

УДК 622.333 © О.А. Коленчуков✉, А.Ю. Михайлов,
В.В. Бухтояров, 2025

UDC 622.333 © O.A. Kolenchukov✉, A.Yu. Mikhailov,
V.V. Bukhtoyarov, 2025

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск
✉ e-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
✉ e-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru

Исследование современного состояния и аспектов развития перспективных технологий переработки угольных отходов*

Research of the current state and aspects of development of promising technologies for processing coal waste

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-5-41-48>

На сегодняшний день уголь является одним из основных видов полезных ископаемых, используемый как высококалорийное топливо для получения электроэнергии и в качестве сырья для различных отраслей промышленности. Как показывает глобальная статистика, некоторые страны значительно снизили количество производимого угля в связи с переходом на зеленую энергетику. Однако в мировом масштабе количество добываемого угля постепенно возрастает из года в год. Данная тенденция увеличения добычи относится и к Российской Федерации. Для повышения социально-экономических показателей добывающих регионов была разработана Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года, предполагающая увеличение добычи угля с 485 до 668 млн т. Процессы добычи и обогащения угля связаны с образованием горючих веществ (угольная крошка, угольная пыль, водоугольная взвесь) и низкокачественного угля, требующих дальнейшей переработки. Исследование существующих методов переработки данных продуктов является важной задачей, позволяющей определить наиболее целесообразные технологии и установить дальнейшие перспективы улучшения их эффективности. Для этого были рассмотрены шесть наиболее распространенных методов обращения с угольными отходами. Определены преимущества, недостатки, актуальные проблемы и обозначены возможные направления их применения. В качестве основного критерия, определяющего возможность задействия того или иного метода, использовался показатель крупности угля. Исследования показывают, что гравитационная сепарация и флотация наиболее эффективно могут быть применены для подготовки угля в каче-

КОЛЕНЧУКОВ О.А.

Канд. техн. наук, доцент кафедры
технологических машин и оборудования
нефтегазового комплекса
Сибирского федерального университета,
660041, г. Красноярск, Россия,
e-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru

МИХАЙЛОВ А.Ю.

Младший научный сотрудник
лаборатории биотопливных композиций
Сибирского федерального университета,
660041, г. Красноярск, Россия,
e-mail: amikhaylov@sfu-kras.ru

БУХТОЯРОВ В.В.

Канд. техн. наук, доцент,
заведующий лабораторией
биотопливных композиций
Сибирского федерального университета,
660041, г. Красноярск, Россия,
e-mail: vbukhtoyarov@sfu-kras.ru

* Часть представленных результатов получена в ходе выполнения исследования по государственному заданию Министерства науки и образования РФ (научная тема FSRZ-024-0005).

стве товарной продукции или предварительной обработки угольных отходов для других технологий переработки. Масляная агломерация и брикетирование служат хорошими методами получения топливных элементов с низкой зольностью и как сырье химического синтеза. Газификация и пиролиз позволяют эффективно перерабатывать угольные отходы с получением ценных продуктов и минимальным воздействием на окружающую среду.

Ключевые слова: уголь, угольные отходы, методы переработки, обогащение угля, эффективность, вторичные энергетические ресурсы, современные технологии.

Для цитирования: Коленчуков О.А., Михайлов А.Ю., Бухтояров В.В. Исследование современного состояния и аспектов развития перспективных технологий переработки угольных отходов // Уголь. 2025;(5):41-48. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-41-48.

Abstract

Today, coal is one of the main types of minerals used as a high-calorie fuel for generating electricity and as a raw material for various industries. As global statistics show, some countries have significantly reduced the amount of coal produced due to the transition to green energy. However, on a global scale, the amount of coal mined is gradually increasing from year to year. This trend of increasing production also applies to the Russian Federation. In order to improve the socio-economic indicators of mining regions, the Program for the Development of the Coal Industry of Russia for the period up to 2035 was developed, which assumes an increase in coal production from 485 to 668 million tons. The processes of coal mining and enrichment are associated with the formation of combustible substances (coal chips, coal dust, coal-water suspension) and low-quality coal that require further processing. The study of existing methods for processing these products is an important task that allows us to determine the most appropriate technologies and establish further prospects for improving their efficiency. For this purpose, six of the most common methods of coal waste handling were considered. The advantages, disadvantages, and current problems are determined, and possible areas of their application are outlined. The coal size indicator was used as the main criterion determining the possibility of using a particular method. Research shows that gravity separation and flotation can be most effectively used to prepare coal as a commercial product or pre-process coal waste for other processing technologies. Oil agglomeration and briquetting are good methods for producing low-ash fuel cells and as raw materials for chemical synthesis. Gasification and pyrolysis allow efficient processing of coal waste to produce valuable products and have minimal impact on the environment.

Keywords

Coal, coal waste, processing methods, coal enrichment, efficiency, secondary energy resources, modern technologies.

Acknowledgements

A part of the presented results was obtained while performing research under the state assignment of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (Research Topic FSRZ-024-0005).

For citation

Kolenchukov O.A., Mikhailov A.Yu., Bukhtoyarov V.V. Research of the current state and aspects of development of promising technologies for processing coal waste. *Ugol*. 2025;(5):41-48. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-41-48.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день Российская Федерация занимает одну из лидирующих позиций среди стран, важную роль в экономике которых играет отрасль добычи полезных ископаемых. К основным видам добываемого горючего минерального сырья в нашей стране относятся нефть, природный газ и уголь. Несмотря на большой спрос на углеводороды нефть и газ как наиболее оптимальные виды топлива, уголь является не менее важным сырьем, сохраняя за собой статус одного из важнейших источников энергии. Согласно заявлению заместителя председателя правительства А.В. Новака, количество добытого угля в России за 2023 г. составило порядка 438 млн т [1]. Более половины добытого угля – около 225 млн т использовалось для внутренних нужд государства, а оставшаяся часть отправилась на экспорт. Как показывает мировая практика, объем используемого угля всех стран-потребителей увеличился более чем в два раза начиная с 1980 г. При этом наибольший скачок увеличения потребления угля наблюдался в 2022 г. на фоне энергетического кризиса [2].

Основным направлением использования угля как в России, так и за рубежом является получение электроэнергии путем преобразования его химической энергии в теплоту. Наиболее значительное использование угля наблюдается в восточных регионах страны, что обусловлено наличием действующих предприятий, обширных запасов энергетического угля, а также отлаженной логистикой его поставок. Несмотря на то, что угольная промышленность не вносит существенный вклад в экономику страны, тем не менее она является важной отраслью, развитие промышленных мощностей которой позволит улучшить социально-экономические показатели восточных регионов. Утвержденная Правительством Российской Федерации Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года от 13 июня 2020 года № 1582-р предусматривает повышение производительности труда занятых на добыче угля в 3-4 раза. Это даст возможность увеличить добычу угля с 485 до 668 млн т с распределением общего объема добываемого угля для внутреннего рынка с 33,3 до 40%, а для внешнего – с 60 до 66,7% [3].

Увеличение объемов добычи угля напрямую связано с увеличением объемов его обогащения, так как спрос на обогащенный уголь на мировом рынке является более высоким. Однако процесс добычи и обогащения угля является сложной задачей и всегда сопряжен с образованием горючих веществ в виде угольной крошки, пыли или водоугольной взвеси и низкокачественных углей (далее угольные отходы, угольная фракция), которые зачастую либо складировать на хвостохранилищах, либо сжигают в печах различной конструкции. При всем при этом ни

один из используемых методов не является оптимальным вариантом обращения с угольными отходами. Складируемые на хвостохранилищах угольные отходы нередко становятся источником экологической опасности, а при сжигании образуются токсичные продукты распада в виде газов и золы, негативно влияющие на окружающую среду и здоровье обслуживающего персонала. В связи с этим наиболее целесообразным является производить переработку угольных отходов с получением вторичных энергетических ресурсов. На данный момент существует большое многообразие разработанных методов, каждый из которых характеризуется своими достоинствами и недостатками. Для определения возможностей применения существующих методов переработки угольных отходов необходимо провести анализ их технологических особенностей. При проведении анализа необходимо учитывать рентабельность использования данных методов. Они должны сочетать в себе возможность одновременной переработки угольных отходов и глубокой переработки угля, как это предусматривает программа развития угольной промышленности России. Таким образом, целью настоящей статьи являются анализ литературных источников, посвященных исследованию методов переработки угольных отходов, определение текущего состояния и перспектив их развития, а также целесообразности применения того или иного метода в зависимости от крупности угольной фракции.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Современные технологии переработки угольных отходов, их особенности, преимущества и недостатки

Обзор научной литературы, посвященной исследованиям технологий переработки угольных отходов, позволяет установить шесть наиболее востребованных методов преобразования данных видов отходов в полезную продукцию. Среди данных методов можно выделить: гравитационное обогащение (сепарация, отсадка, обогащение в тяжелых средах и др.), флотация (масляная, пленочная, пенная), масляная агломерация (грануляция), брикетирование (гранулирование), газификация и пиролиз. Каждый из представленных методов переработки обладает определенными технологическими особенностями, которые в общем случае зависят от крупности угольных отходов. С целью установления технологических особенностей, определения преимуществ и недостатков проведем анализ данных методов по отдельности.

Гравитационное обогащение

Гравитационные методы являются одними из основных методов обогащения угольных продуктов, к которым относят уголь и угольные шламы. Наиболее широкое распространение среди гравитационных методов получила гравитационная сепарация благодаря низкой стоимости и высокой эффективности. Использование данного метода не требует больших эксплуатационных и капитальных затрат и не оказывает существенного влияния на окружающую среду [4].

Принцип действия гравитационной сепарации основан на использовании разницы в плотности фракций отходов. В результате действия центробежных сил происходит разделение угольных отходов, которое осуществляется при их самотеке по криволинейной поверхности. Эффективность процесса разделения зависит от крупности угля, содержащегося в поступающем шламе. Нижний предел крупности должен находиться в диапазоне от 0,1 до 0,15 мм. Как показывает практика, в Российской Федерации наиболее успешно применяются установки классифицирующих гидроциклонов и винтовых сепараторов, показавших свою эффективность при переработке угольных зернистых шламов крупностью от 0,15 до 0,2 мм и от 1 до 3 мм [5]. Из-за значительного диапазона размеров угольного шлама рекомендуется проводить его обогащение путем комбинации гравитационной сепарации, например с флотацией, что позволяет повысить качество процесса переработки. Как отмечается в работе [6], для крупной фракции угольных отходов (от 0,5 до 1 мм) стоит использовать гравитационное отстаивание, а для мелкой (до 0,5 мм) – пенную флотацию.

Хотя технология гравитационной сепарации и является хорошо отработанной, тем не менее она характеризуется рядом недостатков. К ним относятся: низкая эффективность метода при обогащении угольных отходов с высоким показателем обогатимости, потребность в чистой оборотной воде (мокрая сепарация) и необходимость установки уловителей пыли (сухая сепарация) и осушителей (при внешней влажности угля более 5% в процессе сухой сепарации). Ввиду этого гравитационная сепарация может быть использована как первоначальная ступень для переработки угольных отходов в товарную продукцию либо как метод подготовки сырья для получения вторичных энергетических ресурсов.

Флотация

Флотация представляет собой физико-химический процесс разделения мелких частиц, основанный на различиях в поверхностных свойствах материалов. На сегодняшний день из всех разновидностей флотации пенная является наиболее эффективной (уровень извлечения – 90-95%) при условии оптимально составленном технологическом процессе. Принцип пенной флотации заключается в прикреплении гидрофобных частиц к пузырькам воздуха для разделения и извлечения в концентрат, в то время как гидрофильные частицы смачиваются водой и остаются в жидкой фазе [7].

С помощью флотации удастся добиться высокой эффективности разделения угольных отходов малой крупности (до 0,5 мм, наиболее оптимальная крупность – 0,08-0,3 мм). Гибкость и распространение данного метода позволяют сократить количество затрат, связанных с его внедрением в производственный процесс переработки отходов. Для осуществления процесса флотации используют химические реагенты. В качестве химических реагентов обычно применяются собиратели и пенообразователи, а также депрессоры, активаторы и регуляторы. Физический эффект собирателей основан на их способ-

ности усиливать гидрофобные свойства угля, а пенообразователей – на создании устойчивой пены (образование значительного количества мелких пузырьков воздуха). Среди собирателей наибольшее распространение получили керосин и мазут, а в качестве пенообразователей – алифатические спирты и гликоли [8].

Современные исследования в области флотации показывают, что основные усилия направлены на изучение наиболее эффективных реагентов с одновременной минимизацией их использования. Например, в исследовании авторов [9] отмечается, что при применении гетерополярных собирателей во время флотации низкосортных углей наблюдается увеличение извлечения горючего вещества на 30% по сравнению с алканами. Данный эффект повышения эффективности извлечения может наблюдаться и при флотации угольных отходов, так как в большинстве случаев их зольность, содержание влаги и иных компонентов схожи с составом низкосортных углей.

Основным недостатком флотации угольных отходов является низкая проработанность технологии, в результате чего наблюдаются повышенный расход химических реагентов и потеря части угля с отходами обогащения из-за низкой селективности. Не стоит забывать, что отходы обогащения могут стать источниками загрязнения окружающей среды, именно поэтому их необходимо утилизировать. Таким образом, применение флотации наиболее целесообразно при обогащении угля малой крупности или при предварительной обработке отходов для дальнейших преобразований. Для использования данной технологии в качестве самостоятельного метода переработки угольных отходов необходимо провести дополнительные исследования, направленные на совершенствование конструкций флотаторов и подбор химических реагентов.

Масляная агломерация

Специфика технологии масляной агломерации схожа с технологией флотации. Сам процесс основан на разнице между смачиваемостью частиц угля и минеральных компонентов. В результате такого процесса происходит избирательное скопление частиц угля, которые в дальнейшем преобразуются в гранулы сферической формы для их последующего отделения от суспензии. С целью эффективного протекания масляной агломерации частицы угля должны быть достаточно гидрофобны, чтобы обеспечить достаточное смачивание связующим компонентом. В качестве связующих компонентов могут быть использованы как нефтяные, так и синтетические (биомасло) масла, в том числе бывшие в употреблении, а также тяжелые углеводороды переработки нефти [10].

При анализе различных источников в качестве достоинства метода масляной агломерации отмечается высокая эффективность извлечения угля (более 90%). По сравнению с флотацией, использование технологии масляной агломерации позволяет облагораживать отходы угольной мелочи крупностью от 6 мкм и менее [11]. Высокая селективность процесса наблюдается при разделении частиц менее 100 мкм.

Широкое распространение технология масляной агломерации не получила из-за своего основного недостатка – значительного потребления масла, необходимого для разделения частиц и образования масляных агрегатов. В связи с этим разработка технических и технологических решений, позволяющих снизить количество используемого масла, является актуальной задачей на данный момент. При этом практический интерес заключается в подборе оптимальных связующих компонентов (масел), способствующих повышению эффективности масляной агломерации. К примеру, авторы исследования [12] делают вывод о том, что выбор связующего компонента во многом определяет себестоимость процесса агломерации. Результаты экспериментальных исследований показывают, что при применении в качестве связующего компонента каменноугольного масла удалось повысить селективность процесса и снизить зольность полученного углемасляного концентрата более чем в 1,5 раза.

Как отдельный метод обогащения угля масляная агломерация имеет ограниченное применение. Тем не менее в настоящее время она может быть применена с целью подготовки для дальнейшей переработки различных углеводородных отходов, в том числе угольных отходов, снижая их зольность. Конечным продуктом такой переработки выступает углемасляной концентрат, по калорийности схожий с углем, который используется как сырье для производства многокомпонентных видов топлива. Другим направлением использования масляной агломерации выступает процесс обогащения высокозольных продуктов, полученных при пиролизе или газификации органических отходов.

Брикетиrowание

При содержании в угле и угольных шламах большого количества влаги целесообразность их обогащения снижается. Это связано с тем, что для подготовки угольной фракции в товарный продукт необходимо использовать сушильные аппараты, которые потребляют большое количество энергии. Для сохранения калорийного продукта, трудно поддающегося переработке, может быть применена технология брикетирования (гранулирования). В качестве сырья для брикетирования также выступает и пылевидная фракция (от 0,5 до 100 мкм), не пользующаяся особым спросом у потребителей. Крупность угля для осуществления процесса брикетирования должна составлять до 6 мм, а в некоторых случаях – до 10 мм.

Для брикетирования угольной фракции применяют прессы (гидравлические, шнековые, ударно-механические) и ряд вспомогательного оборудования в виде сушилок, дробилок, смесителей и др. Процесс брикетирования с помощью валкового прессы можно описать следующим образом. Подготовленное сырье (угольная фракция) с помощью шнекового или гравитационного питателя направляется в рабочую область прессы. Далее оно проталкивается в зазор между двумя вращающимися навстречу друг другу вальцами. В результате данного процесса происходит сжатие сырья, и между карманами образуются брикеты [13].

Достоинства технологии брикетирования главным образом определяются исходя из достоинств центрального оборудования – прессов. Так, для гидравлических прессов достоинствами являются: высокая надежность элементов, низкое потребление энергии и возможность брикетирования сырья различного происхождения, для шнековых (экструдеров) прессов – высокое качество изготавливаемых брикетов (высокая плотность и влагуустойчивость), а для ударно-механических – низкая стоимость процесса. К недостаткам можно отнести капитальные и организационные затраты (при использовании гидравлических прессов), высокие энергетические затраты и низкую надежность рабочих органов (в случае применения шнековых прессов), ограниченные требования к сырью и высокую стоимость составных компонентов (в случае эксплуатации ударно-механических прессов).

Помимо образования брикетов в процессе брикетирования происходит предварительная и заключительная обработка сырья. В большинстве случаев она включает в себя следующие основные этапы: сушка, обработка (дробление, грохочение, измельчение и удаление летучих веществ для низкосортных сортов), добавление связующих веществ (для обеспечения дополнительной прочности), покрытие и обжиг (для укрепления брикетов), охлаждение и складирование. Последовательность осуществления этапов и необходимость применения связующих компонентов зависят от типа исходного угля. Для бурого угля нет потребности в использовании связующих компонентов, в то время как для каменного угля – есть. В качестве связующих компонентов используют вещества органического (крахмал, различные масла, сахар и др.) и неорганического (известняк, глина, оксиды металлов и др.) происхождения, а также комбинированные [14].

Как показывает практика, технология брикетирования является достаточно распространенным методом переработки многих углеводородных продуктов и отходов в готовые топливные элементы. Основные направления исследований в настоящий момент распределены по трем направлениям: совершенствование конструкции прессов, поиск оптимальных связующих компонентов и комбинация различных органических веществ в процессе брикетирования. Большинство актуальных исследований в большей степени связаны с третьим направлением. Так, в работе авторов [15] были протестированы образцы брикетов с различным соотношением угольной пыли, пластика и опилок. По результатам исследований определено, что наиболее качественные брикеты получаются при соотношении 50% угольной пыли, 40% пластика и 10% опилок. Теплотворная способность при том была значительно выше теплотворной способности высокоэнергетического угля, а прочность была достаточной, чтобы обеспечить упаковку брикетов, их хранение и транспортировку без существенных повреждений.

Исходя из вышесказанного, следует, что технология брикетирования может быть использована как эффективный метод обезвреживания угольных отходов. Комбинирование угольных отходов с иными отходами позволяет

снизить себестоимость производства брикетов, которые можно использовать в качестве топлива или в процессе полукоксования. Основной проблемой технологии является высокая стоимость конечного продукта (брикетов). Для снижения стоимости брикетов требуется провести оптимизацию технологии брикетирования при использовании различного вида сырья и прессов.

Газификация

Газификация угля является одной из самых старых технологий термического разложения угля (от 700°C и выше) с получением горючих газов с высокой теплотворной способностью. Механизм газификации основан на контролируемом взаимодействии угольной фракции с воздухом, кислородом или углекислым газом, а также с комбинацией этих газов. В зависимости от реологии угля и способа газификации газообразные продукты могут включать монооксид углерода, диоксид углерода, водород и метан, разбавленные сероводородом и азотом. В связи с этим промышленная газификация на данный момент направлена на получение двух разновидностей продукции: синтез-газа (монооксид углерода и водород) и синтетического природного газа, состоящего преимущественно из метана.

Газификацию угля по способу осуществления можно классифицировать следующим образом: в неподвижном слое, в подвижном слое, в псевдоожиженном слое и с увлеченным потоком [16]. Данные разновидности газификации относятся к классическим, получившим свое развитие еще в прошлом столетии. Текущую классификацию можно расширить относительно новыми способами, такими как плазменная и лазерная газификация, газификация в сверхкритической воде, химическая петлевая и разделительная газификация. В свою очередь, газификацию можно классифицировать и по месту расположения оборудования на подземную и надземную. Подземная газификация не стала общедоступной ввиду ряда технических и экологических трудностей. Из всех технических трудностей стоит отметить потребность в передовых технологиях и оборудовании для бурения и поддержания (мониторинг и контроль) условий газификации. В качестве экологических трудностей выступают риски, связанные с загрязнением грунтовых вод, и неконтролируемые выбросы газов.

Новейшие исследования в области газификации показывают, что классические способы ее осуществления являются более распространенными в промышленном применении ввиду достаточной изученности технологии. Для коммерческого внедрения более современных разновидностей газификации (плазменная, в сверхкритической воде и др.) необходимы проведение значительных фундаментальных исследований и определение влияния различных технологических факторов (разновидность угля, температура, давление и др.) на эффективность и производительность процесса. Эксперты в данной области утверждают, что применение сверхкритической газификации позволит увеличить выход водорода более 50%. При плазменной газификации достигаются лучшие

показатели конверсии, более низкие выбросы загрязняющих веществ, а выход водорода составляет от 30 до 40% [17].

Ключевое преимущество газификации заключается в минимизации образования загрязняющих веществ и диоксида углерода, которые с легкостью отделяются от получаемого газа. Из всех существующих методов переработки угольных шламов газификация считается более экологичной. Требование к крупности угольной фракции различается в зависимости от подхода к газификации. Для угольных отходов крупностью менее 0,1 мм целесообразно использовать газификатор с увлеченным потоком, способный перерабатывать практически любую разновидность угля при температуре 1400–1600°C. При крупности угольных частиц от 5 мм и менее наиболее эффективно проводить переработку в газификаторах с псевдооживленным слоем при температуре 800–1050°C. В случае крупности угля от 5 до 80 мм применяют газификаторы с подвижным слоем, температура в зоне реакции которых достигает порядка 1500–1800°C. Давление в процессе газификации может подниматься до 4 МПа.

Будущие направления исследований в области газификации могут быть направлены на решение основных недостатков настоящей технологии. Среди данных недостатков особое внимание следует уделить конструкторским, техническим и технологическим проблемам, возникающим на стадиях опытно-конструкторских работ и промышленного использования газификаторов. Немаловажным является и разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности газификации, снижение образования диоксида углерода и золы, а также способов их дальнейшей утилизации. Для повышения эффективности газификации уместно проводить комплексную переработку угольных отходов с биомассой. Авторские исследования [18] демонстрируют повышение эффективности комплексной газификации (угля и древесины) за счет того, что целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин помогают интенсифицировать процесс и повышать скорость газификации. Еще одним положительным эффектом является снижение вредных выбросов.

Учитывая изложенное, стоит отметить, что газификация является эффективным методом переработки угольных отходов с минимальными выбросами загрязняющих веществ в окружающую среду. Правильная постановка технологического процесса позволяет получать полезные продукты из угольных отходов различного качества. Данные продукты (метан и водород) могут быть использованы как калорийное сырье или как продукт для химического синтеза.

Пиролиз

Пиролиз угля, как и газификация, является одной из хорошо известных технологий, первоначально получившей свое применение при получении бездымного топлива (обогащенный уголь) и каменноугольного кокса (для нужд металлургии). В ряде отечественной литературы отмечается, что пиролиз относится к разновидности газификации. В иностранной литературе в меньшей

степени подчеркивается данный факт, отмечая то, что пиролиз является самостоятельным методом переработки органических отходов. Механизм действия пиролиза представляет собой контролируемое термическое разложение угольной фракции под действием высоких температур с выделением газообразных, жидких и твердых продуктов, смол, а также бездымного угля. По температуре деструкции различают низкотемпературный (менее 700°C, чаще всего 450–550°C), среднетемпературный (700–900°C) и высокотемпературный (свыше 900°C) пиролиз. По видам реакции различают сухой (без доступа окислителя) и окислительный пиролиз (с применением окислителя, в основном использование кислорода), каталитический и некаталитический пиролиз [19]. В зависимости от скорости реакции пиролиз может быть медленным и быстрым. Кроме этого, пиролиз можно классифицировать по дополнительно применяемым компонентам в ходе реакции на: инициированный (использование инициаторов), гидропиролизный (в присутствии воды) и термоконтактный (с использованием различных теплоносителей).

Преимущество пиролиза заключается в: возможности переработки обширного ассортимента продукции (угольные отходы, биомасса, нефтяные отходы и др.), получении синтетического твердого биотоплива (биоуголь) из твердых отходов, практически полном отсутствии выбросов вредных газов в атмосферу. С технической точки зрения недостатками пиролиза являются высокие инвестиционные затраты, связанные с тем, что сам процесс является довольно сложным и требует использования специализированного оборудования. Не стоит также забывать, что в процессе пиролиза, как и при газификации, образуется зольный остаток, требующий его вывода из реакционной камеры и дальнейшей утилизации.

Диапазон получаемых веществ в процессе пиролиза является достаточно обширным и зависит от множества факторов (крупности сырья и его разновидности, температуры, давления и др.). В большинстве случаев в литературе упоминается, что крупность фракции угля при пиролизе составляет до 6 мм. Современные исследования показывают, что низкотемпературный пиролиз является более эффективным методом переработки угольной фракции, в том числе в процессе получения биоугля. Основные работы на данный момент направлены на исследование комплексной переработки углей и угольных отходов с иными видами углеводородных продуктов, увеличение выхода газообразных и жидких продуктов, а также получение некоторых углеводородов (например, бензола, толуола и др.) [20, 21]. В недавних исследованиях авторов [22, 23] показано, что при применении микроволнового нагрева допускаются повышение эффективности пиролиза, увеличение выхода каменноугольной смолы и пиролизного газа. В работе отмечается, что в зависимости от разновидности угля отличается и его диэлектрическая проницаемость. Угольную фракцию с низкой проницаемостью следует перемешивать с абсорбентами с высоким коэффициентом диэлектрических потерь (оксиды металлов, карбид кремния и др.).

Пиролиз является перспективным направлением переработки угольных отходов и любых других отходов органического происхождения. В процессе переработки угольной фракции получают ценные продукты для химической промышленности с минимальным образованием углеродного следа. Хотя пиролиз в последние годы и привлек к себе всеобщее внимание, тем не менее существует ряд ключевых проблем данного метода. Заявленные проблемы заключаются в плохом описании кинетики и механизма деструкции из-за большого различия в качественно-количественных характеристиках исходного сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате определения современного состояния и перспектив развития технологий переработки угольных отходов было установлено, что наиболее востребованными на данный момент методами являются гравитационная сепарация, пенная флотация, масляная агломерация, брикетирование, газификация и низкотемпературный пиролиз. С целью определения возможности применения конкретного метода для переработки угольных отходов использовался показатель крупности угля. Необходимо понимать, что помимо крупности существуют и другие показатели качества угля, такие как влажность, выход летучих веществ и другие. Эти показатели могут служить маркерами для принятия решения при выборе технологии переработки.

При анализе результатов можно сделать вывод о том, что гравитационная сепарация и флотация могут быть использованы в качестве методов обогащения угольной фракции и получения товарной продукции и в качестве методов подготовки угольных отходов для дальнейших преобразований. Крупность угля для эффективного проведения гравитационной сепарации находится в диапазоне 0,15–3 мм. Этот же показатель для пенной флотации составляет до 0,5 мм включительно. Для дальнейшего совершенствования данных технологий рекомендуется следующее: провести исследования по определению эффективности методов при их совместном использовании, оптимизировать технологические режимы работы пенной флотации при переработке угольных отходов.

С помощью масляной агломерации и брикетирования можно получить высококалорийные продукты в виде углемаляного концентрата и брикетов. Эти продукты находят применение в качестве топлива или как сырье для производства многокомпонентных видов топлива (продукты агломерации) и в процессе полукоксования (продукты брикетирования). Технология масляной агломерации также хорошо сочетается с процессом обогащения высокозольных продуктов, получаемых при газификации или пиролизе органических отходов. Высокая селективность масляной агломерации достигается при крупности частиц угля менее 100 мкм. Предельной крупностью угля для брикетирования является значение 6 мм (в некоторых случаях до 10 мм). Для повышения эффективности масляной агломерации является актуальным провести исследования в области подбора приемлемых связующих

компонентов (масел). В случае брикетирования исследования должны быть направлены на апробацию различных типов сырья и прессов.

Газификация и пиролиз являются универсальными методами переработки не только угольных отходов, но и многих отходов органического происхождения. Основными продуктами настоящих технологий при переработке угольных отходов являются синтез-газ и синтетический природный газ (в случае газификации), а также смесь газообразных продуктов и биоуголь (в случае пиролиза). Обширный перечень получаемых продуктов может найти применение в различных отраслях промышленности. В зависимости от подхода к газификации крупность угля составляет от 0,1 до 80 мм. При пиролизе крупность угля в большинстве случаев составляет до 6 мм. Для улучшения технологии газификации является целесообразным провести исследования и сравнение различных способов нагрева исходного сырья (с использованием плазмы, лазера и др.), анализ конструкторских решений и оценку эффективности газификации при комбинации различных органических веществ. С целью улучшения технологии пиролиза следует уделить внимание кинетике и механизмам деструкции веществ различного качества, в том числе при их совокупной переработке.

Результаты проведенных исследований будут полезны специалистам, занимающимся переработкой угля и угольных отходов, а также специалистам в области утилизации твердых углеводородных отходов. Рассмотренные технологии также способны быть эффективным инструментом при производстве биотопливных композиций из твердых отходов органического происхождения.

Список литературы • References

1. Podoprigrora D.G., Sabukevich V.S., Korobov G.Y., Nguen V.T. Justification of Developed System Measures to Increase Productivity of Wells in Eastern Part of Pechora Sea Oil Field. *International Journal of Engineering*. 2024;37(11):2303-2313. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.15.
2. Shishkin P.V., Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efrementkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Mathematical Logic Model for Analysing the Controllability of Mining Equipment. *Mathematics*. 2024;(12):1660. DOI: 10.3390/math12111660.
3. Tananykhin D., Grigorev M., Korolev M., Solovyev T., Mikhailov N., Nesterov M. Experimental Evaluation of the Multiphase Flow Effect on Sand Production Process: Prepack Sand Retention Testing Results. *Energies*. 2022;(15):4657. DOI: 10.3390/en15134657.
4. Phengsaart T., Srichonphaisan P., Kertbundit C. et al. Conventional and recent advances in gravity separation technologies for coal cleaning: A systematic and critical review. *Heliyon*. 2023;9(2). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13083.
5. Podoprigrora D.G., Byazrov R.R., Lagutina M.A., Arabov D.V., Galimov V.V., Ermolin D.S. A novel integrated methodology for screening, assessment and ranking of promising oilfields for polymer floods. *Advances in Geo-Energy Research*. 2024;12(1):8-21. <https://doi.org/10.46690/ager.2024.04.02>.
6. Zhang C., Lu S. Study on the separation mechanism of coal and gangue particles during coal slime classification in a hydrocyclone. *Powder Technology*. 2023;(424). DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118566.

7. Tynchenko Y.A., Kukartsev V.V., Gladkov A.A., Panfilova T.A. Assessment of technical water quality in mining based on machine learning methods. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1) 56-69. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-56-69.8.
8. Kumar D. Sustainable Management of Coal Preparation. Woodhead Publishing, 2018, 454 p. DOI: 10.1016/C2016-0-01854-5.
9. Tananykhin D., Palyanitsina A., Rahman A. Analysis of Production Logging and Well Testing Data to Improve the Development System for Reservoirs with Complex Geological Structure. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2020; (7):629-648.
10. Özer M., Basha O.M., Morsi B. Coal-Agglomeration Processes: A Review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2017;37(2):131-167. DOI: 10.1080/19392699.2016.1142443.
11. Chakladar S., Mohanty A.K., Chakravarty S. Clean Coal Technologies. Oil Agglomeration Towards Quality Enhancement of High-Ash Coals: The Indian Scenario. Springer, Cham, 2021, pp. 71-82. DOI: 10.1007/978-3-030-68502-7-4.
12. Результаты исследований процесса масляной грануляции с применением масляных агентов коксохимического производства / В.И. Мурко, А.Н. Заостровский, Е.А. Глобина и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 5. С. 73-80. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-73-80. Murko V.I., Zaoostrovskij A.N., Globina E.A., Bobrovnikov N.S., Kulakovskij A.S. The results of studies of the oil granulation process using oil agents of coke chemical production. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023;(5):73-80. (In Russ.).DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-73-80.
13. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;(82):477-487. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.072.
14. Alsaqoor S., Borowski G., Alahmer A. et al. Using of Adhesives and Binders for Agglomeration of Particle Waste Resources. *Advances in Science and Technology – Research Journal*. 2022;16(3):124-135. DOI: 10.12913/22998624/149456.
15. Malyukova L.S., Martyshev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V. Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023;(15):11671. DOI: 10.3390/su151511671.
16. Mahapatra P.M., Aech S., Panda A.K. Energy Generation from Coal and Conversion Technologies. *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment*. 2024;(1):79-90. DOI: 10.1016/B978-0-323-93940-9.00045-1.
17. Dai F., Zhang S., Luo Y. et al. Recent Progress on Hydrogen-Rich Syngas Production from Coal Gasification. *Processes*. 2023;11(6). DOI: 10.3390/pr11061765.
18. Co-gasification of coal and biomass an emerging clean energy technology: Status and prospects of development in Indian context / A.D. Kamble, V.K. Saxena, P.D. Chavan et al. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019;29(2):171-186. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.03.011.
19. Al-Sharo Y.M., Al Smadi K., Al Smadi T., Yasameen Kamil N. Optimization of Stable Energy PV Systems Using the Internet of Things (IoT). *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 2024;31(1):127-137. DOI: 10.25130/tjes.31.1.11.
20. Bosikov I.I., Martyshev N.V., Klyuev R.V., Savchenko I.A., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Tynchenko Y.A. Modeling and Complex Analysis of the Topology Parameters of Ventilation Networks When Ensuring Fire Safety While Developing Coal and Gas Deposits. *Fire*. 2023;(6):95. DOI: 10.3390/fire6030095.
21. Klyuev R.V., Martyshev N.V., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Brigida V. Analysis of geological information toward sustainable performance of geotechnical systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(5):144–157. DOI: 10.25018/0236-1493-2024-5-0-144.
22. Panfilova T.A., Kukartsev V.A., Tynchenko V.S., Mikhalev A.S., Wu X. Treatment of wastewater from 2mining industrial enterprises from phenols. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(7-1): 72-82. DOI: 10.25018/0236-1493-2024-71-0-72.
23. Larichev P., Tynchenko V., Nekrasov I. Application of Petri Nets for Modeling Ore Flows to Create Dynamic Management and Quality Control System in Mineral Resource Complexes. Proceedings – 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2024. 2024. pp. 1089-1094. DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553668.

Authors Information

Kolenchukov O.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Technological Machines and Equipment for the Oil and Gas Complex, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru

Mikhailov A.Yu. – Junior Researcher, Laboratory of Biofuel Compositions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: amikhaylov@sfu-kras.ru

Bukhtoyarov V.V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Biofuel Compositions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: vbukhtoyarov@sfu-kras.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.01.2025

Поступила после рецензирования: 16.04.2025

Принята к публикации: 26.04.2025

Paper info

Received January 29, 2025

Reviewed April 16, 2025

Accepted April 26, 2025