

УДК 622

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ****Белов Алексей Викторович,**Профессор Отделения Горного и нефтегазового дела Политехнического института
Дальневосточного Федерального Университетаг. Владивосток
poraen@mail.ru**Прокопец Дмитрий Анатольевич,**Студент политехнического института Дальневосточного Федерального Университета
кафедры горного дела.г. Владивосток
onnmete@gmail.com**Савкин Игорь Сергеевич,**Студент политехнического института Дальневосточного Федерального Университета
кафедры горного дела.г. Владивосток
igor@savkin.xyz**Кожаров Матвей Олегович,**Студент Политехнического института Дальневосточного Федерального Университета
г. Владивостокkozharov.matvey@gmail.com**Андреев Андрей Владимирович,**Доцент Отделения Горного и нефтегазового дела Политехнического института
Дальневосточного Федерального Университета, г. Владивостокaandreevmining@mail.ru**Аннотация**

Статья посвящена исследованию современного состояния отрасли глубокой переработки угля. Рассмотрены основные перспективные технологии переработки углей, а также конечные продукты переработки.

Ключевые слова: уголь, глубокая переработка углей, угольная промышленность, газификация, технологии переработки углей, чистые угольные технологии.

THE CURRENT STATE AND PROMISING DIRECTIONS OF TECHNOLOGIES OF DEEP PROCESSING OF COALS

Alexei V. Belov,

Professor of Mining and petroleum Division of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

poraen@mail.ru

Dmitry A. Prokopets,

Student at the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

onnmete@gmail.com

Igor S. Savkin,

Student at the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

igor@savkin.xyz

Matvey O. Kozharov,

Student at the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

kozharov.matvey@gmail.com

Andrey V. Andreev,

Docent of Mining and petroleum Division of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

aandreevmining@mail.ru

ABSTRACT

The article is devoted to the study of the current state of the industry of deep processing of coal. The basic promising technologies of coal processing, as well as end products of processing are considered.

Keywords: coal, deep processing of coal, coal industry, gasification, coal processing technologies, clean coal technologies.

Значительные ресурсы и перспективы угля как энергетического и химического сырья требуют научно обоснованного подхода к использованию данного ресурса в различных отраслях промышленности. В настоящее время топливно-энергетический комплекс России

использует уголь в основном в качестве универсального энергоносителя на тепловых электростанциях. При этом уголь является важным доступным и распространенным углеродсодержащим сырьем в России.

Современные тренды указывают на возможности и перспективы использования угля не только как потенциально экологичного сырья энергетического сырья для электрической и тепловой генерации, но и как сырья для химической промышленности. Данные тенденции актуализируют применение чистых угольных технологий (Clean Coal Technologies, CCT) и технологий химической переработки углей (Coal to Chemicals, CtC). Указанные технологии широко применяются во многих странах мира, том числе в аспекте низкоуглеродной энергетики. Масштабные НИОКР и промышленное внедрение успешно осуществляется в Китае, США, странах Евросоюза, Японии, ЮАР и др. В настоящий момент глубокая переработка угля для производства энергии и химической продукции на российских предприятиях осуществляется в ограниченных масштабах, в то же время Россия обладает крупнейшими доказанными запасами углей основных марок (145 млрд. тонн бурого угля и 120 млрд. тонн каменного угля) [1, 2].

При этом применение технологий глубокой переработки углей перспективно и с точки зрения перехода на низкоуглеродную энергетику, и с точки зрения диверсификации деятельности угольных предприятий за счет расширения линейки выпускаемой продукции и ввода в эксплуатацию не востребуемых запасов низкоконкурентных углей. Также значительный импульс развитие технологий глубокой переработки углей может быть получено в аспекте развития водородной энергетики, где уголь может являться одним из основных видов водородного сырья. Актуальность применения технологий глубокой переработки углей получила свое отражение в федеральной Программе развития угольной промышленности России на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 13 июня 2020 г. № 1582-р [Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года], и в Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 5 августа 2021 г. № 2162-р. [3].

Современные технологии глубокой переработки углей представлены различными способами. Одними из основных способов направлений глубокой переработки углей являются получение различных продуктов через его газификацию (наземную и подземную), гидрогенизацию, химическое воздействие с извлечением гуминовых веществ [2].

Газификация – это процесс получения синтез-газа – смеси, которая состоит из монооксида углерода (CO), водорода (H₂), углекислого газа (CO₂), природного газа (CH₄); водяного пара (H₂O) в различных пропорциях. Процесс газификации угля является универсальным относительно состава продуцируемого газа. Данный способ позволяет сократить выбросы загрязняющих веществ на 95 % [1, 2].

Перспективным направлением является скважинная технология подземной газификации угля (ПГУ), обеспечивающая глубокой переработки угля на месте залегания угольных пластов и получением после обработки на поверхности газа, схожим по характеристикам с природным. Газ ПГУ может являться как энергетическим газом для ГТУ, так и сырьем для получения метанола, жидких топлив, аммиака-карбамида и других химических продуктов [2].

Гидрогенизация – это процесс превращение высокомолекулярных веществ органической массы угля в жидкие продукты (бензин, дизельное топливо, мазут) под давлением водорода и газообразные продукты при температуре 400-500 °С в присутствии катализаторов, органических растворителей и т.д. [1].

Выделяют основные стадии гидрогенизации угля:

- подготовка угля;
- сушка (до 1,5 % влаги);
- нанесение катализатора (из растворов солей в количестве 1-5 % от массы угля).

Углемаляную пасту в смеси с циркулирующим водородсодержащим газом нагревают в системе теплообмена и трубчатой печи и затем направляют на гидрогенизацию в реактор. Гидрогенизация осуществляется в трех или четырех последовательно расположенных цилиндрических пустотелых реакторах, продукты реакции разделяют в сепараторе на парогазовую смесь и тяжелый остаток шлам [2, 4].

Гуминовые вещества – совокупность веществ, образующихся в процессе разложения и трансформации растительных остатков, не имеющие аналогов в живых организмах и отличающиеся полидисперсностью, высокими молекулярными массами и биотермодинамической устойчивостью [4]. ГВ образуются в процессе биохимического превращения органических материалов различного происхождения – процесс гумификации. Данный процесс основывается на стохастическом отборе наиболее устойчивых к биодеградации структур, в связи с этим они представляют собой смесь макромолекул переменного состава и нерегулярного строения.

Самая распространенная классификация ГВ основывается на растворимости в кислотах, щелочах и спиртах. Согласно этой классификации ГВ подразделяют на:

- гуминовые кислоты (ГК);
- фракция ГВ, растворимая в щелочах и нерастворимая в кислотах (при $\text{pH} < 2$);
- фульвокислоты (ФК);
- фракция ГВ, растворимая и в щелочах, и в кислотах;
- гиматомелановые кислоты (ГМК);
- растворимая в этаноле часть ГК. [4] Нерастворимый остаток исходного сырья в углехимии принято называть остаточным углем, а в почвоведении – гумином.

Представленные направления глубокой переработки угля широко развиваются во многих странах мира. В частности, большое внимание развитию и распространению ССТ уделяет *правительство КНР* [5]. Согласно распоряжению Государственного совета КНР, в 1995 году была создана Национальная ведущая группа по распространению ССТ. Она была возглавлена комитетом Государственного развития и планирования (SDPC), бывшим Государственным комитетом по науке и технике (SSTC), а также бывшим Государственным комитетом экономики и торговли (ГЭКТ) [6]. Одобренное Государственным советом руководство представило план развития области чистой переработки угля, в котором указывается, что он состоит из 18 технологий [7] в процессах углеподготовки, газификации, сгорания и очистки дымовых газов. (табл. 1).

Министерство науки и технологий Китая реализовало различные программы и дорожные карты по внедрению и организации передовых технологий переработки угля и ССТ. В настоящее время многие технологии, включая обогащение угля, водоугольное топливо и суспензии Coal Water Mixture (CWM), газификация в жидком слое Circulating

fluidized bed (CFB), и интегрированный цикл газификации (Integrated gasification combined cycle) IGCC внедрены в коммерческое использование. Большой задел получен по технологии подземной газификации угля, ПГУ (UCG) и получению жидких топлив из угля (Coal to Liquids (CtL) [5, 7].

Таблица 1. Структура ССТ в Китае

Область	Стадия применения	Технологии
Coal processing	До утилизации	Coal washing Briquette Coal blending Coal water mixture
High-efficiency combustion and power generation	В процессе сжигания	CFBC PFBC Conventional supercritical and ultra supercritical units Transformation of small and middle industrial boilers
Coal conversion	В процессе сжигания	Coal gasification Coal liquefaction
Clean and highefficiency	В процессе сжигания	Fuel cell Poly-generation
Coal Gasification	В процессе добычи	UCG
Pollutant control and comprehensive utilization of resources	В процессе сжигания	Flue gas clean up (de-SO ₂ & de-NO _x) Flue gas clean up (dust and particulate control) Comprehensive utilization of fly ash
	В процессе добычи	Coal bed methane Eco-environmental technology in coalmines

Оптимизация структуры теплоэнергетики, комплексное повышение эффективности производства электроэнергии на угле привели к снижению потребления уровня угля на традиционных тепловых электростанциях.

Средний срок службы электростанций в Китае составляет около 14 лет, в США – около 38 лет. С развитием технологий, непрерывной структурной оптимизацией Китай добился более чистого развития угольной энергетики [7].

На текущий момент промышленная переработка углей с целью получения моторных топлив и химических продуктов осуществляется в ограниченном объеме. Так, в Германии, городе Цайц, методом прямой гидрогенизации ежегодно перерабатывается около 0,5 млн. тонн смолы смолы полукоксования углей в компоненты моторных топлив, смазочные масла

и парафин. В России же жидкие продукты получают из смол полукоксования каменного угля Черемховского месторождения, а в Эстонии – из смол газификации и пиролиза прибалтийских сланцев [8].

В Южно-Африканской Республике с 1983 года работают 3 завода Sasol Limited с общей производительностью около 33 млн тонн/год по углю или 4,5 млн тонн в год по моторным топливам. В основу технологии легла газификация угля под давлением с помощью метода Лурги с последующим синтезом углеводородов по методу Фишера–Тропша. Из трех способов синтеза Фишера–Тропша (процесс во взвешенном слое порошкообразного катализатора по способу фирмы Келлог, высокопроизводительный синтез на стационарном железном катализаторе по способу Рурхеми–Лурги и жидкофазный синтез по способу Rheinpreußen–Koppers) только первый и частично второй, как показывает опыт работы промышленного предприятия в городе Сасолбурге (ЮАР), относительно благоприятны для получения значительных количеств моторных топлив [8].

В Китае, в начале 2009 года началась эксплуатация крупного завода по газификации углей с последующим синтезом моторных топлив по Фишеру–Тропшу. В отличие от описанных выше процессов, продукты синтеза Фишера–Тропша имеют более широкое практическое значение как углехимическое сырье, поскольку содержат много олефинов, преимущественно нормального строения [4, 8].

Весьма перспективным методом получения жидких продуктов из углей – моторных топлив и сырья для органических синтезов считается прямая деструктивная гидрогенизация. Метод газификации угля в настоящее время остается единственным экономически приемлемым промышленным методом [4].

Значительные перспективы имеют технологии нетопливного использования углей. Так, широкое распространение получают технологии производства угольных гуматов из бурых углей под воздействием щелочных реакций. Получаемые их углей гуминовые и фульвовые кислоты, а также углеродная составляющая являются важными компонентами недорогих и массово доступных органических удобрений для сельского хозяйства. В качестве гуминового удобрения бурый уголь широко применяются на производстве в Германии, так компания Humintech GmbH, являющаяся немецким биотехнологическим предприятием, расположенным в Гревенбройхе, Северный Рейн-Вестфалия, уже более 45 лет разрабатывает продукты на основе гуминовой кислоты и других гуминовых веществ. Ассортимент продукции включает в себя почвенные кондиционеры, обогатители растений и кормовые добавки для животных, а также основные продукты для применения в экологических технологиях или в промышленном секторе. Имея клиентов в более чем 70 странах, компания сегодня входит в число мировых лидеров отрасли. В качестве источника гуминовых веществ компания Humintech использует окисленную форму бурого угля, также известную как леонардит. В то время как бурый уголь сегодня используется преимущественно в качестве энергоносителя, Humintech фокусируется на материальном, углеродно-нейтральном использовании этого ресурса. Результатом являются устойчивые, экологичные и эффективные продукты, произведенные в Германии [9].

Резкую масштабную востребованность на мировом рынке угольные гуматы могут получить в аспекте развития низкоуглеродного земледелия за счет свойств удержания органического углерода почвы (SOC) и эффекта реабилитации истощенных и загрязненных почв [8]. Исследовательской группой ДВФУ совместно с компанией Syncom

Agritech LLC (Япония) разработана технология и удобрение Фульвисол, обеспечивающее массовое производство и применение продукта для низкоэмиссионного органического земледелия и восстановления нарушенных земель [10]. Массовое применение фульвосодержащих удобрений на базе гуминовых веществ бурых углей позволит обеспечить ввод в эксплуатацию неэксплуатируемых в энергетике массово рассредоточенных бурогольных месторождений.

Таким образом можно сделать вывод, что технологии глубокой переработки углей продолжают показывать свою эффективность. Значительные перспективы имеют технологии химической переработки углей (Coal to Chemicals, CtC) Coal Water Mixture (CWM), газификация в жидком слое Circulating fluidized bed (CFB), и интегрированный цикл газификации (Integrated gasification combined cycle) IGCC, ПГУ (UCG), Coal to Liquids (CtL), технологии получения угольных гуматов.

Министерство экономики, торговли и промышленности Японии планирует добиться, чтобы к 2030 году уголь составлял 25 % от используемой энергии, нулевых выбросов CO₂ к 2050 году, продвигать ССТ внутри страны и за рубежом [11].

Глубокая переработка угля является актуальной в Китае. В Японии также развиваются технологии глубокой переработки угля, из-за этого увеличивается доля использования угля, появляются положительные долгосрочные прогнозы [11].

Список литературы.

1. Рубан А.Д. Подземная газификация угля новый этап технологического и инвестиционного развития // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. - №2. - С. 288-300.
2. Filippov S.P., Keiko A.V. Coal Gasification: At the Crossroad. Technological Factors // Thermal Engineering. - 2021. - №3. - С. 209-220.
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации» от 05.08.2021 № 2162-р // Официальный интернет-портал правовой информации. - 10.08.2021
4. Малолетнев А. С., Шпирт М. Я. Современное состояние технологий получения жидкого топлива из углей // Российский химический журнал. - 2008. - №6. - С. 44-52.
5. Xin L., Zhufeng Y., Lixin W. Policy study on development and utilization of clean coal technology in China // Fuel Processing Technology. - 2008. - №4. - С. 475-484.
6. Shiyan C., Jiankun Z., Shuo M., Shiyue Q. Clean Coal Technologies in China: Current Status and Future Perspectives // Engineering. - 2016. - №2, Issue 4. - С. 447-459.
7. Haonan Z., Xingping Z., Jiahai Y. Coal power in China: A multi-level perspective review // Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment. - 2020. - №9.
8. Шумейко М.В. Производство углещелочных реагентов и гуминовых стимуляторов роста растений // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - №10. - С. 373-376.
9. Humintech GmbH URL: <https://www.humintech.com> (дата обращения: 11.12.2021).
10. SynCom Agritech URL: <https://syncom-agri.com> (дата обращения: 11.12.2021).

11. Организация по развитию новой энергии и промышленных технологий Clean Coal Technologies in Japan. - 2 изд. - Хоккайдо: 2006. - 148 с.

References.

1. Ruban A.D. Underground gasification of coal a new stage of technological and investment development // Mountain Information and Analytical Bulletin. - 2007. - №2. - P. 288-300.
2. Filippov S.P., Keiko A.V. Coal Gasification: At the Crossroad. Technological Factors // Thermal Engineering. - 2021. - №3. - P. 209-220.
3. Decree of the Government of the Russian Federation "Concept of Hydrogen Energy Development in the Russian Federation" dated 05.08.2021 № 2162-r // Official Internet Portal of Legal Information. - 10.08.2021
4. Maloletnev A. S., Shpirt M.Y. Modern state of the technology of liquid fuel production from coals // Russian Chemical Journal. - 2008. - №6. - P. 44-52.
5. Xin L., Zhufeng Y., Lixin W. Policy study on development and utilization of clean coal technology in China // Fuel Processing Technology. - 2008. - №4. - P. 475-484.
6. Shiyun C., Jiankun Z., Shuo M., Shiyue Q. Clean Coal Technologies in China: Current Status and Future Perspectives // Engineering. - 2016. - No. 2, Issue 4. - P. 447-459.
7. Haonan Z., Xingping Z., Jiahai Y. Coal power in China: A multi-level perspective review // Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment. - 2020. - №9.
8. Shumeiko M.V. Production of carbon alkaline reagents and humic plant growth stimulants // Mountain Information-Analytical Bulletin. - 2008. - №10. - P. 373-376.
9. Humintech GmbH URL: <https://www.humintech.com> (access date: 11.12.2021).
10. SynCom Agritech URL: <https://syncom-agri.com> (date of access: 11.12.2021).
11. New Energy and Industrial Technology Development Organization Clean Coal Technologies in Japan. - 2 ed. - Hokkaido: 2006. - 148 p.