
СВОБОДНАЯ ТРИБУНА

УДК 662.749.2, 662.749.31, 662.749.39

DOI: 10.15372/KhUR2022385

EDN: SCRBER

Развитие способов получения ароматического сырья для производства углеродных материалов различного назначения

П. Н. КУЗНЕЦОВ¹, З. Р. ИСМАГИЛОВ², В. И. КУЗЬМИН¹

¹Институт химии и химической технологии СО РАН,
Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр СО РАН”,
Красноярск (Россия)

E-mail: kpn@icct.ru

²Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
Кемерово (Россия)

(Поступила 14.01.22; после доработки 27.02.22)

Аннотация

Современные производства многих важных углеродных материалов основаны на использовании в качестве сырья ароматических фракций каменноугольной смолы – побочного продукта при производстве металлургического кокса для нужд черной металлургии. Инновации по снижению расхода металлургического кокса в доменной технологии и приоритетное развитие бескоксковых способов получения стали приводят к сокращению выпуска коксохимических продуктов, что подрывает перспективы развития производства важнейших углеродных материалов, в том числе необходимых для черной и цветной металлургии. Обоснована актуальность создания альтернативных способов получения ароматического сырья. Отмечена перспективность низкотемпературной переработки углей путем их термосольволизного растворения с получением концентратов ароматических веществ. Показана возможность их использования в качестве сырья для получения углеродных анодов для процесса электролиза алюминия.

Ключевые слова: углеродные материалы, каменноугольная смола, ароматические вещества, растворение угля

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия широкое распространение в технике получают углеродные и композиционные материалы. При получении многих из них в качестве сырья используют ароматические соединения, являющиеся строительными блоками при формировании химической структуры материалов. Потребности в производных моноциклических ароматических соединений обеспечиваются преимущественно нефтепро-

дуктами, получаемыми в процессах риформинга, каталитического крекинга и пиролиза углеводородных фракций, а в би- и полициклических – компонентами каменноугольной смолы.

Каменноугольная смола является побочным продуктом высокотемпературного коксования углей для получения целевого продукта – металлургического кокса. Последний используется при выплавке чугуна по традиционной доменной технологии, на которой, как и столетия назад, базируется во всем мире основное производство

стали (более 65 %). Каменноугольная смола содержит сложную смесь преимущественно моно- и полициклических ароматических углеводородов, а также гетероциклических соединений [1]. На заводах коксования выход смолы не превышает 5,0 %. Несмотря на низкий выход, смола является важным, в ряде случаев незаменимым источником получения ценных химических веществ, фармацевтических препаратов, физиологически активных веществ, красителей и ароматизаторов, ядохимикатов, взрывчатых веществ, пластмасс, красителей, фенолформальдегидных смол, поликарбонатов, полистирола, стирольных каучуков, технического углерода, углеродных волокон, гидроизоляционных и других материалов.

Нелетучая фракция каменноугольной смолы – пек (выход около 2 % в расчете на шихту коксования) представляет концентрат поликонденсированных ароматических углеводородов и гетероциклических соединений. Благоприятное сочетание высокой коксующей способности каменноугольного пека и низкой вязкости в расплавленном состоянии во многом обеспечивает высокий уровень физико-механических свойств производимых с его применением углеродных изделий: полупроводниковых материалов и интегральных микросхем, электродов, различных электротехнических изделий, конструкционных и кровельных материалов, доменных огнеупоров, материалов для химических аппаратов, электрохимии, машиностроения, для автомобильной и авиационной техники, различных графитированных углеродных материалов для ракетной, космической и атомной техники.

В России основное количество каменноугольного пека используется в качестве связующего при приготовлении углеродных анодов для крупномасштабного электролизного производства алюминия, различных углеродистых композиционных конструкционных материалов. В черной металлургии пек незаменим в качестве связующего при приготовлении графитированных электродов для выплавки высококачественных сталей в электродуговых печах, при производстве огнеупоров, футеровки сталеплавильных конвертеров, леточной массы для доменных печей, других изделий. В атомной промышленности он используется при изготовлении графитовых стержней, углеграфитовых конструкционных материалов повышенной стойкости.

Таким образом, коксохимическая смола, каменноугольный пек являются основой для получения важнейших углеродных материалов для различных отраслей промышленности. При этом объем производимой смолы и ее качество

определяются условиями производства целевого продукта – металлургического кокса. В последнее время в России происходит постепенное уменьшение выпуска каменноугольной смолы, в том числе пека. В то же время быстро растут потребности для получения углеродных материалов для различных отраслей промышленности, что в значительной степени покрывается импортом.

За рубежом некоторые углеродные материалы получают с использованием пека на основе ароматических остатков от переработки нефти. Например, при приготовлении углеродных анодов в качестве связующего применяют нефтяной пек [2]. В России ведутся исследовательские и технологические разработки по получению нефтяных пеков [3, 4], но промышленное производство отсутствует. В определенной степени это связано с тем, что для приготовления качественного нефтяного пека необходимы низкосернистые остатки, ресурсы которых в России ограничены. Надо отметить, что, как правило, качество изделий, получаемых с использованием нефтяных связующих уступает качеству изделий с каменноугольным связующим. Поэтому ведется разработка компаундных пеков на основе нефтяного и каменноугольного сырья [5].

Здесь важно также заметить, что как каменноугольные смолы, так и тяжелые ароматические нефтяные фракции являются побочными остаточными продуктами соответствующих процессов, что ставит в неизбежную зависимость от характеристик этих процессов качество и выход получаемых из них пеков. Для успешного развития отечественных отраслей цветной и черной металлургии, производства углеродных и композиционных материалов различного назначения необходимо надежное обеспечение этих отраслей качественным сырьем.

В настоящей работе проведен анализ основных тенденций развития процессов черной металлургии (как производителя каменноугольной смолы и пека) и металлургии алюминия (как одного из основных потребителей каменноугольного пека), рассмотрены перспективные альтернативные способы получения ароматического сырья из угля с целью надежного обеспечения производства углеродных и композиционных материалов различного назначения.

ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЯ

Алюминий – один из самых востребованных металлов, его мировое производство и потреб-

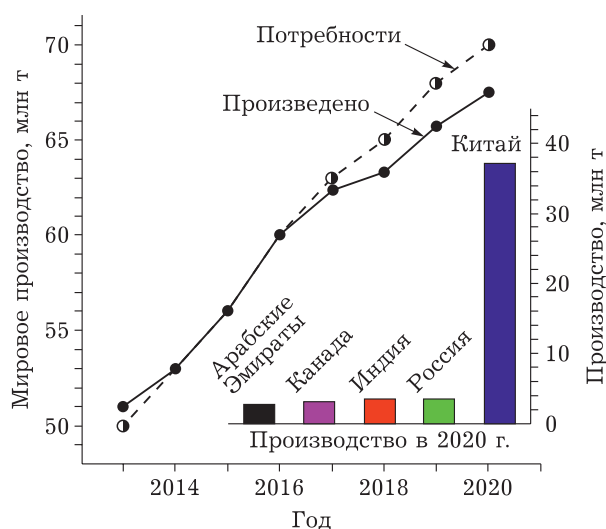


Рис. 1. Динамика мирового производства и потребления алюминия (на вставке: производство в основных странах-производителях в 2020 г.) [6, 7].

ление быстро развиваются (рис. 1) [6, 7]. На долю Китая приходится 45–55 % мирового производства. Россия занимает второе место после Китая (6.2 % от мирового), при этом является лидером по объему экспорта (80 % произведенного алюминия экспортируется и только 20 % остается на внутреннем рынке). Алюминий широко используется в самых различных отраслях: транспортной технике, строительстве, энергетике, приборостроении, космической технике, изготовлении различных упаковочных материалов.

Технология получения алюминия основана на электролизе раствора глинозема в расплаве криолита. В алюминиевых электролизерах углеродный блок катода, покрытый расплавленным алюминием, не расходуется при электролизе и работает несколько лет. Углеродный блок анода расходуется (свыше 400 кг анода в расчете на 1 т полученного алюминия) и требует замены на свежий через каждые 20–25 дней [8]. Аноды работают в очень жестких условиях, они должны иметь высокую электропроводность и механическую прочность, обладать химической устойчивостью в очень агрессивной среде при высокой температуре (около 1000 °C), к действию кислорода, диоксида углерода, содержать минимальное количество минеральных примесей, а также иметь невысокую стоимость. При их приготовлении используют каменноугольный (или нефтяной) пек в качестве связующего и нефтяной кокс в качестве наполнителя. Хотя доля связующего невелика

(около 30 мас. %), от его качества, определяемого целым рядом технических показателей, в большой степени зависит эффективность работы анода и его расход. В России аноды готовят с использованием каменноугольного связующего пека. Алюминиевые заводы, входящие в структуру Объединенной компании «РУСАЛ», потребляют основную часть всего производимого в России каменноугольного пека (более 70 %), что обеспечивает только половину потребности. Недостающее количество покрывается экспортными поставками из Китая, Казахстана, Украины, других производителей.

Электролиз алюминия – энергоемкое производство, оказывающее вредное воздействие на окружающую среду [9, 10]. В частности, процесс электролиза сопровождается выделением тетрафторида углерода, фтороводорода, полициклических ароматических углеводородов и диоксида углерода (пороговый выброс 4.5 т CO₂ в расчете на 1 кг полученного Al) [11]. Основные направления экологической стратегии развития электролизного производства включают увеличение количества линий с предварительно обожженными углеродными анодами, создание электролизеров с инертными анодами, в том числе на основе металлических сплавов и металлокерамики, а также электролиз хлорида алюминия [8, 12]. К настоящему времени, судя по опубликованным данным, реальные возможности замены традиционного способа электролиза алюминия в среднесрочной перспективе еще не определены.

Можно сделать следующие выводы из анализа состояния и развития производства алюминия:

- электролизное производство динамично развивается в связи с растущим спросом и расширением областей применения алюминия, что требует все большего количества пека для получения углеродных материалов, в первую очередь анодов;
- наметились дефицит и ухудшение качества каменноугольного пека, в России значительная часть пека импортируется;
- основные направления развития электролиза алюминия связаны с уменьшением расхода углеродных анодов, включая замену самообжигающихся анодов Содеберга на предварительно обожженные, а также с созданием альтернативного инертного анода;
- в среднесрочной перспективе традиционная технология электролиза алюминия с углеродным анодом останется доминирующей.

ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ

Мировое производство стали динамично развивается (рис. 2). В последние годы около половины произведенной стали приходится на Китай, а Российская Федерация занимает четвертое-пятое место по его производству [13, 14]. Основное количество стали (около 60 %) потребляется на внутреннем рынке России, около 40 % поставляется на экспорт.

Существует четыре основных способа получения стали [15, 16]: а) восстановительная плавка железной руды в доменной печи с последующей обработкой чугуна в кислородном конвертере для выжигания углерода; б) восстановительное плавление в ванне-газификаторе с последующей обработкой в кислородном конвертере; в) прямое восстановление руды с получением губчатого железа с последующей плавкой в электродуговой печи с углеродными электродами; г) плавка металлолома в электродуговой печи.

Традиционные технологии

Основное количество стали получают из доменного чугуна (более 65 %) и из металлолома в электродуговых печах [16]. Используемый при доменной плавке чугуна металлургический кокс незаменим, так как выполняет несколько ответственных технологических функций. Перспективы развития данной технологии сталкиваются с двумя основными проблемами, а именно: с ограниченными ресурсами качественных коксующихся углей и с ужесточением требований к экологической безопасности металлургических

производств, включая сокращение вредных выбросов и минимизацию воздействия на изменение климата [14]. При выплавке каждой тонны чугуна выбрасывается 1.8 т парникового газа – CO_2 . Кроме того, велики расходы на производство металлургического кокса (не менее половины всех расходов на общее производство металла), что связано с высокой стоимостью угольного сырья для коксования и сложностью технологии коксования. Производство стали из металлолома в электродуговых печах не требует металлургического кокса. Однако для изготовления углеродистых электродов необходим каменноугольный пек в качестве связующего и высококачественный игольчатый кокс, который в России не производится, а поступает по импорту.

Приоритетные направления развития мировой и отечественной черной металлургии включают [15–17]:

- радикальное снижение расхода металлургического кокса за счет повышения его качества и вдувания в домну углеродных добавок;
- развитие способов выплавки стали без применения металлургического кокса, включая способ электродуговой плавки;
- уменьшение экологической опасности металлургических производств, в том числе по выбросам диоксида углерода.

Для сокращения удельного расхода дорогостоящего кокса в 1960-х годах стали применять вдувание в домну мазута, а с середины 1980-х – пылевидного угля, пластиковых отходов, природного газа, а также собственных горючих газов коксования (рис. 3). Вдувание пылевидного угля признано наиболее эффективным способом

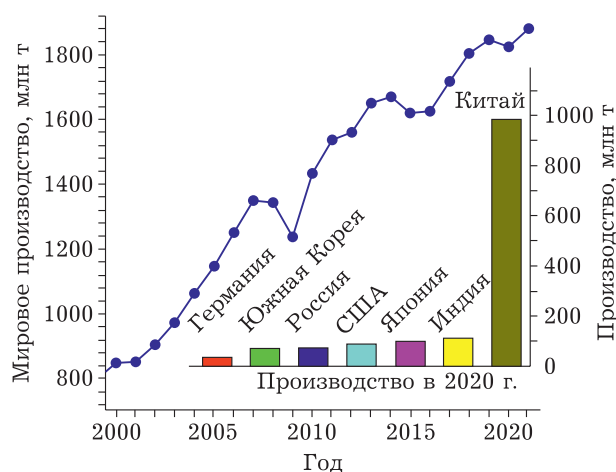


Рис. 2. Динамика мирового производства стали [13, 14].

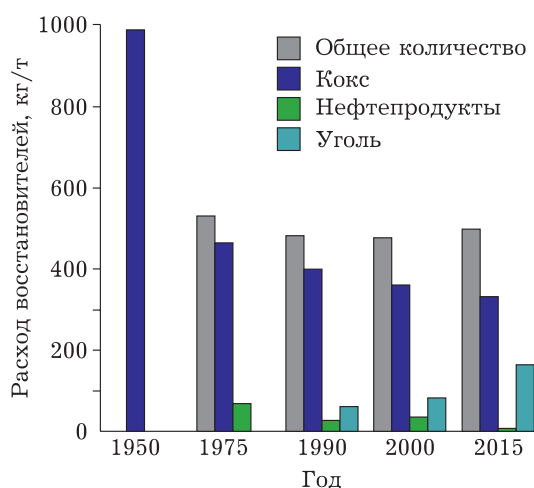


Рис. 3. Динамика расхода металлургического кокса и добавок других восстановителей при производстве чугуна на примере доменных печей Германии [15].

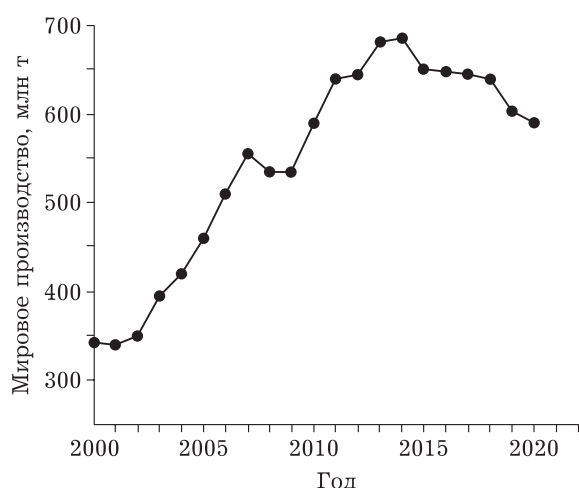


Рис. 4. Динамика мирового производства металлургического кокса [18].

уменьшения зависимости доменной технологии от дорогостоящего кокса.

Реализованные в черной металлургии инновации уже привели к тому, что с 2014 г. наблюдается устойчивая тенденция снижения мирового производства кокса (рис. 4) и, как следствие, побочного продукта – коксохимической смолы (табл. 1) [18, 19]. В то же время существует возрастающий спрос на коксохимическую смолу со стороны производителей различных углеродных материалов. В отличие от общей тенденции, в Китае пока не отмечено снижения выпуска кокса и коксохимических продуктов [20]. Последние годы на долю Китая приходится около 70 % мирового производства кокса.

Следует подчеркнуть, что все факторы работы печей коксования подчинены решению главной задачи – получению металлургического кокса с требуемыми свойствами. Коксохимическое отделение по переработке побочной смолы не отвечает этой задаче, является обособленным, непрофильным сектором. В последнее время получает распространение технология коксования без улавливания побочных химических продук-

тов и их переработки [15, 21]. Дополнительная мотивация отказа металлургов от химических производств связана с усилением требований к экологической безопасности предприятий. При коксовании без улавливания химических продуктов (БУХПК) образующаяся парогазовая смесь направляется на сжигание под подом печи. Это значительно снижает энергетические затраты на коксование, практически исключает экологически опасные жидкие стоки, резко снижает выбросы канцерогенных веществ и бензольных углеводородов при загрузке шихты и выгрузке кокса. Печи БУХПК позволяют увеличить содержание в шихте коксования доступных каменных углей с повышенным выходом летучих веществ. В настоящее время различные модификации печей БУХПК функционируют в Китае, Индии, Австралии, Бразилии, Колумбии и США. В России внедрение печей БУХПК намечено на предприятия «Алтай-Кокс» Группы НЛМК.

Альтернативные технологии

В последние годы за рубежом получают приоритетное развитие технологии производства стали без использования металлургического кокса. Наиболее распространены два способа, которые основаны [16] на:

- восстановительном плавлении руд (smelting reduction, SR);
- прямом твердофазном восстановлении руд (direct reduction, DR).

Среди процессов SR наиболее развиты двухстадийные схемы, реализованные на установках COREX и FINEX. В технологии COREX железная руда, предварительно восстановленная в шахтной печи восстановительными газами, подвергается плавлению на второй стадии в реакторе-газификаторе, где в среде расплавленного металла осуществляется газификация угля кислородом. В газификаторе получают жидкий чугун, а образующиеся восстановительные газы возвращаются в шахтную печь для восстановления руды. На установках FINEX предварительное восстановление руды осуществляют в аппарате с псевдоожиженным слоем. В России в Московском институте стали и сплавов предложен одностадийный процесс SR (процесс Ромелт), который проводят в барботируемой ванне, где происходит восстановление руды, науглероживание и плавление чугуна.

Первая коммерческая установка FINEX производительностью 1,5 млн т чугуна в год была запущена в 2007 г. на одном из заводов крупней-

ТАБЛИЦА 1

Производство металлургического кокса и смолы в основных странах-производителях в 2014 и 2019 гг. (млн т) [19]

Страна	Кокс		Смола	
	2014 г.	2019 г.	2014 г.	2019 г.
Россия	28 908	26 670	1218	1143
Китай	420 000	471 260	16 800	18 850
Япония	37 500	35 433	1500	1417
Украина	13 000	9500	520	380
США	14 400	12 214	576	489

шей металлургической компании Южной Кореи Posco. В настоящее время несколько коммерческих установок COREX функционируют в Корее, Индии (JSW и Essar Steel), Китае (Bao Steel) и Южной Африке (Arcelor Mittal).

Процессы на основе DR включают прямое восстановление руды (природным газом, измельченным углем, а также водородом) при температуре ниже температуры плавления. Получают губчатое железо, которое направляют в электродуговую печь. Первая промышленная установка была построена за рубежом в конце 1960-х годов. В 2013 г. процессы на основе DR обеспечивали около 5 % мирового производства стали.

Важным достоинством недоменных способов производства стали является то, что они осуществляются без применения металлургического кокса, вместо него можно использовать рядовые угли (от антрацита до бурого угля). Кроме того, они позволяют повысить качество производимой стали и резко уменьшить вредные выбросы, включая выбросы канцерогенных веществ и парниковых газов.

В целом, основные результаты анализа состояния и тенденций развития процессов производства стали можно резюмировать следующим образом:

- производство стали динамично развивается, объемы производства увеличиваются и имеют тенденцию к дальнейшему росту в связи с растущим спросом на сталь, расширением областей применения;
- в доменной технологии наметилось направление развития коксового производства без улавливания побочных продуктов коксования и их переработки;
- стратегия развития производства стали включает приоритетное внедрение недоменных способов;
- масштабный переход на недоменные технологии может привести к резкому спаду производства кокса и, соответственно, каменноугольной смолы и пека, что подрывает перспективы развития как самой сталеплавильной отрасли, так и алюминиевой отрасли и производства важных углеродных материалов.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ АРОМАТИЧЕСКОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время металлургические процессы выплавки стали и алюминия и получение углеродных материалов составляют сложный

клубок взаимозависимых производств с разнонаправленными тенденциями. Инновации в черной металлургии приводят к постепенному уменьшению потребности в металлургическом коксе и, как следствие, к спаду коксохимического производства. Вместе с тем, потребности в химических продуктах коксового производства – смоле и пеке, требования к их качеству непрерывно возрастают для получения углеродных и композиционных материалов для многих отраслей промышленности, в том числе для базовых отраслей черной и цветной металлургии. Актуальность проблемы связана также с тем, что каменноугольные смолы и, особенно, пеки содержат повышенные концентрации вредных веществ с канцерогенной активностью. В совокупности эти факторы выдвигают актуальную задачу разработки альтернативных способов получения заменителей коксохимических ароматических продуктов с меньшим содержанием канцерогенных веществ.

Уголь служит универсальным источником получения различных химических веществ. В составе его органической массы изначально присутствуют ароматические вещества в виде фрагментов молекул, олигомеров и мультимеров, связанных друг с другом как невалентными взаимодействиями, так и ковалентными сшивками [22]. Перспективным способом их извлечения является обработка угля растворителями при невысокой температуре с целью частичной деполимеризации и перевода органической массы в растворимое состояние с последующим отделением минеральных золаобразующих компонентов. За последние годы этой теме было посвящено большое количество работ, опубликован ряд обзорных статей [23–27]. Наиболее активно исследования в этом направлении ведутся в Японии, Китае, США, других странах. В частности, в Японии компаниями Kobe Steel, Ltd. (KOBELCO) и Mitsubishi Chemical Co. [23–25] разрабатывается низкотемпературный процесс сольвентной переработки углей. Произведенный продукт, получивший название HyperCoal, представляет твердый уголь, в котором концентрация минеральных веществ не превышает 0.02 мас. %. Он содержит в основном поликонденсированные ароматические вещества, обладает хорошими пластичными и спекающими свойствами. Показана возможность его многоцелевого использования, в том числе в качестве эффективного энергоносителя для прямого сжигания в газовых турбинах, для получения различных углеродных материалов, высокока-

чественного кокса, в качестве добавки в шихту коксования. В США одна из разрабатываемых технологий предназначена для целевого получения продукта, пригодного в качестве связующего при производстве анодов, других углеродных и композиционных материалов [28].

В Институте химии и химической технологии СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН) совместно с Федеральным исследовательским центром угля и углехимии СО РАН, Сибирским федеральным университетом и Институтом химии и химической технологии Академии наук Монголии проводятся исследования, направленные на создание научных основ термосольволизного превращения углей с целью получения ароматических веществ как альтернативных источников для производства углеродных материалов различного назначения. В результате выполненных исследований установлены основные закономерности изменения показателей превращения углей в растворимые вещества в зависимости от их химических и технологических свойств, свойств применяемых растворителей угольного или нефтяного происхождения и условий осуществления процесса [29–32]. На большом числе образцов углей разных месторождений выявлены экстремальные зависимости показателей процесса от таких классификационных химико-технологических свойств углей, как содержание углерода, выход летучих веществ, коэффициент отражения витринита, термическая устойчивость, а также от показателей молекулярного строения – доли ароматических атомов водорода и углерода по отношению к сумме соответствующих ароматических и алифатических атомов, которые определялись по ИК-спектрам аналогично [33]. По результатам корреляцион-

ного анализа полученных данных выработаны критерии выбора угольного сырья для обеспечения максимального выхода целевых продуктов. Установлено, что для получения ароматических веществ с выходом до 80 % и более (против 5 % в случае коксования) наиболее пригодны каменные угли средней стадии метаморфизма, химико-технологические показатели которых соответствуют приведенным в табл. 2.

В оптимизированных условиях превращение углей в среде жидкофазного растворителя протекает при сравнительно низкой температуре 350–380 °С, давлении не более 3.5 МПа без применения водорода и катализаторов. Жидкофазный процесс характеризуется высокой селективностью в образовании растворимых ароматических веществ, выход газообразных продуктов не превышает 0.5 %. Получаемый экстрактивный продукт представляет при комнатной температуре твердое вещество с пластичными свойствами с температурой размягчения от 76 до 96 °С. Его химический состав, как и состав каменноугольной смолы, представлен преимущественно полиароматическими веществами с разной степенью конденсации ароматических колец (3–5 ароматических колец в конденсированном ядре средней молекулы).

Путем отгонки из экстракта дистиллятных фракций были получены образцы альтернативных пеков, их свойства сопоставлены со свойствами промышленных пеков, включая типичный каменноугольный пек производства предприятия “Запорожжкокс”, комбинированный нефтекаменноугольный пек производства компании Rütgers, а также образец нефтяного пека, полученного в лабораторных условиях путем атмосферной дистилляции тяжелого газойля каталитического крекинга. Было показано [29–31], что по химическому и групповому составу экстрактивные образцы пеков приближаются к каменноугольному пеку, а по техническим показателям – к нефтекаменноугольному (табл. 3). Концентрация бенз(а)пирена в экстрактивных пеках, в зависимости от используемого растворителя, составляет от 1.2 до 5.4 мг/г, против 11.5 мг/г для каменноугольного пека.

В Инженерно-технологическом центре компании “РУСАЛ” были проведены специальные эксперименты с целью определения пригодности полученных экстрактивных пеков для приготовления анодов для электролиза алюминия. Была наработана укрупненная лабораторная партия экстрактивного пекового связующего, по стандартной методике приготовлена коксо-

ТАБЛИЦА 2

Химико-технологические показатели углей, предпочтительных для получения растворимых ароматических продуктов

Показатель	Оптимальное значение
Содержание углерода, C^{daf} , мас. %	83–86*
Выход летучих веществ, V^{daf} , мас. %	35–39*
Содержание витринита, %	>70*
Коэффициент отражения витринита, $R_{o,r}$, %	0.80–0.90*
Температура пиролиза, °С	465–475*
Толщина пластического слоя, мм	17–25*
Ароматичность водорода, %	0.29–0.32
Ароматичность углерода, %	0.72–0.74

* Данные [30].

ТАБЛИЦА 3

Сравнительная характеристика свойств экстрактивных и промышленных пеков

Пек	f_{ar}	α , % (ISO 6376)	α_1 , % (ISO 6791)	$T_{разм}$, °C	БаП, мг/г
Экстрактивный	0.92	37.5–40.4	2.3–7.8	105–115	1.2–5.4
Каменноугольный	0.91	35.1	10.5	88	11.5
Нефтяной	0.84	28.6	0.4	89	2.4
Нефтекаменноугольный	0.87	24.0	4.4	103	5.4

Примечание: f_{ar} – ароматичность по Брауну–Лэднеру [33] для хлороформ-растворимой фракции; α – толуол-нерастворимые; α_1 – хинолин-нерастворимые; $T_{разм}$ – температура размягчения (кольцо и шар); БаП – бенз(а)пирен.

пековая композиция (28 % связующего и 72 % прокаленного нефтяного кокса). Приготовленную анодную массу подвергли обжигу по стандартной методике, принятой для приготовления обожженных анодов с конечной изотермической выдержкой при 960 °C. Было установлено [34], что по основным показателям (удельное электросопротивление, общая пористость, механическая прочность на сжатие, реакционная способность по отношению к воздуху, разрушаемость под действием CO₂) лабораторный образец анода, приготовленный с альтернативным связующим, соответствовал требованиям ТУ 48-5-80-86, предъявляемым к анодам.

Следует отметить, что получаемые экстрактивные вещества с учетом их состава и свойств могут служить источниками многоцелевого использования: для приготовления графитизированных материалов, в том числе электродов для электродугового производства стали, катодных блоков, углеволоконных композитов, конструкционных материалов, леточной массы, в качестве добавки к каменноугольной шихте коксования, других ценных углеродных материалов, которые в настоящее время производят из смолы коксования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные производства многих важных углеродных материалов основаны на использовании в качестве сырья ароматических фракций каменноугольной смолы – побочного продукта при производстве металлургического кокса для нужд черной металлургии. Инновации по снижению расхода металлургического кокса в доменной технологии и приоритетное развитие бескоксовых способов получения стали приводят к сокращению выпуска коксохимических продуктов, что подрывает перспективы развития про-

изводства важнейших углеродных материалов, в том числе необходимых для черной и цветной металлургии. Обоснована актуальность создания альтернативных способов получения ароматического сырья. Отмечена перспективность низкотемпературной переработки углей путем их термосольволизного растворения с получением концентратов ароматических веществ. Показана возможность их использования в качестве сырья для получения углеродных анодов для процесса электролиза алюминия.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН (проект № АААА-А17-117021310220-0) при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-53-44001) и в Институте химии и химической технологии Академии наук Монголии при финансовой поддержке фонда науки и технологии Монголии (грант № -ШУГХ/ОХУ/-2019/13).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Granda M., Blanco C., Alvarez P., Patrick J. W., Menendez R. Chemicals from coal coking // Chem. Rev. 2014. Vol. 114, No. 3. P. 1608–1636.
- 2 Pérez M., Granda M., Santamaría R., Viña J. A., Menéndes R. Formulation, structure and properties of carbon anodes from coal tar pitch/petroleum pitch blends // Light Metals. 2003. P. 495–502.
- 3 Хайрутдинов И. Р., Ахметов М. М., Теляшев Э. Г. Состояние и перспективы развития производства кокса и пека из нефтяного пека // Рос. хим. журн. 2006. № 1. С. 25–28.
- 4 Смакова У. М., Федосеева М. В., Будник В. А. Структура и виды нефтяных пеков. Перспективы производства пеков // Нефтепереработка и нефтехимия. 2019. № 1. С. 19–22.
- 5 Андрейков Е. И. Сырье для углеродных материалов на базе продуктов коксохимии и термического растворения углей // Химия уст. разв. 2016. Т. 24, № 3. С. 317–323.
- 6 U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020 [Electronic resource]. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-aluminum.pdf> (дата обращения: 17.01.2022).
- 7 International Aluminium Institute [Electronic resource]. URL: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/> (дата обращения: 17.01.2022).

- 8 Wu X. Inert Anodes for Aluminum Electrolysis. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer Nature, 2021. 183 p.
- 9 Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development // *Light Metals*. 2019. P. 553–563.
- 10 Kovacs V., Kiss L. Comparative analysis of the environmental impacts of aluminum smelting technologies // *in: Light Metals*. 2015. P. 529–534.
- 11 Блоксом Н. Пришло время единой маркировки продукции с “низким углеродным следом в первичном алюминии” // *Aluminium International Today*. Russian Language Issue 2020 [Electronic resource]. URL: <https://aluminiumtoday.com/issues/russian-language-issue> (дата обращения: 17.01.2022).
- 12 Solheim A. Inert anodes – the blind alley to environmental friendliness? // *Light Metals*. 2018. P. 1253–1260.
- 13 2021 World Steel in Figures [Electronic resource]. URL: <https://aceroplatea.es/docs/StainlessSteelFigures2021.pdf> (дата обращения: 17.01.2022).
- 14 Holappa L. A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry // *Metals*. 2020. Vol. 10, No. 9. P. 1117–1138.
- 15 Tiwari H. P., Saxena V. K. Industrial perspective of the cokemaking technologies. In: *New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. P. 203–246.
- 16 Babich A., Senk D. Coke in the iron and steel industry. In: *New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. P. 367–404.
- 17 Ковалев Е. Т., Малина В. П., Рудыка В. И., Соловьев М. А. Мировые и европейские рынки металлургического угля, кокса, стали. Достижения и инновации в коксовом производстве. Перспективы (Аналитический обзор материалов саммита “Европейский кокс 2018”) // *Кокс и химия*. 2018. № 7. С. 2–13.
- 18 Campos A. M., Assis P. S. Analysis of the influence of biomass addition in coal mixture for metallurgical coke production // *Global Journal of Researches in Engineering*. E: Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 21, No. 2. Version 1.0. P. 1–9.
- 19 Козлов А. П., Черкасова Т. Г., Фролов С. В., Субботин С. П., Солодов В. С. Перспективы получения инновационных продуктов из каменноугольной смолы ПАО “КОКС” // *Кокс и химия*. 2020. № 7. С. 35–41.
- 20 Зублев Д. Г., Новиков Н. А. Обзор материалов Пятой Российской коксохимической конференции // *Кокс и химия*. 2019. № 11. С. 14–27.
- 21 Valia H. S. Nonrecovery and heat recovery cokemaking technology. In: *New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. P. 263–292.
- 22 Mochida I., Okuma O., Yoon S.-H. Chemicals from direct coal liquefaction // *Chem. Rev.* 2014. Vol. 114, No. 3. P. 1637–1672.
- 23 Okuyama N., Komatsu N., Shigehisa T., Kaneko T., Tsunuya S. Hyper-coal process to produce the ash-free coal // *Fuel Proc. Technol.* 2004. Vol. 85, No. 8–10. P. 947–967.
- 24 Yoshida T., Li C., Takanohashi T., Matsumura A., Saito S., Saito I. Effect of extraction condition on “HyperCoal” production (2) – Effect of polar solvents under hot filtration // *Fuel Proc. Tech.* 2004. Vol. 86, No. 1. P. 61–72.
- 25 Koyano K., Takanohashi T., Saito I. Estimation of the extraction yield of coals by a simple analysis // *Energy Fuels*. 2011. Vol. 25, No. 6. P. 2565–2571.
- 26 Kuznetsov P. N., Kuznetsova L. I., Buryukin F. A., Mаракушина Е. Н., Frizorger V. K. Methods for the preparation of coal-tar pitch // *Solid Fuel Chemistry*. 2015. Vol. 49, No. 4. P. 213–225.
- 27 Rahman M., Pudasainee D., Gupta R. Review on chemical upgrading of coal: Production processes, potential applications and recent developments // *Fuel Proc. Tech.* 2017. Vol. 158. P. 35–56.
- 28 Andrews R. J., Rantell T., Jacques D., Hower J. C., Gardner J. S., Amick M. Mild coal extraction for the production of anode coke from Blue Gem coal // *Fuel*. 2010. Vol. 89, No. 9. P. 2640–2647.
- 29 Kuznetsov P. N., Kamenskiy E. S., Kuznetsova L. I. Comparative study of the properties of the coal extractive and commercial pitches // *Energy Fuels*. 2017. Vol. 31, No. 5. P. 5402–5410.
- 30 Kuznetsov P. N., Avid B., Kuznetsova L. I., Purevsuren B., Fan X., Ismagilov Z. R., Safin V. A. Thermal solvolysis of coals under mild conditions as an alternative way to produce aromatics for carbon materials // *Atlantis Highlights in Chemistry and Pharmaceutical Sciences*. 2021. Vol. 2. P. 98–107.
- 31 Кузнецов П. Н., Маракушина Е. Н., Бурюкин Ф. А., Исмагилов З. Р. Получение альтернативных пеков из углей // *Химия уст. разв.* 2016. Т. 24, № 3. С. 325–333.
- 32 Kuznetsov P. N., Avid B., Kuznetsova L. I., Perminov N. V., Kamensky E. S., Ismagilov Z. R. Co-processing of bituminous coal with heavy hydrocarbon fractions of coal and petroleum origins into pitch-like products // *Химия уст. разв.* 2021. Т. 29, № 2. С. 218–228.
- 33 Kuznetsov P. N., Kamenskiy E. S., Kuznetsova L. I. Solvolysis of bituminous coal in coal- and petroleum-derived commercial solvents // *ACS Omega*. 2020. Vol. 5, No. 24. P. 14384–14393.
- 34 Маракушина Е. Н. Получение пеков и связующих веществ методом термического растворения углей: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 137 с.