ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 662.742

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ

[1]Сарыглар Ч.А., [2]Чысыма Р.Б.

[1]ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов» Сибирского отделения Российской академии наук, Кызыл, e-mail: chaiz93@mail.ru;
[2]ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет», Кызыл, e-mail: chysyma@mail.ru

В представленном обзоре литературы рассмотрены основные направления глубокой переработки угля. Отмечается, что к наиболее развиваемым направлениям глубокой переработки угля относятся гидрогенизация, газификация и термическая переработка, обеспечивающие получение различных видов угольной продукции (кокс, углеродные волокна, различные химические продукты, моторное топливо и др.). Результаты исследований авторов показывают, что из существующих технологий наиболее освоенной в промышленном масштабе является пиролиз. Процесс осуществляется в различных температурных интервалах, и, в зависимости от температуры реакции, уголь превращается в кокс, полукокс, воду, газы, масла и смолу. Гидрогенизация позволяет производить из угля жидкое топливо и химические продукты. Наиболее успешно эта технология применялась в ЮАР (Компания Safsol). В последнее время, в связи с ростом цен на нефть, возобновился интерес к гидрогенизации угля и в других богатых углем странах. В результате процесса газификации уголь, взаимодействуя с кислородом, водяными парами и другими газифицирующими агентами, превращается в синтез газ, с последующей его переработкой в ценные химические продукты (моторные топлива, горючий газ и др.). Для снижения экологической нагрузки в регионах угледобычи большое внимание уделяется процессу механической переработки угольной мелочи в кусковое горючее – брикеты. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки специалистов, представленные в данном обзоре, показывают большие возможности использования ресурсов угля в результате его глубокой переработки. Для повышения эффективности использования углей, разработчиками достигнуты значительные успехи: разработано и испытано новее оборудование, предложены инновационные технологии и схемы переработки по основным направлениям глубокой переработки угля.

Ключевые слова: уголь, глубокая переработка, пиролиз, гидрогенизация, газификация, брикетирование

BASIC DIRECTIONS OF COAL PROCESSING

[1]Saryglar Ch.A., [2]Chysyma R.B.

[1]Tuva Institute for the Integrated Development of Natural Resources Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, e-mail: chaiz_93@mail.ru;
[2]Tuva State University, Kyzyl, e-mail: chysyma@mail.ru

In the presented review of the literature, the main directions of deep coal processing are considered. It is noted that the most developed areas of deep coal processing include hydrogenation, gasification and thermal processing, which ensure the production of various types of coal products (coke, carbon fibers, various chemical products, motor fuel, etc.). The results of the authors' studies show that pyrolysis is the most widely used on the industrial scale from existing technologies. The process is carried out in different temperature ranges and depending on the reaction temperature, the coal is converted into coke, semi-coke, water, gases, oils and resin. Hydrogenation makes it possible to produce liquid fuel and chemical products from coal. Most successfully this technology was used in South Africa (Safsol Company). Recently, due to rising oil prices, renewed interest in the hydrogenation of coal in other coal-rich countries. As a result of the gasification process, coal, by interacting with oxygen, water vapor and other gasifying agents, converts gas into synthesis, followed by its processing into valuable chemical products (motor fuels, combustible gas, etc.). To solve environmental problems, the process of mechanical processing of coal fines into lump fuel – briquettes – deserves special attention in coal mining regions. Research and development of specialists presented in this review show great opportunities for using coal resources as a result of its deep processing. To increase the efficiency of coal utilization, the developers achieved significant successes: new equipment was developed and tested, innovative technologies and processing schemes were proposed for major areas of deep coal processing.

Keywords: coal, deep processing, pyrolysis, hydrogenation, gasification, briquetting

Одним из важных направлений реализации новой угольной политики в России является преобразование отрасли из сырьевой в отрасль по добыче и глубокой переработке угля. Такая направленность призвана повысить уровень конкурентоспособности угольной промышленности, существенное развитие угледобывающих территорий, получение различной продукции из угля (кокс, полукокс, активированный уголь, сорбенты, смолы, углеродные волокна, моторное топливо, горный воск и др.) [1–2]. В 2017 г. добыча угля в России составила 408,9 млн т, что на 5,7 % больше результата за 2016 г. По прогнозам Минэнерго в 2018 г. ожидается рост добычи угля до 420 млн т [3]. В России сосредоточено 5,5 % мировых запасов угля, что составляет более 200 млрд т [4].

В настоящее время основным направлением использования углей в России является энергетика (получение тепловой и электрической энергии).

Ценность углей определяется не только их энергетическим использованием, но и возможностью попутного извлечения из них ряда редких и рассеянных элементов, добычи угольного метана, а также получения угольной продукции с высокой добавленной стоимостью в результате технологической переработки [5–6]. В настоящее время специалистами предложены новые подходы, ресурсосберегающие и эффективные технологии по глубокой переработке угля [7–8]. Один из путей интенсификации переработки ископаемых углей – внедрение научно обоснованных, новых технологий [9–11].

В этой связи комплексная переработка угля позволит эффективно использовать его энергетическую ценность, поможет решить главный недостаток угольной промышленности – загрязнение окружающей среды [12–13].

Цель статьи: представление краткого обзора достигнутых разработчиками результатов по основным направлениям глубокой переработки угля.

Наиболее развиваемыми технологиями в промышленной переработке угля являются: пиролиз, гидрогенизация и газификация [14].

Пиролиз. Из существующих технологий наиболее эффективной и освоенной в промышленном масштабе является пиролиз, представляющий собой общую стадию многих процессов, таких как карбонизация, газификация, сжигание, сжижение, которые обычно работают в тесных системах в инертной, восстановительной или окислительной атмосфере при различных давлениях и времени пребывания [15–16]. Продуктами пиролиза углей являются кокс (или уголь), жидкости и газы. Следует отметить, что процесс термического разложения каменного угля протекает в различных температурных промежутках. Температура проведения процесса зависит от типа продуктов, которые необходимо получить в конечной стадии. В зависимости от конечной температуры нагрева угля различают: полукоксование (низкотемпературное) 480–600 °C, коксование (среднетемпературное) 600–900 °C и пиролиз (высокотемпературное) выше 900 °C. После процесса пиролиза уголь превращается в кокс, полукокс, воду, газы (H_2, CO, H_2S, CH_4), масло и смолу (фенолы, гетероциклические соединения, нафталин, антрацен). Выход конечных продуктов термического разложения угля зависит от характеристики угля, подготовки сырья, режима пиролиза, поглощенной углем влаги и др. При термической обработке углей, соответствующей режиму полукоксования, происходят физико-химические превращения угольной массы, существенно влияющие на возможности ее дальнейшей переработки [17]. Большую роль играют температура, давление, размер частиц угля, скорость нагрева, время выдержки, тип реактора и т.д., которые определяют общее преобразование углерода и перенос летучих веществ и, следовательно, распределение продукта [18].

Гидрогенизация – хорошо известная технология, позволяющая производить из угля жидкое топливо и химические продукты. Наиболее усиленно эта технология применялась в ЮАР (Компания Safsol), рост цен на нефть способствовали возобновлению интереса к технологиям ожижения в богатых углем странах [19].

Существует несколько направлений переработки углей с целью производства из продуктов переработки синтетических жидких топлив. На сегодняшний день наиболее изученные технологии получения СЖТ из угольного сырья основаны на двух процессах:

а) прямое ожижение, или гидрогенизация, – процесс превращения органической массы угля под воздействием давления водорода (до 300 атм) в жидкие и газообразные продукты в присутствии катализатора в среде растворителя при температуре до 500 °C, с последующим гидрооблагораживанием полученных жидких продуктов;

б) косвенное ожижение, состоящее из стадии газификации угля, – для получения синтез-газа с последующим каталитическим синтезом углеводородов.

Наиболее предпочтительным для получения жидких продуктов из угля является метод прямой гидрогенизации. Процесс протекает при воздействии на уголь молекулярного водорода под давлением, при повышенной температуре с использованием жидких продуктов (пастообразователей и катализаторов). При гидрогенизации происходит деструкция угольных веществ и насыщение (гидрирование) их водородом с получением смеси жидких продуктов, фракционный и химический состав которых аналогичен природной нефти, за исключением повышенного содержания ароматических углеводородов и гетероатомных соединений. В результате процесса около 90 % угля превращается в жидкие продукты и газ, причем высококипящие фракции (выше 300–350 °C) рециркулируют в процессе, а конечным продуктом являет-

ся дистиллят с температурой кипения до 300–350 °С (т.е. смесь сырого бензина, керосина, дизельного топлива), выход которого составляет 60–65 % органической массы угля [20].

Для ожижения применяют каменные угли низких рангов метаморфизма и бурые угли с содержанием 65–86 % массы углерода [21].

Угольные вещества бурых и каменных углей невысокой стадии метаморфизма, применяемые для получения жидкой продукции, представлены самоассоциированными взаимодействиями в твердой замкнутой системе, проникновение в которую реагентов (водород, катализатор, растворитель и др.) затруднено. В этой связи на стадии подготовки угля к ожижению для сушки угля до остаточного содержания влаги 1,0 % и менее и измельчения его до 60–100 мкм применяется метод высокоскоростной термообработки угля в вихревых камерах. Данный метод позволяет нагревать уголь в инертной среде за доли секунды, увеличивать его удельную поверхность и количество микропор в 5–10 раз по сравнению с исходным углем, существенно повышая его реакционную способность. Удельные капвложения на термообработку угля в вихревых камерах в 22 раза ниже, чем в случае применения барабанных сушилок, применявшихся ранее [22].

Для получения жидких продуктов из ТГИ практический интерес представляют новые подходы по использованию термического растворения (рафинирующей гидрогенизации). Процесс протекает в присутствии дистиллятного и (или) остаточного пастообразователя при давлении 3–5 МПа, температуре 380–450 °С с объемом скорости подачи сырья от 1 до 6 ч (смесь ТГИ с пастообразователем 1:1,301,8) [23]. При переработке углей, содержащих в своем составе небольшое количество водорода (около 5 % на органическую массу) в процесс дополнительно вводят водород в связанном виде донора водорода, например гидрюры, тетралина, газообразного водорода.

В институте горных ископаемых (ИГИ) проведены исследования по совершенствованию и интенсификации отечественной технологии гидрогенизации углей под невысоким давлением водорода 6–10 МПа. Наиболее подходящими для процесса гидрогенизации отмечены низкометаморфизованные каменные угли марок Б, Д, ДГ, Г, Ж или неокисленные витриновые бурые угли [24].

В институте химии и химической технологии СО РАН разработаны и предложены новые методы получения жидких топлив, основанные на процессах гидрогенизации бурого угля и его смесей с нефтяными остатками и синтетическими полимерами в присутствии механохимически активированных железорудных катализаторов [25].

Показатели гидрогенизации угля в значительной степени определяются свойствами угля [26]. Еще одним из решений, направленных на повышение эффективности процесса гидрогенизации, является подбор реакционной способности углей [27–28].

Эффективным способом интенсификации гидрогенизации угля является применение различных пастообразователей и каталитических добавок. Ожижение угля с использованием катализаторов позволяет существенно увеличить степень конверсии угля и выход жидких продуктов. Максимальный эффект наблюдается в присутствии гематита, подвергнутого механохимическому активированию и, с использованием ультразвука диспергированного в тетралине, а также сочетание процессов гидрогенизации и газификации угля в едином потоке без усложняющих стадий разделения продукта ожижения и без потерь энергии, затрачиваемой на нагрев сырья [29–30].

Существенное повышение эффективности переработки угля может быть достигнуто при применении высоконадежных, экологически безопасных ядерных реакторов типа БН. Технологии ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением освоены в России (Белоярская АЭС) и республиках СНГ (Казахстан) [31].

В ИГИ (Москва РФ-ФЭИ, Обнинск) проводятся работы по созданию атомно-энерготехнологического комплекса (АЭТК) для экологически чистого производства СЖТ производительностью 500 тыс т/год и более. Гидрогенизация угля с использованием ядерного энергоисточника позволит существенно удешевить не только собственно установки, но и весь энерготехнический комплекс, при этом может быть создан процесс, характеризующийся умеренной экологической опасностью.

В настоящее время в научно-исследовательских и проектно-конструкторских и промышленных предприятиях страны разработаны научные основы и технологии по дальнейшему совершенствованию технологических процессов гидрогенизации, предложены новые катализаторы и добавки, призванные обеспечить уменьшение расходов на получение моторных топлив из угля.

Газификация – процесс переработки твердого ископаемого топлива путем взаимодействия его с кислородом, водяными

парами, другими газифицирующими агентами, с целью преобразования угольного топлива в горючий газ (смесь CO, H_2 и др.). Газифицирующими агентами выступают кислород, или обогащенный им воздух, водяной пар, диоксид углерода либо смеси указанных веществ. Основными продуктами газификации являются синтез газ с последующей его переработкой в ценные химические продукты, включая моторные топлива, горючий газ, генераторный газ используемые в качестве топлива для энергоустановок. Генераторный газ – смесь оксида углерода с каким – либо газообразным реагентом, при условии получения в его составе горючих составляющих. В качестве воздействующих газов используется чистый кислород, кислород воздуха, водяной пар, а также смесь пара и воздуха или пара и кислорода. Для газификации используют угли с достаточно большим содержанием гетероатомов, в частности бурые и низкометаморфизированные марки каменных углей.

Состав, масса и теплотворная способность продуцируемого газа зависит не только от температуры процесса, вида топлива и скорости нагревания частиц, но и от конструкции используемого газогенератора [32]. Например в зависимости от температуры процесса при 550 °C в состав летучих веществ входят пары воды, смол и кислот, а также некондиционные газы (CO_2, CO, H_2, CH_4, C_n, H_m).

Самым простым методом газификации является газификация в присутствии кислорода воздуха. Полученный в процессе пиролиза в газификаторе углистый остаток сжигается с ограниченным доступом воздуха. В процессе газификации образуется воздушный генераторный газ с низкой температурой сгорания, состоящий главным образом из водорода и окиси углерода, разбавленный азотом воздуха и некоторым количеством углекислоты. При кислородной (или паракислородной) газификации (под давлением до 3 МПа) получают синтез-газ со средней теплотой сгорания 10–16 МДж/нм^3. Его можно использовать как вблизи места получения, так и транспортировать, а также применять в качестве исходного сырья для производства углеводородных соединений [33].

Газификация паром, в отличие от газификации воздухом, требует внешнего источника тепла, в случае если пар используется в качестве единственного газифицирующего агента.

Получается в этом случае: водород, окись углерода и углекислота, к которой примешивается водяной пар, полученный газ обладает с более высокой теплотой сгорания. Эта смесь может быть использована для синтеза СЖТ, метанола, смесей спиртов, насыщенных и предельных углеводородов и др. [34]. При одновременном использовании в качестве газифицирующего агента, пара и воздуха получается – смешанный или паровоздушный газ, смесь воздушного и водяного газов (окись углерода, водород, углекислота, азот и водяной пар).

Подземная газификация углей открывает значительные возможности в обработке угольных пластов со сложными горно-геологическими условиями залегания. Подземная газификация угля является экологическим, и имеет достоинства, которые заключаются в том, что при относительно небольшом объеме подземных работ, дополнительной обработки угля, и сохранности плодородного слоя почвы, низкой себестоимости добычи, обеспечивает возможность использования угольных месторождений, путем превращения угля в горючие газы для промышленного использования. Способ подземной газификации угля используется при разработке залежей бурых углей в Средней Азии, каменных углей Кузбасса, наибольшие перспективы для внедрения этой технологии созданы в Кузнезском бассейне [35].

Перспективной глубокой переработкой угля может быть скважинная технология ПГУ, которая обеспечивает осуществление неполного окисления угля, непосредственно в местах его залегания.

Большим преимуществом по экономическому и экологическому потенциалу среди технологий, рентабельное распространение которых реально в ближайшей перспективе, обладают установки комбинированного парогазового цикла, работающие на газифицируемом в них угле. За границей в реализацию ПГУ инвестированы огромные средства, спроектированы ряд демонстрационных блоков мощностью 100–300 МВт с использованием парокислородной газификации угольной пыли и мокрой очистки генераторного газа [36].

Особого внимания заслуживает технологии газификации, по получению синтез-газа, с высокой теплопроводной способностью с использованием технологии кипящего и пылевого слоя, а также их комбинированное применение [37–38]. Существующие аппараты, осуществляющие различные процессы газификации (слоевая газификация, газификация в циркулирующем кипящем слое и во взвешенном потоке), каждая из которых (технологий) уникальны по своему и имеют экономические целесообразности для конкретных мощностей [39].

Для развитых стран технология газификации твердых топлив освоена в промышленном масштабе. Большинство действующих в мире газогенераторов разработано фирмами Lurgi, Winkler, Shell.

Разработка фирмы Lurgi представляет собой осуществление процесса газификации угля в неподвижном слое с применением паровоздушного или парокислородного дутья. Данная технология обширно протестирована, применяется на одном из крупнейших углеперерабатывающих предприятий «Sasol» в ЮАР, газификация происходит под давлением, следовательно, имеется экономия расходов, состав газа получаемого по этой технологии зависит от уровня температур. При паракислородном дутье получается газ, содержащий: 58% CO, 6% CO_2, 26% H_2, 9% CH_4 и 1% N_2

Кроме «Lurgi», промышленно освоенными технологиями газификации являются процессы Winkler (газогенераторы кипящего слоя), реакция происходит при атмосферном или повышенном давлении (1…3 МПа) и в зависимости от целей, степень газификации углерода достигает 85–90.

Технология Shell является наиболее выгодной, отвечающей высоким экономическим и экологическим стандартам технологий, использующей традиционную для пылеугольных котлов систему размола и имеющей возможность использования смеси угля и биомассы. Во всем мире насчитывают около 85 газогенераторных установок, основанных на технологии Shell.

Самым известным и распространенным способом газификации пылевым потоком является Koppers Totzek, использующий пылевидное топливо (каменный или бурый уголь) с размером частиц не более 100 мкм (0,1 мм), пылевидное топливо подается встречными потоками вместе с кислородным дутьем. Способ Texaso можно рассматривать как один из известных и исследованных в промышленном масштабе способов, который представляет собой модернизированный способ Koppers Totzek [40].

Институтом КАТЭК НИИ уголь был создан инновационный процесс газификации, который относится к классу слоевых автотермических технологий [41]. В ходе тщательного изучения слоевой газификации угля на компьютерной модели, впоследствии экспериментальным путем удалось определить новый результат. При определенных технологических показателях в слое угля с так называемым противоположным дутьем образуется фронт неполного преобразования угля, направляющегося навстречу воздушному течению. Положительным моментом этого процесса является то, что выпускаемый продукт (газ) не содержит конденцируемых продуктов и угольных смол, состоит как правило из водорода и оксида углерода, что существенно удешевляет промышленное производство.

Газификация углей является прогрессивным технологическим достижением, для получения чистого синтетического газа и на его основе составных производств по получению электроэнергии, тепла, технологического пара, водорода, метана и др.

Брикетирование углей представляет собой процесс механической переработки угольной (коксовой) мелочи в кусковое горючее – брикеты, имеющие конкретные свойства: массу, форму и размеры. Брикетирование не относится к сфере глубокой переработки угля, однако данная технология входит в общеустановленный список технологий, рассматриваемых инвесторами при разработке проектов развития угледобывающих производств.

В ряде стран Европы (Австралия, Великобритания и др.) и в странах третьего мира на сегодняшний день активно внедряют технологию брикетирования [42]. Принципиальным достоинством брикетирования угля в отличие от традиционного способа сжигания топлива является снижение количества выбросов в атмосферу, высокая теплоотдача в процессе сгорания, легкое воспламенение, длительность горения, простота хранения, транспортировки и обслуживания процесса горения в печи.

Для брикетирования углей существует два способа. К первому можно отнести брикетирование, без участия связующих, при повышенном давлении прессования на штемпельных прессах. По такому пути брикетируются молодые бурые угли и торф. Ко второму способу – брикетирование с использованием связующих. Такой способ повсеместный и применим для брикетирования каменных углей, антрацитов, старых бурых углей, полукоксовой и коксовой мелочи [43–45].

Преимуществом брикетирования по сравнению с традиционными углями является высокая теплоотдача и снижение количества выбросов в атмосферу [46]. В этой связи данная технология все более активно внедряется в производстве бездымного топлива, исследованы и предложены новые технологические схемы получения угольных брикетов с заданными технологическими характеристиками [47–49].

Компанией White Energy (Австралия) в последние годы активно продвигается технология брикетирования с использованием малотоксичного комплекта связую-

щего материала [50]. Данная разработка основана на использовании специальных валковых прессов производства компании K.R. Komarek (США). Технология позволяет за счет специально разработанных сдвиговых деформаций изготавливать монолитный брикет из высушенного и нагретого до 100–120 °С угольного помола. По показателям разработчиков технологии, номинальная стоимость составляет примерно 10–12 долл. США за 1 т конечного продукта, а капитальные расходы на производство мощностью около 1 млн т в год брикетов – прогнозируется около 30 млн долл. США.

Работая на рынке брикетного оборудования и изучая передовой мировой опыт, ИК «Экоэнергия» разрабатывает и производит универсальные валковые прессы серии БВУ с усилиями прессования выше, чем вышеупомянутые прессы производства K.R. Komarek Inc. Также важным отличием технологии ИК «Экоэнергия» является брикетирование без предварительного нагрева смеси, что является наиболее энергесберегающим и доступным, для небольших объемов производства.

Брикетирование угля может применяться для решения экологических проблем в регионах угледобычи за счет переработки угольных отходов.

Заключение

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки, представленные в данном обзоре, показывают возможности использования ресурсов угля в результате его глубокой переработки. Для повышения эффективности использования углей производителями достигнуты значительные успехи в разрешении проблемы глубокой переработки угля за счет разработки и внедрения новых технологий и инновационных разработок. Подводя итоги краткого обзора по основным направлениям глубокой переработки угля, необходимо отметить, что разработки специалистов угольной отрасли ориентированы на качественное усовершенствование потребительских качеств угольной продукции, позволяющего превзойти пределы рынка энергетики угля.

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/node/1846 (дата обращения: 22.08.2018).

2. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190/ (дата обращения: 22.08.2018).

3. Минэнерго РФ ожидает роста добычи угля до 420 млн тонн в 2018 г. Экономика и бизнес-ТАСС [Электронный ресурс]. URL: http://tass.ru/ekonomika/5264731 (дата обращения: 22.08.2018).

4. Угольная промышленность России [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения: 22.08.2018).

5. Голицын М.В., Вялов В.И., Богомолов А.Х., Пронина Н.В., Макарова Е.Ю., Митронов Д.В., Кузеванова Е.В., Макаров Д.В. Перспективы развития технологического использования углей в России // Георесурсы. 2015. № 2 (61). С. 41–53.

6. Ческидов В.И., Зайцев Г.Д. Проблемы переработки и комплексного использования углей месторождений Сибири // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 6. С. 142–150.

7. Кузнецов П.Н., Колесникова С.М., Кузнецова Л.И., Брюкин Ф.А., Перминов Н.В., Каменский Е.С., Павленко Н.И. Терморастворение спекающихся каменных углей в среде антраценовой фракции смолы коксования // Кокс и химия. 2018. № 2. С. 22–30.

8. Хабибулина Е.Р., Исмагилов З.Р., Журавлева Н.В., Федорова Н.И., Созинов С.А., Хицова Л.М., Потокина Р.Р. Изучение углей Кузбасса различных стадий метаморфизма методом термогравиметрического анализа // Химия твердого топлива. 2018. № 1. С. 7–11.

9. Жеребцов С.И., Малышенко Н.В., Исмагилов З.Р. Модифицирование спиртами органической массы бурых углей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 1. С. 128–133.

10. Федорова Н.И., Хицова Л.М., Исмагилов З.Р. Термогравиметрическое исследование в окислительной среде витринитов каменных углей различных стадий метаморфизма // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. № 2. С. 217–224.

11. Котельников В.И., Монгуш Г.Р., Патраков Ю.Ф., Рязанова Е.А., Солдуп Ш.Н. Инновации в технологиях глубокой переработки угля // Региональная экономика: Технологии. Экономика. Экология и инфраструктура: материалы международной научно-практической конференции, посвящ. 20-летию ТувИКОПР СО РАН (Кызыл, 14–15 октября 2015 г.). Кызыл: Издательство ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения» Российской академии наук, 2015. С. 247–250.

12. Чернышев М.А., Анопченко Т.Ю., Репина Е.А., Моисеенко А.А. Комплексная переработка угля на основе нанотехнологий – перспективный вектор развития энергетического комплекса России // ЭТАП: Экономическая теория, анализ, практика. 2010. № 2. С. 79–95.

13. Монгуш Г. Р., Котельников В. И. Экологические и экономические аспекты глубокой переработки угля Тувы // Научный электронный архив [Электронный ресурс]. URL: http://econf.rae.ru/article/6106 (дата обращения: 22.08.2018).

14. Николаева С.В., Латыпова Ф.Н., Щевчукова С.Ю. Современные процессы переработки угля // Башкирский химический журнал. 2009. № 3. Т. 16. С. 122–132.

15. Исламов С.Р., Степанов С.Г. Глубокая переработка угля: введение в проблему выбора технологии // Уголь. 2007. № 10 (978). С. 53–58.

16. Пиролиз каменного угля: понятие и продукты [Электронный ресурс]. URL: https://ztbo.ru/o-tbo/stati/piroliz/piroliz-kamennogo-uglya-ponyatie-i-produkti (дата обращения: 02.10.2018).

17. Герасимов А.М., Абросимов А.А., Пименов Ю.Г., Страхов В М. Изменения вещественного состава и пористой структуры каменного угля при термической подготовке // Кокс и химия. 2016. № 6. С. 2–8.

18. Копылов Н.И., Каминский Ю.Д., Куликова М.П. Пиролиз угля Тувинского месторождения // Химическая технология. 2008. Т. 9. № 4. С. 168–173.

19. Козак М. Конверсия угля в жидкие углеводороды в Польше [Электронный ресурс]. URL: https://

energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Thematic/CTL_in_Poland_2008_ru.pdf (дата обращения: 22.08.2018).

20. Борисенко А.В. Углехимия, как основа экологизации угольной отрасли // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 10. С. 188–195.

21. Кричко А.А. Гидрогенизация угля в СССР. М.: ЦНИЭП уголь, 1984. 48 с.

22. Кричко А.А. Особенности отечественной технологии переработки угля в жидкое топливо. Наука + промышленность: проблемы и перспективы. Передовые технологии России [Электронный ресурс]. URL: http://www.ptechnology.ru/Science.html (дата обращения: 22.08.2018).

23. Шумейко М.В. Гидрогенизация угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 9. С. 32–39.

24. Малолетнев А.С., Шпирт М.Я. Современное состояние технологий получения жидкого топлива из углей // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. № 6. С. 44–52.

25. Кузнецов Б.Н., Чесноков Н.В. Перспективные термокаталитические процессы переработки бурых и сапропелитовых углей в синтетические топлива, связующие и углеродные материалы // Химия в интересах устойчивого развития. 2017. Т. 25. № 3. С. 231–244.

26. Кузнецов П.Н. Стимулирование гидрогенизации углей химическим модифицированием и применением катализаторов: дис. … докт. хим. наук. Красноярск, 1999. 318 с.

27. Малолетнев А.С., Рябов Д.Ю., Осока В.Н., Мазнева О.А. Гидрогенизация угля Зашуланского месторождения Читинской области // Химия твердого топлива. 2011. № 6. С. 19–24.

28. Малолетнев А.С., Кузнецов П.Н., Колесникова С.М., Мазнева О.А. Гидрогенизация угля Чайдахского месторождения Ленского бассейна // Химия твердого топлива. 2013. № 3. С. 37–42. DOI: 10.7868/S0023117713030043.

29. Шейндлин А.Е., Калечиц И.В. О сочетании гидрогенизации и газификации угля // Препринт доклада на XI Мировом нефтяном конгрессе. Лондон, 1983. 19 с.

30. Шарыпов В.И., Береговцева Н.В., Кузнецов Б.Н. Переработка углей в жидкие продукты методами гидрогенизации и гидропиролиза // Химия твердого топлива. 2014. № 2. С. 44–44.

31. Производство моторных топлив из угля с применением атомной энергии [Электронный ресурс]. URL: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=990 (дата обращения: 22.08.2018).

32. Жуков А.В., Кусраева Д.Э., Жукова Ю.А., Шмелев А.А., Умаров М.С. Состояние, проблемы и основные направления глубокой химической переработки угля для создания конкурентоспособной продукции и нового поколения высокоэффективных энергоносителей в регионах Дальневосточного федерального округа // Успехи современного естествознания. 2016. № 12–1. С. 154–161.

33. Существующие методы газификации твердого топлива [Электронный ресурс]. URL: http://tesiaes.ru/?p=8101 (дата обращения: 03.10. 2018).

34. Михеев В.А., Ворсина Е.В., Москаленко Т.В. Традиционные методы получения синтетического жидкого топлива из твердых горючих ископаемых // Тенденция развития науки и образования. 2017. № 33–1. С. 23–27.

35. Стартов В.Г., Стежко И.А. Тенденции инновационного развития проектирования горнодобывающих предприятий на примере комплексного освоения запасов газоугольного месторождения Восточной Сибири // Рациональное освоение недр. 2013. № 1. С. 36–40.

36. Горновая газификация твердого топлива с высокотемпературной очисткой синтез газа // Энергетика и промышленность России. 2014. № 17(253) [Электронный ресурс]. URL: https://www.eprussia.ru/epr/253/16332.htm (дата обращения: 22.08.2018).

37. Капелович Д.Б., Карманян А. К. Технология газификации угля в комбинированном слоевом газогенераторе для теплоэнергетики // Энергетика. 2012. № 5. С. 21–25.

38. Рыжков А.Ф., Попов А.В. Анализ эффективности современных промышленных технологий газификации угля // Энергетик. 2012. № 10. С. 22–25.

39. Алешина А.С. Газификация твердого топлива: учеб. пособие. СПб., 2010. 202 с.

40. Зорина Г.И., Брун-Цеховой А.Р. Современное состояние технологии газификации угля за рубежом. М.: УНИИТ Нефтехим, 1986. 50 с.

41. Степанов С.Г., Исламов С. . Газификация угля: возврат в прошлое или шаг в будущее [Электронный ресурс]. URL: http://www.combienergy.ru/stat/1094-Gazifikaciya-uglya-vozvrat-v-proshloe-ili-shag-v-budushchee (дата обращения: 22.08.2018).

42. Солодов В.С., Папин А.В., Косинцев В.И., Сечин А.И. Технологические аспекты брикетирования мелкодисперсных твердых углеродсодержащих материалов // Вестник Кузбасского Государственного технического университета. 2013. № 3. С. 110–113.

43. Естифеев Е.Н. Новая технология производства бытового бездымного топлива // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 6. С. 51–53.

44. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Новое связующее для брикетирования углеродсодержащих продуктов // Химия твердого топлива. 2017. № 4. С. 42–45.

45. Николаева Л.А. Брикетирование бурого угля с использованием модифицированного гудрона: дис. … канд. тех. наук. Иркутск, 2011. 135 с.

46. Монгуш Г.Р., Котельников В.И., Баринов А.В. Топливные брикеты для улучшения экологической ситуации в городе Кызыле // Актуальные проблемы исследований этноэкологических и этнокультурных традиций народов Саяно-Алтая: материалы 3 международной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, посвященная 20-летнему юбилею Тувинского государственного университета; Году народных традиций в Республике Тыва (Кызыл, 26–30 июня 2015 г.). Кызыл: Изд-во ФГБОУ ВПО «Тувинский государственный университет», 2015. С. 210–212.

47. Александрова Т.Н., Рассказова А.В. Исследование зависимости качества угольных топливных брикетов от технологических параметров их производства // Записки горного института. 2016. Т. 220. С. 573–577.

48. Аринова С.К., Саркенов Б.Б., Акшеев Ж.А. Исследование технологии получения угольных брикетов с заданными физико-механическими характеристиками в лабораторных условиях // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 1–5 (49). С. 127–133.

49. Глазунов П.А., Решетиловский В.П., Манжай В.Н., Зятиков П.Н., Соловьев В.В. Физическое моделирование процессов брикетирования на основе отходов полидисперсных частиц кокса и криогелей поливинилового спирта // Вестн. Томск. гос. ун-та. матем. и мех. 2018. № 53. С. 73–82.

50. Краткий обзор технологий производства угольных брикетов [Электронный ресурс]. URL: http://www.fecsrfec.ru/upload/iblock/514/51461e72cef7de4a4f0a2c4367be4a70.pdf (дата обращения: 22.08.2018).