТ по предварительным данным составляет порядка 45 МДж/кг. Не вдаваясь в суть испытаний, приведем несколько тестовых результатов (рис. 5-6).

Из рисунков 5 и 6 следует двухкратное снижение использования атмосферного воздуха, состоящего только на 24% из кислорода и в основном из азота (~76%). Следовательно, азотистые соединения NO_x являются неизбежным следствием чрезмерно высокого содержания азота в воздухе. Испытание ГУТ, горелок, устройства по улавливанию и утилизации продуктов сгорания проводились с участием экспертов Федерального бюджетного учреждения «Ростест» г. Москва на базе котельной воинской части МО РФ в Подмоскowie (г. Краснознаменск). На одном и том же котлоагрегате поочередно прошли испытания мазут М-100 и ГУТ. Результаты испытаний приведены в графиках 5 и 6. Надписи над рисунками передают их содержания. Например, расход ГУТ зависит от давления на горелке. При одинаковых давлениях этот расход меньше на 27% чем расход М100.

Кроме того, тесты показывают высокую полноту сгорания (99,6%) и практическое отсутствие оксида углерода в составе отходящих газов. Это свидетельствует о совершенстве горелочных устройств и топливной аппаратуры. Отметим, что наши партнеры по модернизации топливной аппаратуры водонагревательных печей РК-1 и РК-2 г. Кокшетау разработали и производят патентованную конструкцию вихревого горелочного устройства [21,22]. У этой конструкции есть выпускное сопло в форме змеевика, которое удлиняет путь, а следовательно время пребывания топлива и окислителя в камере сгорания, с одной стороны, и раскручивает смесь, подогревая ее горячим факелом, увеличивая скорость ее раскрутки по змеевику ближе к выходу, с другой стороны. При этом избыточное тепло змеевика и наружной стенки камеры используется для нагрева и парообразования воды, используемой как контурная охлаждающая жидкость. Далее перегретый пар направляется в камеру сгорания и он, окаймляя наружные поверхности змеевика раскручивается, дальше перегревается и при температуре 1200 °С распадается на водород и окись водорода, на водород и кислород. Эти новые образования также участвуют в процессе горения: водород – как топливо, кислород – как окислитель. С использованием этого факта разработано новое горелочное устройство, которое позво-

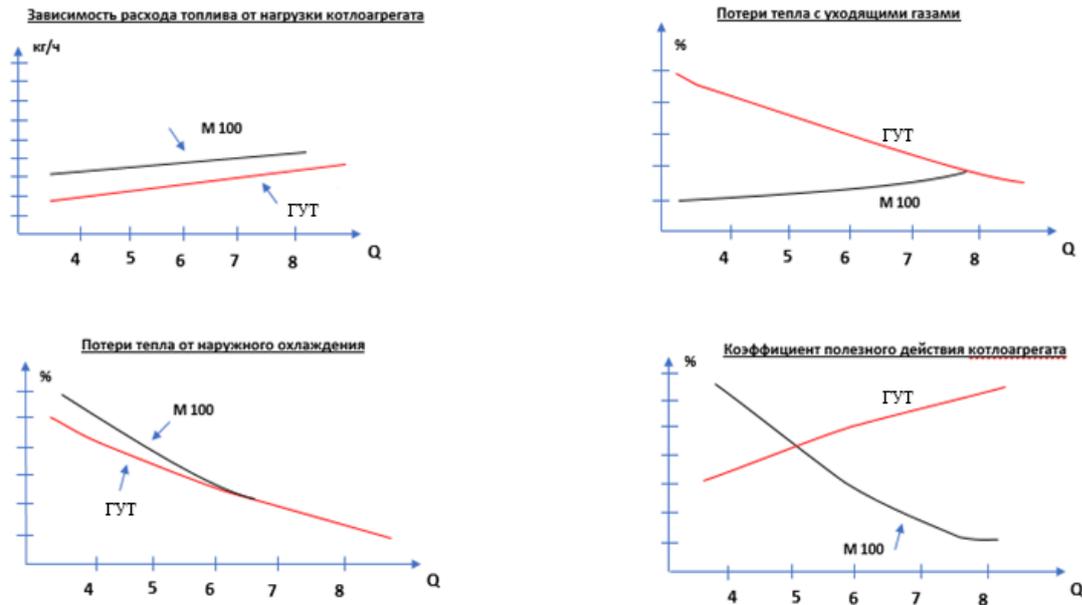


Рис. 5. Теплота сгорания ГУТ.

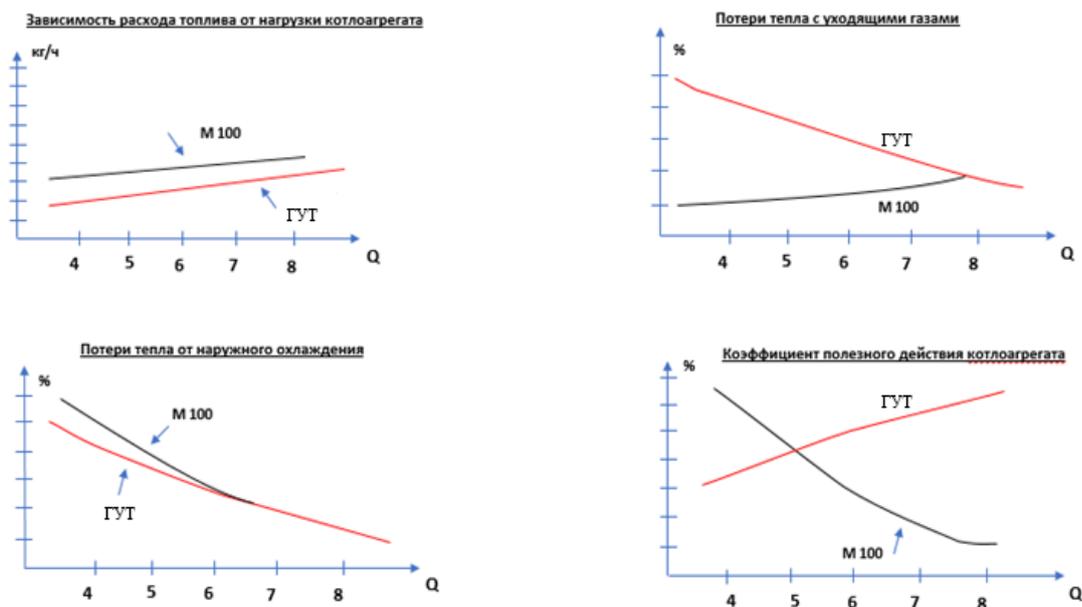


Рис. 6. Теплота сгорания ГУТ.

ляет сжечь ГУТ в масс. 30% и воду не менее 70%. Такая конструкция горелочного устройства проходит промышленные испытания. Его номинальная мощность составляет 600 кВт, можно увеличить до 1 МВт после модернизации. Это устройство называется водородно-термолизной горелкой. Его аналог предложен в работе [23], в которой описывается горелка для сжигания вспененной эмульсии (вода – 90%; углеводород – 10%). Эмульсия подается в горелку как топливо согласно теплотехническим расчетам. Авторы отмечают очень узкие

пределы, и неустойчивость процесса горения и необходимость разработки специальных горелочных устройств.

Улавливание и утилизация парниковых газов горения ГУТ. Специальная конструкция, встраиваемая в тракт между дымовой трубой и дутьевым аппаратом, улавливает отходящие газы и перерабатывает их, разлагая на углерод и кислород (выпускается в атмосферу после охлаждения) основные дымовые газы. При этом также утилизируются пары кислотной воды, отбирается теплота их конденсации и произ-

водится чистая вода. Отделение углерода и присутствующего в дымовых газах незначительного количества элементов золы осуществляется флотационным способом. Так производятся особо чистые нанопорошок углерода, содержащий фуллерен и другие ценные наночастицы, нанокремний (уровень частоты 5N) и наноалюминий (уровень частоты 3N). Устройство прошло полный цикл испытаний, сертифицировано по ISO 9001–2015 и патентовано.

5. Заключение

1. 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 страны вполне «зеленым» способом.

2. Желая не только предлагать упомянутый выше способ, нами выбраны районные котельные РК-1 и РК-2 г. Кокшетау и ТЭЦ-1 г. Степногорск для модернизации их под «зеленое» топливо ГУТ. Отметим, что такое топливо, как новейшая разработка автора, имеет товарную марку «Топливо гидрогенизированное энергетическое» марки 40 (ТГЭ – 40) в РФ, где цифра 40 означает объемное количество ионизированной воды, добавленной в топливо 40% при 60% углерод-углеводорода. Для того, чтобы не повторять что уже было, принято новое более емкое наименование для низкоуглеродного топлива «Гидрогенизированное угольное топливо» (ГУТ). Это наименование подчеркивает угольное происхождение топлива.

3. Учитывая, что при сжигании угля в котлах теряется не менее 25% объема тепла, фактически содержащегося в теплоносителях. В свою очередь, это есть следствие несовершенства процесса сжигания топлива через горелочные устройства. Разработка и применение совершенных, инновационных горелок послужат экономике и энергетике.

4. Проблема эффективной борьбы с мировым потеплением из-за парниковых газов стала планетарной. Никто открыто не говорит, что парниковый эффект не только есть следствие выбросов углекислых газов, а есть прямое воздействие на атмосферу кислых перегретых паров воды с градиентом тепловых,

и атомных электростанции, транспорта в частности авиалайнеров и ракетоносителей. Следовательно, избавляться нужно в первую очередь от высокотемпературных паров кислотных вод. Для этого нужно тиражировать и ставить во все виды теплоэлектростанций, котлов, двигателей и т.д. установки улавливания и утилизации ПГ.

5. Решая экологические проблемы, учитывать огромное количество кислого гидрона коксохимических отходов, нефтешламов, угольных отсевов и пыли. Производство ГУТ решает эти проблемы.

Литература

- [1]. Модель мировой экономики на период развития 2001–2030 годы. <https://www.iea.org/>
- [2]. Стратегия низкоуглеродного развития Казахстана: цели и пути трансформации <https://igtipc.org/images/docs/2020/550258684.pdf>
- [3]. Концепция развития угольной промышленности Республики Казахстан на период до 2020 года https://adilet.zan.kz/rus/docs/P080000644_
- [4]. Стратегия развития Казахстана до 2050 года <https://primeminister.kz/public/ru>
- [5]. Концепция Республики Казахстан по переходу к «зеленой экономике» <https://primeminister.kz/public/ru>
- [6]. Экологический кодекс Республики Казахстан <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/details/188628?lang=ru>
- [7]. Рамочная конвенция ООН об изменении климата https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml
- [8]. Цели в области устойчивого развития ООН (ЦУР ООН) <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>
- [9]. Уайтхерей Д.Д., Митчел Т.О., Фаркаши М. Ожигения угля. – М: Химия, 1986. – 256 с.
- [10]. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Ульянова Е.Б. Изменение объема закрытых пор ископаемых углей // Химия твердого топлива, №3, 1999. – Е.39-45.
- [11]. Хренников Т.М. Механическая активация углей. – М.: Недра, 1993. – 176 с.
- [12]. Юткин Л.А. Электродинамический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 250 с.
- [13]. Справочник нефтепереработчика / Под ред. Ластовкина Г.А., Радченко Е.Д., Рудина М.Г. – Л.: Химия, 1986. – 648 с.

- [14]. Инновационный патент РК 11314. Способ конверсии углеводородного сырья / Калыбаев А.А., Аспандияров Б.Б.
- [15]. Кричко А.А., Лебедев В.В., Фарберов И.Л. Нетопливное использование углей. – М.: Недра, 1978. – 214 с.
- [16]. Кучер Р.В., Компанец В.А., Бутузова Л.Ф. Структура ископаемых углей и их способность к окислению. – Киев: Наукова Думка, 1980. – 167 с.
- [17]. Хренников Т.М. Механохимическая активация углей. – М.: Недра, 1993. – 176 с.
- [18]. Голосов С.М. Механические явления при сверхтонком измельчении. – Новосибирск: Наука, СО АН СССР. 1971. – 216 с.
- [19]. Иванов В.В., Поплавко Е.М., Малевский А.Ю. Минеральное сырье. Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. – 701 с.
- [20]. Бутягин П.Ю. Воспоминания: предвидения П.А. Ребиндера и успехи механохимии. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, химический факультет. <http://www.chemnet.ru/rus/history/Rehbinder/16.html>
- [21]. Патент на полезную модель РФ № 128284. Устройство для сжигания углеводородного топлива // А. Баубек, Н. Баубек. – Оуб. 2012.
- [22]. Patent of EP 2864700. Device for burning fuel. A. Vaubek, N. Vaubek. Published 2016.
- [23]. Яковенко И.С., Киверин А.Д., Коршунов А.М., Кичатов Б.В. Пределы горения вспененной эмульсии с высоким содержанием воды // Письма в ЖТФ, 2019, Т.45, №24. – с. 25–28.
- of Kazakhstan [Ekologicheskij kodeks Respubliki Kazakhstan] <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/details/188628?lang=ru>
- [7]. United Nations Framework Convention on Climate Change [Ramochnaya konvenciya OON ob izmenenii klimata] https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml
- [8]. UN Sustainable Development Goals (UN SDGs) [Celi v oblasti ustojchivogo razvitiya OON (CUR OON)] [https://www.un.org/sustainable-development-goals/](https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/)
- [9]. Whiteheray DD, Mitchell TO, Farkashi M (1986) Liquefaction of coal [Ozhizheniya uglya] Chemistry, Moscow, Russia. (in Russian)
- [10]. Alekseev AD, Vasilenko TA, Ulyanova EB (1999) Solid Fuel Chemistry [Himiya tverdogo topliva] 3:39-45. (In Russian). (in Russian)
- [11]. Khrennikov TM (1993) Mechanical activation of coal [Mekhanicheskaya aktivaciya uglej] Nedra, Moscow, Russia. (in Russian)
- [12]. Yutkin LA (1986) Electrohydraulic effect and its application in industry [Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primenenie v promyshlennosti] Mechanical engineering, Leningrad branch, Leningrad, USSR. (in Russian)
- [13]. Lastovkina GA, Radchenko ED, Rudina MG (1986) Refinery Handbook [Spravochnik neftepererabotchika] Chemistry, Moscow, Russia. (in Russian)
- [14]. Kalybaev AA, Aspandiyarov BB (2002) Method of conversion of hydrocarbon raw materials [Sposob konversii uglevodorodnogo syr'ya] Innovative patent RK 11314. (in Russian)
- [15]. Krichko AA, Lebedev VV, Farberov IL (1978) Non-fuel use of coals [Netoplivnoe ispol'zovanie uglej] Nedra, Moscow, Russia. (in Russian)
- [16]. Kucher RV, Kompanets VA, Butuzova LF (1980) The structure of fossil coals and their ability to oxidize [Struktura iskopaemyh uglej i ih sposobnost' k okisleniyu] Naukova Dumka, Kiev, Ukraine. (in Russian)
- [17]. Khrennikov TM (1993) Mechanochemical activation of coals [Mekhanohimicheskaya aktivaciya uglej] Nedra, Moscow, Russia. (in Russian)
- [18]. Golosov SM (1971) Mechanical phenomena during ultrafine grinding [Mekhanicheskie yavleniya pri sverhtonkom izmel'chenii] Science, Novosibirsk, SO AS USSR. (in Russian)
- [19]. Ivanov VV, Poplavko EM, Malevsky AYU (1998) Mineral raw materials. Directory [Mineral'noe syr'e. Spravochnik] ZAO «Geoinformmark», Moscow, Russia. (in Russian)
- [20]. Butyagin PYu Memories. P.A. Rebinder and advances in mechanochemistry [Vospominaniya: predvideniya P.A. Rebindera i

References

- [1]. Model of the world economy for the period of development 2001–2030. [Model' mirovoj ekonomiki na period razvitiya 2001–2030 gody] <https://www.iea.org/>
- [2]. Low-carbon development strategy of Kazakhstan: goals and ways of transformation [Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya Kazahstana: celi i puti transformacii] <https://igtipc.org/images/docs/2020/550258684.pdf>
- [3]. The concept of development of the coal industry of the Republic of Kazakhstan for the period up to 2020 [Konceptiya razvitiya ugol'noj promyshlennosti Respubliki Kazahstan na period do 2020 goda] <https://primeminister.kz/public/ru>
- [4]. Development Strategy of Kazakhstan until 2050 [Strategiya razvitiya Kazahstana do 2050 goda] <https://primeminister.kz/public/ru>
- [5]. Concept of the Republic of Kazakhstan on the transition to a «green economy» [Konceptiya Respubliki Kazahstan po perekhodu k «zelenoj ekonomike»] <https://primeminister.kz/public/ru>
- [6]. Environmental Code of the Republic

- uspekhi mekhanohimii] <http://www.chemnet.ru/rus/history/Rehbinder/16.html> (in Russian)
- [21]. Baubek A, Baubek N (2012) Device for burning hydrocarbon fuel [Ustrojstvo dlya szhiganiya uglevodorodnogo topliva] Patent of the Russian Federation 128284.
- [22]. Baubek A, Baubek N (2016) Device for burning fuel, Patent of EP 2864700.
- [23]. Yakovenko IS, Kiverin AD, Korshunov AM, Kichatov BV (2019) JTP Letters [Pis'ma v ZHTF] 45(24):25-28. DOI: 10.21883/PJTF.2019.24.48798.18010

About the program of transition to low-carbon fuels in the power industry of the Republic of Kazakhstan

A.A. Kalybai

JSC «Kazakhstan Road Research Institute», str. Nurpeisova, 2A, Almaty, Kazakhstan

Abstract

The technology and composition of the equipment for the technological line of low-temperature (not higher than +75 °C) hydroconversion of power-generating coal into high-calorie (heat of combustion 45 MJ/kg, environmentally friendly (ash-free) liquid hydrogenated coal fuel (GUT) with a low carbon content (less than 45 wt.%), methods of combustion of GUT (fuel equipment and an innovative burner), means of capturing and utilizing greenhouse gases (plasma-chemical reactor) and production of nanomaterials (carbon, silicon, aluminum, titanium, etc.) steam coal GUT with low cost, high value added nanomaterials and implementing a technically efficient, environmentally friendly transition to low-carbon energy with zero greenhouse gas (GHG) emissions.

Keywords: power coal, carbon content, heat and completeness of combustion, ash content, volatiles, hydrogenated coal fuel, greenhouse gas, nanomaterials.

Қазақстан Республикасының энергетикасындағы төмен көміртекті отын көшу бағдарламасы туралы

А.А. Қалыбай

«Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Нұрпейісова, 2А, Алматы қ., Қазақстан

Аңдатпа

Төмен температуралы (+75 °C жоғары емес) энергия өндіретін көмірді жоғары калориялы (жану жылуы 45 МДж/кг, экологиялық таза (күлсіз) сұйықтыққа) гидроконверсиялаудың технологиялық желісі бойынша жабдықтың технологиясы мен құрамы. құрамында көміртегі аз (45 масса %-дан аз) гидрогенделген көмір отыны (ГУТ), ГУТ жану әдістері (отын жабдығы және инновациялық оттық), парниктік газдарды алу және кәдеге жарату құралдары (плазмалық-химиялық реактор) және өндіру наноматериалдар (көміртегі, кремний, алюминий, титан және т.б.) төмен құны бар, жоғары қосылған құны бар наноматериалдармен бу көмір GUT және нөлдік парниктік газдар (ПГ) шығарындылары бар төмен көміртекті энергияға техникалық тиімді, экологиялық таза көшуді жүзеге асыру.

Кілт сөздер: энергетикалық көмір, көміртегі мөлшері, жану жылуы және толықтығы, күл мөлшері, ұшқыш заттар, гидрленген көмір отыны, парниктік газ, наноматериалдар.