

С. В. Николаева (к.х.н., доц.), Ф. Н. Латыпова (к.х.н., доц.), С. Ю. Шавшукова (д.т.н., в.н.с.)
Современные процессы переработки угля

¹НИИ малотоннажных химических продуктов и реактивов
Уфимского государственного нефтяного технического университета
450029, г. Уфа, ул. Ульяновых, 75; тел. (347)2431712, e-mail: reaktiv2003@mail.ru

²Уфимская государственная академия экономики и сервиса
450014, г. Уфа, ул. Чернышевского, 145, тел. (347) 2289134, e-mail: post@ugaes.ru

S. V. Nikolaeva, F. N. Latypova, S. Yu. Shavshukova
Modern technologies of coal processing

¹ Scientific-Research Institute of Low-Tonnage Chemical Products and Reagents
of Ufa State Petroleum Technological University

75, Ulyanovkyh Str., 450029, Ufa, Russia; ph. (347) 2431712

² Ufa State Academy of Economy and Service
145, Chernyshevskogo Str., 450014, Ufa, Russia; ph. (347) 2289134, e-mail: post@ugaes.ru

В связи с исчерпанием природных нефтяных ресурсов проанализированы возможности современных промышленных технологий по переработке угля в топливо и химические продукты.

Ключевые слова: газификация; гидрогенизация; пиролиз; синтез-газ; синтетическое жидкое топливо; уголь; химические продукты.

В настоящее время мировое сообщество осознало необходимость поиска новых энергохимических источников в связи с приближающимся исчерпанием нефтяных ресурсов нашей планеты ¹. Поэтому наряду с поиском альтернативных источников топлива и энергии заслуживают особого внимания вопросы использования ресурсов угля, как потенциального источника углеводородов, химических продуктов и водорода. Разумеется, уголь — продукт природы, запасы которого также неограничены, однако в переходный период от эры углеводородного топлива к альтернативным его источникам (биомасса, водород и др.), по мнению многих специалистов, уголь может сыграть решающую роль в мировой топливно-энергохимической системе ^{2, 3, 4}.

Технологии переработки угля в синтетическое жидкое топливо (СЖТ) были разработаны еще в начале XX в. и успешно эксплуатировались, например, уже в 1930—1940-е гг. в Германии. Однако в последующем открытие новых нефтяных месторождений, развитие нефтедобычи и нефтепереработки привели к тому, что СЖТ из угля не смогло конкурировать с аналогичной продукцией из нефти ⁵.

In connection with exhaustion of natural oil resources opportunities of modern industrial coal processing in fuel and chemical products are analysed.

Key words: gasification; hydrogenization; pyrolysis; synthesis-gas; synthetic liquid fuel; coal; chemical products.

Отличительной особенностью разрабатываемых на настоящем этапе развития науки и техники технологий переработки угля является необходимость снижения выбросов в атмосферу углекислого газа. Такие технологии за рубежом получили название ССТ (Clean Coal Technology) ⁶.

В последние годы во многих странах (Австралии, Великобритании, США, Германии, Испании, Индонезии, Колумбии, КНР, Пакистане, и Японии) ведутся научно-исследовательские и опытно-промышленные работы по совершенствованию технологий и улучшению технико-экономических показателей отдельных стадий процессов переработки угля и продуктов его ожижения. Достижения в области новых технологий переработки углей обсуждаются на форумах международного уровня ⁷⁻¹².

Получение СЖТ из угля включает следующие основные стадии: удаление золы, превращение твердого органического вещества в жидкое, обогащение его водородом и удаление кислорода, азота и серы в виде H₂O, NH₃ и H₂S. Промышленное распространение получили следующие технологии переработки углей: пиролиз, гидрогенизация и газификация ¹³⁻¹⁵.

Дата поступления 04.08.09

Пиролиз – разложение органического вещества угля путем его нагревания в отсутствие воздуха, которое сопровождается перераспределением водорода между образующимися газообразными и жидкими продуктами и углеродистым твердым остатком. Это наиболее простой способ получения из углей жидких и газообразных продуктов. В зависимости от конечной температуры нагрева угля различают *полукоксование* (480–600 °С), *среднетемпературное коксование* (600–900 °С) и *высокотемпературный пиролиз* (выше 900 °С). В результате пиролиза уголь превращается в кокс или полукокс, воду, газы (Н₂, СО, Н₂С, СН₄), масло и смолу (фенолы, гетероциклические соединения, нафталин, антрацен). Выход продуктов для углей различных классов представлен в табл. 1 ¹⁶.

Для получения товарных моторных топлив из смол пиролиза требуется применение специальных гидрогенизационных процессов ¹⁷.

К преимуществам процессов пиролиза угля следует отнести низкое давление, отсутствие дополнительных источников водорода и химических реагентов, сравнительную простоту оборудования и малую капиталоемкость. К недостаткам – сравнительно низкий выход жидких продуктов. В смолах пиролиза обычно содержится около 35 % мас. фенолов и значительные количества асфальтенов и осмоляющихся веществ. Поэтому пиролиз нельзя считать целесообразными для производства моторных топлив из угля.

Деструктивная гидрогенизация – термическое разложение угля под давлением 200–700 атм с применением катализаторов на основе железа, вольфрама, молибдена и др. В отличие от коксования и полукоксования этим методом можно практически полностью превратить органическое вещество угля в жидкие и газообразные продукты (табл. 2) ¹⁸.

В результате гидрогенизации происходит растворение органической массы угля и насыщение ее водородом. Процесс осуществляется в две стадии, первая из которых – перевод массы угля в жидкое состояние; вторая – гидрокрекинг (*парофазная гидрогенизация*) с целью получения моторного топлива.

При *жидкофазной гидрогенизации* углей при 300–500 °С происходит разрушение сложной матрицы угля, сопровождающееся разрывом химических связей и образованием свободных химических радикалов. Стабилизируясь водородом, радикалы образуют молекулы меньшего размера, чем исходные макромолекулы. Рекомбинация свободных радикалов приводит также к образованию высокомолекулярных соединений ¹⁹. Необходимый для стабилизации радикалов водород частично обеспечивается за счет реакций дегидрирования применяемых доноров водорода, которые, кроме того, выполняют функцию пастообразователя. Хорошими донорскими свойствами обладают конденсированные ароматические соединения, например, тетралин, а также смесь тетралина и крезола ²⁰. На производстве

Таблица 1

Выход продуктов при пиролизе различных углей

Уголь	Кокс, % мас.	Смола, л/т		Газ, м ³ /т	Вода, % мас.
		легкая	всего		
Битуминозный:					
со средним содержанием летучих	83	7	86	61	4
с высоким содержанием летучих А	76	10	139	61	6
то же, В	70	9	135	63	11
Суббитуминозный:					
А	59	7	93	83	23
В	58	5	69	71	28
Лигнит	37	5	68	66	44

Таблица 2

Выход продуктов пиролиза и гидрогенизации бурых углей

Продукт	Выход продуктов, % ОМУ*	
	Полукоксование	Гидрогенизация
Полукокс	51.5	6.4
Масло	3.4	53.0
Смола	15.2	–
Газ	18.9	26.4
Водород на реакцию	–	6.7
*ОМУ – органическая масса угля		

большее распространение в качестве доноров водорода получили дистиллятные фракции продуктов ожижения угля, в которых содержится большое количество конденсированных ароматических соединений.

Установлено^{21, 22}, что для гидрогенизационной переработки угля в жидкие продукты предпочтительны каменные угли невысоких стадий метаморфизма, а также бурые угли с содержанием 65–86 % мас. углерода.

Гидрогенизационная переработка углей осуществляется двумя способами: термическим растворением и каталитическим ожижением.

Термическое растворение представляет собой мягкую форму химического преобразования угля. При взаимодействии с донором водорода часть органического вещества угля переходит в раствор и после отделения твердого остатка обычно представляет собой высококипящий экстракт угля, освобожденный от минеральных веществ, N-, O-, S-содержащих соединений и других нежелательных примесей. Для повышения степени конверсии угля в раствор подают газообразный водород. Полученные первичные продукты переработки угля могут быть превращены в СЖТ с помощью вторичных процессов термопереработки, гидрогенизации и облагораживания.

Разработанный в США процесс экстракционной очистки угля («Solvent Refined Coal» – SRC) в базовом варианте «SRC-I» проводится при температуре 425–470 °С, давлении 7–10 МПа и времени пребывания в зоне реакции » 30 мин. Основным продуктом процесса является очищенный от серы угольный экстракт, затвердевающий при температуре 150–200 °С. В модифицированном варианте процесса «SRC-II»²³ (рис. 1) за счет повышения давления до 14 МПа и увеличения времени пребывания угольной пасты в реакционной зоне в качестве целевого продукта получают жидкое топливо широко фракционного состава. Выделенный из жидких продуктов газ, содержащий преимущественно водород и газообразные углеводороды с примесью сероводорода и диоксида углерода (I ступень), после охлаждения до 38 °С направляется в систему очистки от кислых газов. На криогенной установке выделяются газообразные углеводороды C₃–C₄ и очищенный водород, который возвращается в процесс. Жидкие продукты из газосепараторов поступают в атмосферную колонну, где разделяются на фракции: бензиновую (28–193 °С), средний дистиллят (193–216 °С) и тяжелый дистиллят (216–482 °С). Образующаяся на I ступени разделения в газосепараторах уголь-

ная суспензия разделяется на два потока: один подается на смешение с исходным углем, другой – в вакуумную колонну. С верха вакуумной колонны часть жидкого дистиллята, содержащегося в суспензии, отводится в атмосферную колонну, а остаток с низа идет на получение синтез-газа, используемого для производства водорода или топлива.

Технология термического растворения угля EDS («Exxon Donor Solvent»)²⁴ предназначена для производства синтетической нефти с последующей переработкой ее в моторные топлива. В этом процессе уголь после измельчения и сушки смешивается с горячим растворителем–донором водорода – предварительно гидрируемой фракцией 200–430 °С жидкого продукта процесса. Смесь подается в проточный реактор с восходящим потоком вместе с газообразным водородом, где при 430–480 °С и 14–17 МПа происходит термическое растворение угля. Полученные продукты разделяются сепарированием и вакуумной ректификацией на газы и фракции, выкипающие в пределах до 540 °С и остаток > 540 °С, в котором содержатся также непрореагировавший уголь и зола. При различном технологическом оформлении процесса (без рециркуляции остатка – I и с рециркуляцией остатка – II) выход фракций составляет, % мас.²⁵:

	I	II
C ₁ –C ₂	–	20.8
C ₃ –C ₄	5.3	9.0
Бензин	35.1	45.6
Средние дистилляты	35.0	24.3
Тяжелое котельное топливо	24.6	–

К достоинствам технологии термического растворения следует отнести более низкую, чем при пиролизе углей, рабочую температуру и возможность получения продукта заданного качества путем варьирования параметров процесса. К недостаткам – высокое давление процесса и наличие в составе продуктов высокомолекулярных соединений, которые образуются в реакторе в результате рекомбинации свободных радикалов и образования вторичных структур ароматического характера¹⁹.

В процессе *каталитической гидрогенизации* катализаторы способствуют передаче водорода от растворителя к углю и активируют молекулярный водород, переводя его в атомарную форму. Применение катализаторов приводит к увеличению степени конверсии угля и улучшению состава получаемых жидких продуктов.

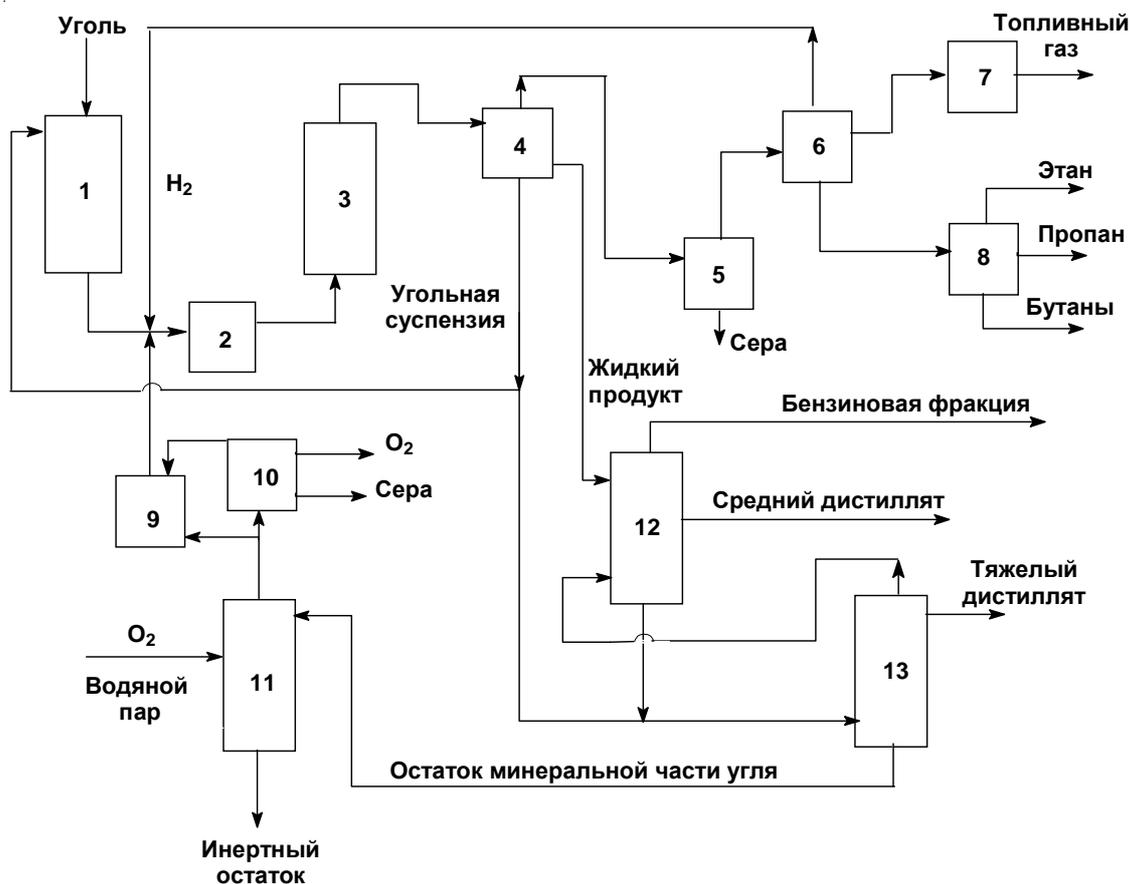


Рис. 1. Схема процесса термического растворения угля «SRC-II»: 1 – смеситель для приготовления пасты; 2 – печь для нагрева пасты; 3 – реактор; 4 – блок газосепараторов; 5 – абсорбер кислотных газов; 6 – криогенное разделение газа; 7 – блок очистки топливного газа; 8 – разделение газообразных углеводородов; 9 – блок очистки синтез-газа и выделения водорода; 10 – блок получения серы; 11 – реактор газификации остатка; 12 – атмосферная колонна; 13 – вакуумная колонна.

Существуют разные варианты технологий прямого гидрогенизационного каталитического ожигения угля. В Германии на базе ранее применявшегося процесса Бергиуса-Пира с использованием нерегенерируемого железного катализатора разработана так называемая «новая немецкая технология» гидрогенизации угля, в которой для получения пасты используют циркулирующий средний дистиллят. Жидкие продукты отделяются от твердого остатка вакуумной разгонкой (вместо центрифугирования), а шлам подвергается газификации для получения водорода. Рабочее давление процесса составляет 30 МПа ^{26, 27}.

По технологии «H-Coal» (США) жидкофазную гидрогенизацию проводят с применением псевдооживленного слоя активного мелко дисперсного Co–Mo-катализатора (рис. 2) ²⁸. Смесь сухого измельченного угля с рециркулирующим продуктом гидрогенизации, в которую был введен сжатый водород, нагревается и подается под распределительную решетку в реактор с псевдооживленным слоем катализа-

тора. Процесс осуществляется при температуре 425–480 °С и давлении около 20 МПа. Продукты реакции и непревращенный уголь непрерывно отводятся из реактора сверху, а отработанный катализатор – снизу. Постоянный вывод и регенерация катализатора обеспечивают поддержание его высокой активности.

Пары, выводимые из реактора, после конденсации разделяются на водород, углеводородные газы и легкий дистиллят. Газы направляются на очистку, водород – на рециркуляцию, жидкие продукты – в сепаратор, в котором отделяется фракция, подвергаемая затем разгонке. Из легкой части получают бензиновые и дизельные фракции. Остаточный продукт, выводимый с низа сепаратора, делится в гидроциклонах на два потока, первый из которых используют в качестве пастообразователя, а второй обрабатывают и газифицируют для получения водорода. Жидкий продукт, остающийся после отделения шлама, подвергают вакуумной разгонке с получением тяжелого дистиллята и остатка, используемого в качестве

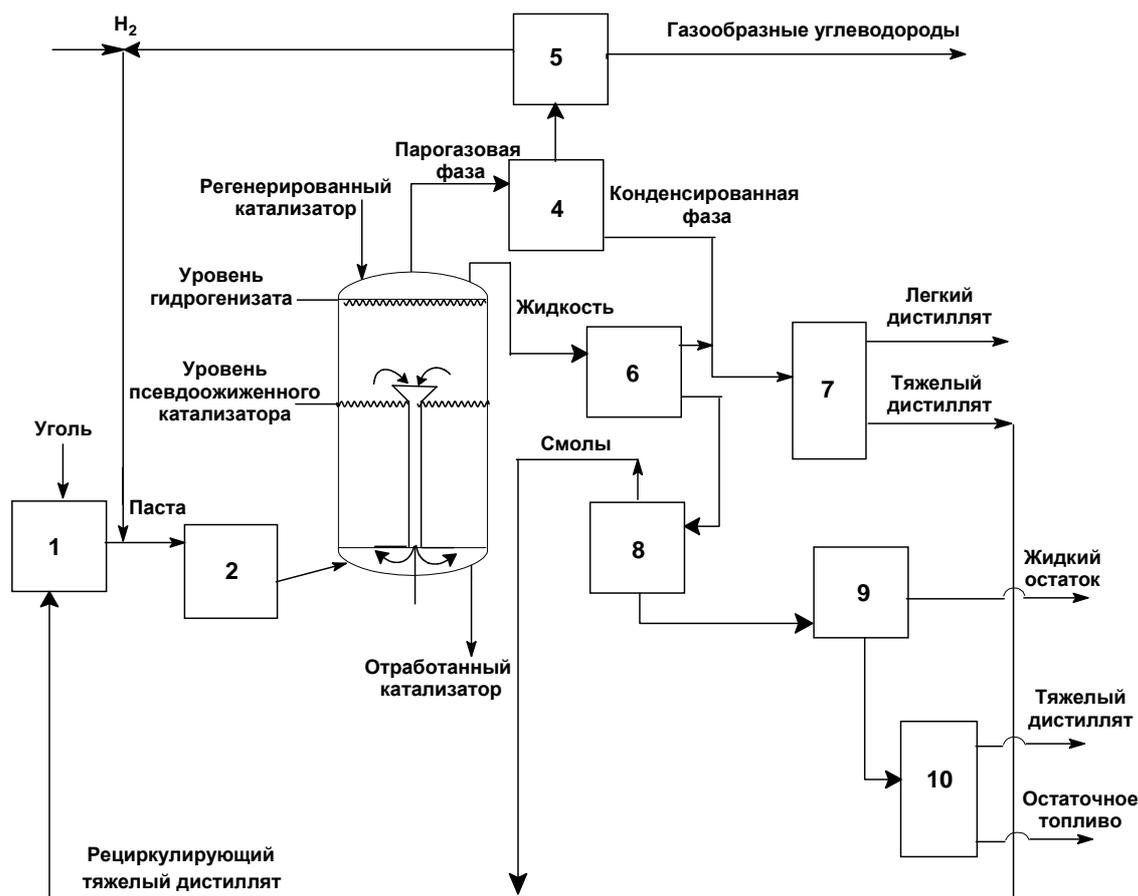


Рис. 2. Схема процесса гидрогенизационного ожигения угля «H-Coal»: 1 – стадия подготовки угля; 2 – подогреватель; 3 – реактор с псевдоожженным слоем катализатора; 4 – конденсатор; 5 – блок извлечения водорода; 6 – скоростной сепаратор; 7 – атмосферная колонна; 8 – гидроциклон; 9 – сепаратор; 10 – вакуумная колонна.

котельного топлива. Выход целевых продуктов в процессе «H-Coal» достигает 51.4% мас. на органическую массу угля, в том числе бензиновая фракция (20–200 °С) – 25.2% мас., средний дистиллят (200–260 °С) – 12.9% мас. и тяжелый дистиллят – 13.3% мас. Расход водорода на жидкофазную гидрогенизацию составляет 4.7 % мас.

В нашей стране Институтом горючих ископаемых (ИГИ) совместно с институтами Грозгипронефтехим и ВНИИнефтемаш еще в 1970-х гг. проводились исследования по созданию перспективной технологии переработки угля в СЖТ. В результате был создан технологический процесс, в котором высокий выход жидких продуктов получали при давлении 10 МПа¹⁹. По технологии ИГИ^{22, 29, 30} (рис. 3) уголь предварительно измельчается, подвергается высокоскоростной сушке в вихревых камерах до остаточной влажности 1.5% мас., затем вторично измельчается методом вибропатола до крупности частиц менее 100 мкм. На измельченный уголь наносят катализатор, со-

держаний 0.2% Мо и 1.0% Fe(III). Совместный вибропатола угля и солей катализатора приводит к раскрытию микропор структуры органической массы угля и обеспечивает более полное и равномерное нанесение катализатора на его поверхность. Кроме катализатора, в реакционную зону могут вводиться ингибиторы: хиолин, антрацен и др., которые стабилизируют свободные радикалы и активизируют деструкцию органической части угля вследствие выделения атомарного водорода при их разложении. Введение 1–5 % таких добавок приводит к увеличению степени конверсии угля и выхода жидких продуктов на 10–15 %. Степень конверсии органической массы угля – до 83%.

Углемастная паста, в которую вводится газообразный водород, предварительно нагревается в трубчатой печи и поступает в систему пустотелых необогреваемых реакторов с объемной скоростью 1.0–1.5 ч⁻¹. В реакторе в течение 30–60 мин происходит гидрогенизация угля, в результате которой образуются уг-

об. водорода, углеводороды C_1-C_4 , аммиак, сероводород и оксиды углерода.

После отделения других газов водород возвращается в процесс. 50–60 % углеводородного газа используется для получения водорода. Остальной необходимый водород получают на отдельной установке газификации угля или остатков от переработки шлама. Жидкие продукты гидрогенизации угля отличаются от обычной нефти элементарным составом и меньшим содержанием водорода, а также присутствием N- и S-содержащих соединений и алкенов (табл. 3) ^{30, 31}, поэтому для получения товарных моторных топлив их необходимо подвергать вторичной газофазной гидрогенизационной переработке.

В табл. 4 приведены характеристики исходного дистиллята гидрогенизации бурого угля по технологии ИГИ и продуктов его гидроочистки ^{30, 32}.

В результате полной переработки угля получается 45–55 % мас. моторных топлив и химических продуктов.

Продолжающиеся во многих странах исследовательские и опытно-промышленные работы в области гидрогенизационной переработки углей направлены на совершенствование технологического и аппаратурного оформления процессов, разработку новых катализаторов и добавок, повышение энергетической эффективности всех стадий, что обеспечит снижение удельных затрат на получение моторных топлив из угля. Перспективным направлением является сочетание процессов гидрогенизации и газификации угля в едином потоке без усложняющих стадий разделения продукта ожижения и без потерь энергии, затрачиваемой на нагрев сырья ³³.

Характерной чертой научно-исследовательских работ последних лет является использование нетрадиционных методов воздействия. Так, одним из инновационных проектов является исследование гамма-радиационного воздействия на термическое разложение углей. Эксперименты по облучению показали, что гамма-радиация оказывает активирующее воздействие на процесс термической деструкции углей ³⁴.

Ведутся исследования по использованию ядерных реакторов для осуществления процесса гидрогенизации углей. Ядерный реактор с гелиевым охлаждением был впервые использован для энергообеспечения процесса газификации угля в 1960-е гг. в США. Технология ядерных энергетических установок освоена

и в России. Применительно к энерготехнологическому комплексу, осуществляющему гидрогенизацию угля с использованием ядерного энергоисточника, имеется широкое поле для технико-экономической оптимизации, отмечают авторы ³⁵. Кроме того, существенное повышение эффективности переработки угля может быть достигнуто при использовании высоконадежных ядерных реакторов типа БН. В ИГИ (Москва) и ГНЦ РФ-ФЭИ (Обнинск) ведутся работы по созданию типового атомного энерготехнологического комплекса (АЭТК) для экологически чистого производства СЖТ производительностью 500 тыс. т/год и более. Разработаны технологии прямой гидрогенизации бурых углей для получения жидких моторных, авиационных и дизельных топлив, а также большого спектра химических продуктов, традиционно получаемых из нефти. Прошел испытание на пилотной установке производительностью 5 т жидких продуктов в сутки процесс глубокой гидрогенизации угля, который отличается использованием низкого давления водорода (60–100 атм), что уже в настоящее время делает его конкурентоспособным добыче и переработке нефти в труднодоступных районах ³⁶.

Газификация – процесс превращения твердого топлива в смесь газов при помощи газифицирующих агентов. В качестве последних используют воздух, кислород, пар и их смеси. Состав образующихся генераторных газов зависит от типа газифицирующего агента ¹⁶. Генераторные газы, получаемые с целью переработки в химические продукты, должны содержать минимальное количество окислителя (CO_2) и балласта (N_2). В этом случае наиболее эффективно применение парокислородного дутья.

Классическим и в то же время одним из современных и технологичных является процесс газификации углей «Lurgi», которой и осуществляется на крупнейшем углеперерабатывающем предприятии «Sasol» в ЮАР. Процесс был разработан Lurgi еще в 1930-х гг. С тех пор техника и технология газификации по способу Lurgi были значительно усовершенствованы и получили ряд модификаций. Одной из наиболее современных модификаций является проведение процесса в газификаторах «Sasol-Lurgi FBDB» (S-L FBDB) (рис. 4). Более 75% мировых запасов угля перерабатываются по этой технологии. Отличительные особенности технологии S-L FBDB следующие: процесс ведется в стационарном слое

Таблица 3

Характеристика жидких продуктов различных процессов гидрогенизации угля в сравнении с нефтью

Показатель	Продукт жидкофазной гидрогенизации в процессах					Легкая аравийская нефть
	SRC-II	EDS	«новая немецкая технология»	«H-Coal»	ИГИ	
Плотность, кг/м ³	942.7	881.6	950.0	899.6	896.2	856.0
Элементный состав, % мас.	84.60	86.50	86.60	86.20	86.48	85.50
C	10.50	11.20	9.05	11.20	11.43	12.60
H	0.80	0.30	0.75	0.50	0.22	0.20
N	0.30	0.10	0.10	0.30	0.62	1.70
S	3.80	1.90	3.50	1.80	1.25	–

Таблица 4

Характеристика и выход дистиллята жидкофазной гидрогенизации бурого угля и продуктов его гидроочистки

Показатели	Дистиллят гидрогенизации	Продукты гидроочистки дистиллята			
		суммарный	н. к. 180 °С	180–300 °С	>300 °С
Плотность, кг/м ³	896.2	857.2	761.5	864.0	866.0
Содержание, % (об.):					
фенолов	10.9	Следы	–	Следы	
азотистых оснований	2.8	Следы	–	Следы	–
Иодное число, г I ₂ /100 г	18.7	1.9	0.2	0.7	2.6
Групповой углеводородный состав, % мас.:					
парафины и нафтены	55.0	54.7	76.0	58.2	43.9
аромат. углеводороды	45.0	45.3	24.0	41.8	56.1
Фракционный состав, °С:					
н. к.	81	72	72	176	297
50% об.	340	270	132	242	340
к. к.	426	420	182	305	420
Элементный состав, % мас.					
C	86.48	86.97	86.01	87.27	87.00
H	11.43	12.79	13.98	12.65	12.52
S	0.62	0.05	0.01	0.03	0.06
N	0.22	0.01	–	–	0.02
O	1.25	0.18	–	0.05	0.40
Выход на исходный дистиллят, % мас.	100.0	96.6	13.0	45.4	41.6

Таблица 5

Предприятия, осуществляющие процесс S-L FBDB

Название предприятия	Место расположения	Количество установок	Ввод в эксплуатацию	Мощность и продукция
Sasol Synfuels	Секунда, Южная Африка	80	1979	80×106 нм ³ /сут. синтез-газа для производства СЖТ и химических продуктов
Dakota Gasification Company	Северная Дакота, США	14	1985	1450×106 нм ³ /год заменителя природного газа
Shanxi-Tianji Coal Chemical Company	КНР, провинция Лученг-Шанхай	5	1987	300 кт/год аммиака, 540 кт/год азотной кислоты, 900 кт/год нитрофосфата, 200 кт/год нитрата аммония
Yima	КНР, Сити-Хенан	2	2000	80000 т/год метанола

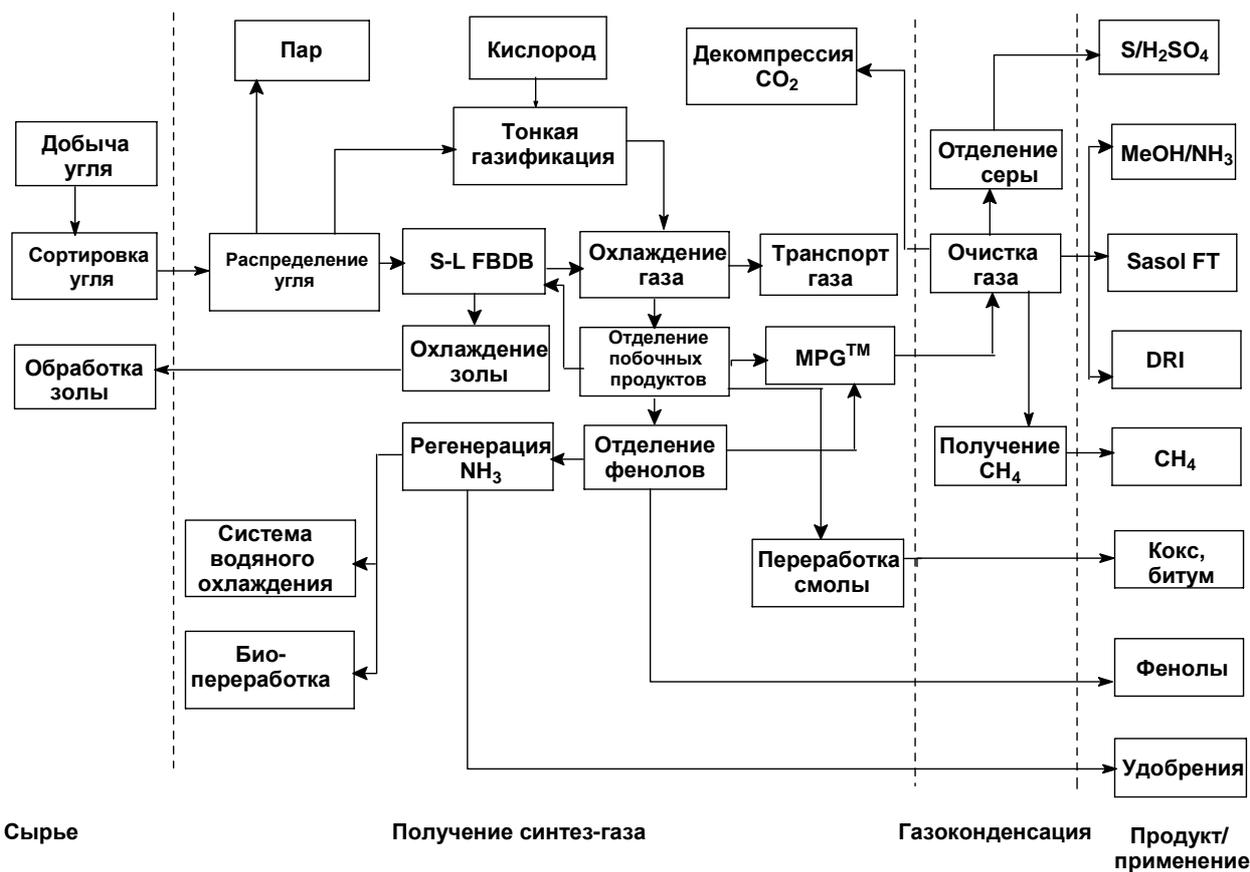


Рис. 4. Схема газификации угля S-L FBDB.

угля под давлением 30 бар (диапазон 20–100 бар), с противоточным вводом потока «пар + O₂» и удалением сухой золы⁷.

Основные преимущества процесса S-L FBDB: стабильность и надежность; высокий КПД; низкое потребление кислорода; возможность переработки лигнита, реактивных топлив, низкосортных углей с высокой степенью зольности и влажности, удаление сухой золы. Выход газа составляет 65000–100000 нм³/ч. Состав газа: 38% H₂, 22% CO, 28% CO₂, 12% CH₄.

В мире насчитывается 101 установка газификации, работающая по технологии S-L FBDB. Из них 80 установок работают в Южной Африке, 14 – в США и 7 – в Китае (табл. 5). Повышению экономической эффективности данной технологии способствует производство на предприятиях по переработке углей сопутствующих химических продуктов, таких как аммиак, фенолы, углеводороды, угольные электроды.

Кроме процесса «Lurgi», промышленно освоенными технологиями газификации на сегодняшний день являются процессы «Winkler» (кипящий слой угольных частиц), «Koppers-

Totzek» (пылеугольный поток), «Техасо» (водно-угольная суспензия) (табл. 6)^{16, 37, 38}.

Институтом химии и химической технологии (ИХХТ) разработан технологический процесс газификации бурого угля, в котором в едином технологическом цикле осуществляется окислительный пиролиз угля в псевдоожиженном слое каталитически активного шлака и газификация получаемого полукокса водяным паром с циркуляцией между реакторами пиролиза и газификатором. Преимуществами этого процесса являются снижение в 5–7 раз расхода кислорода для получения 1 м³ синтез-газа по сравнению с традиционными технологиями, а также увеличение чистоты синтез-газа за счет удаления из сырья значительной части смол. Непрерывная рециркуляция горячего полукокса между пиролизером и газификатором обеспечивает процесс газификации дополнительным теплом³⁹.

В работе⁴⁰ предложена интегрированная технология газификации угля с комбинированным циклом генерирования электроэнергии. Главная цель этого проекта – повышение КПД работающих на угле электростанций, и в результате – снижение выбросов CO₂ в атмосферу.

Характеристика промышленных газогенераторов

Показатели	Газогенератор			
	Lurgi	Winkler	Koppers-Totzek	Texasco
Характеристика угля:				
тип	Все угли, кроме коксующихся	Лигниты и суббитуминозные угли	Все угли	
размер частиц, мм	6–40	0.8–1	0.075 (70%)	0.1–10
содержание влаги, % мас	До 30	До 12	До 8	До 40
Состояние угля в реакторе	Стационарный слой	Псевдоожиженный слой	Режим уноса	Водоугольная суспензия в режиме уноса
Рабочее давление, МПа	2.0–3.0	0.12–0.21	0.14	3.5–4.0
Максимальная температура в газогенераторе, °С	1200	1100	2000	1600
Вид дутья	Парокислородное			
Состояние золы	Сухая		Жидкий шлак	
Время пребывания угля в газогенераторе	1–3 ч	20–40 мин	0.5–10 с	1–10 с
Степень конверсии углерода, %	99	60–90	90–96	99
Максимальная единичная мощность газогенератора:				
по углю, т/ч ОМУ	75	42.2	35.2	6.0
по газу, тыс. м ³ /ч	140	33	55	12
Расход, т/т ОМУ:				
кислорода	0.50	0.50	0.76	0.85
пара	1.90	0.88	0.24	0.30
Объемное отношение пар/кислород	5.9	3.1	0.55	0.64
Состав сырого газа, % об.:				
CO	20	30–50	55–66	55
H ₂	39	35–46	21–32	33
CO ₂	30	13–25	7–12	11
CH ₄	10	1–1.8	0.1	0.1
C _n H _m	0.7	–	–	–
Среднее отношение H ₂ : CO в газе	2.0	1.0	0.5	0.5
Теплота сгорания газа (высшая), МДж/м ³	11.5	9–13	10.6–11.8	11.5
Термический КПД газогенератора, %	75–85	45–75	75–85	75

* Без учета содержания сернистых соединений.

Литература

1. Рахманкулов Д. Л., Николаева С. В., Латыпова Ф. Н., Вильданов Ф. Ш. // Башкирский химический журнал. – 2008. – Т. 15, № 2. – С. 3.
2. Рахманкулов Д. Л., Шавшукова С. Ю., Иمامов У. Б., Латыпова Ф. Н. // Башкирский химический журнал. – 2005. – Т. 12, № 4. – С. 5.
3. Уилсон К. Л. Уголь – мост в будущее. – М.: Недра, 1985.
4. Коробецкий И. А. Уголь – химическое сырье XXI века // ТЭК и ресурсы Кузбасса. – 2007. – № 3. – С. 32.
5. Рахманкулов Д. Л., Журкин А. О., Николаева С. В., Хабибуллин Р. Р. // История науки и техники. – 2007. – № 9, спец. вып. № 2. – С. 16.
6. Force conference on Clean Coal Technologies, 2009. www.iea-coal.org.uk.
7. Материалы 2-ой Международной конференции Фрайбург, Германия, 2007. www.iec.tu-freiburg.de/conference/conf07/pdf/4.1pdf.
8. <http://www.proatom.ru>
9. Зродников А. В., Поплавский В. М., Сидоров Г. И., Чебесков А. Н., Лепендин Е. В. Производство моторных топлив из бурых углей методом гидрогенизации с применением ядерных технологий: Материалы междунар. форума «Высокие технологии XXI века». – М., 2003. – С. 2.
10. Поплавский В. М., Сидоров Г. И., Декусар В. М., Кричко А. А., Малолетнев А. С., Заманов В. В., Косушкин В. Г. Использование атомной энергии в производстве синтетического моторного топлива из угля и тяжелых нефтяных остатков: Мат. междунар. форума «Высокие технологии XXI века». – М., 2005. – С. 17.
11. Зродников А. В., Поплавский В. М., Сидоров Г. И., Чебесков А. Н., Декусар В. М., Шубин Н. Е., Головин Г. С., Кричко А. А., Малолетнев А. С. Новая технология производства моторных топлив из угля с применением атомной энергии: Мат. седьмого междунар. форума «Высокие технологии XXI века». – М., 2006. – С. 20.

12. Кричко А. А., Озеренко А. А. Новая концепция глубокой переработки углеводородного сырья: Мат. междуна. форума «Высокие технологии XXI века». – М., 2005. – С. 9.
13. Терентьев Г. А., Тюков В. М., Смаль Ф. В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых источников. – М.: Химия, 1989. – 271 с.
14. Кузнецов Б. Н. Моторные топлива из альтернативного нефти сырья // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т.6, № 4. – С. 51.
15. Кузнецов Б. Н. Новые подходы к химической переработке ископаемых углей // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 6. – С. 50.
16. Vaughman G. L. Synthetic fuels Handbook. – Denver: Cameron Engineers Inc., 1978.
17. Чуханов З. Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 478 с.
18. Лapidус А. Л., Крылова А. Ю. Уголь и природный газ – источники для получения искусственного жидкого топлива и химических продуктов. – М.: Знание. – 1986. – 48 с.
19. Кричко А. А. Состояние и перспективы производства жидкого топлива из угля. – М.: ЦНИЭИуголь, 1981. – 38 с.
20. Probststein R. F., Hicks R. F. Synthetic fuels. – New York: McGraw-Hill, 1982. – 490 с.
21. Еремин И. В., Жарова М. Н., Скрипченко Г. Б. // Химия твердого тела. – 1981. – № 1. – С. 86.
22. Кричко А.А. Гидрогенизация угля в СССР. – М.: ЦНИЭИуголь, 1984. – 48 с.
23. Freel J., Jackson D., Schmid D. // Chem. Eng. Prog. – 1981. – V. 77, N 5. – P. 86.
24. Wade D. T., Ansell L. L., Epperly W. R. // Chemtech. – 1982. – V. 12, N 4. – P. 242.
25. Goldstein A. M. // Chem. Eng. Prog. – 1982. – V. 78, N 4. – P. 76.
26. Langhoff J. // Canadian J. Chem. Eng. – 1980. – V. 58, N 6. – P. 693.
27. Wolowski E., Hosand H. // Erdöl und Kohle. – 1983. – V. 36, N 8. – P. 373.
28. Хоффман Е. Энерготехнологическое использование угля. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.
29. Кричко А. А., Лебедев В. В., Фарберов И. Л. Нетопливное использование углей. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
30. Кричко А. А. // Развитие углехимии за 50 лет. – М.: Недра, 1984. – С. 52.
31. Robinson R. C. // Energy Progress. – 1983. – V. 3, N 6. – P. 163.
32. Кричко А. А., Малолетних А. С., Юлин М. К. и др. // Химия твердого топлива. – 1985. – № 4. – С. 68.
33. Шейндлин А. Е., Калечиц И. В. О сочетании гидрогенизации и газификации угля / Препринт доклада на XI Мировом нефтяном конгрессе. – Лондон, 1983. – 19 с.
34. Термическое преобразование углей с воздействием гамма-излучения.
<http://www.proatom.ru>
35. Использование ядерного энергоисточника.
<http://www.proatom.ru>
36. Головин Г. С. Жидкие топлива из углей сланцев – альтернатива нефтепродуктам: Мат. междуна. форума «Высокие технологии XXI века». – М., 2005. – С. 8.
37. Альтшулер В. С. Новые процессы газификации твердого топлива. – М.: Недра, 1976. – 280 с.
38. Зорина Г. И., Брун-Цеховой А. Р. Современное состояние технологии газификации угля за рубежом. – М.: ЦНИИТнефтехим, 1986. – 50 с.
39. Схема технологического процесса газификации бурого угля с циркуляцией между реакторами пиролиза и газификатором. www-sbras.nsc.ru/win/sbras/rep/rep2002/t1-1/him/cem1.html
40. Холливуд П. Превращение угля в экологически чистое топливо // Нефтегазовые технологии. – 2006. – № 4. – С. 67.