

МРНТИ 61.53.99

Ж.Т. Айменов¹ – основной автор, ©
А.В. Протопопов², А.А. Саипов³,
А.Ж. Мерекеева⁴, А. Кадирали⁵



¹Д-р техн. наук, профессор, директор Научно-исследовательского института естественно-технических наук,

²Д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией «Высокотемпературный синтез композиционных материалов и металлургических процессов»

³Магистр, начальник Центра поддержки технологий, инноваций и защиты интеллектуальной собственности

⁴Магистр, главный специалист Центра сопровождения проектов,

⁵Главный специалист

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0001-5426-6056> ²<https://orcid.org/0000-0002-0718-6333>

³<https://orcid.org/0000-0003-4703-2512> ⁴<https://orcid.org/0000-0001-9058-5484>

⁵<https://orcid.org/0009-0006-6799-331X>



^{1,2,3,4,5}Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,



Шымкент, Казахстан



³abdilla.s.a@gmail.com

<https://doi.org/10.55956/QYMI2463>

ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И СИНТЕЗ ИСКУССТВЕННОГО ГРАФИТА

Аннотация. В статье рассматривается возможность получения искусственного графита плазменным способом рафинирования углеродного сырья (угля), как более экологичной технологии без использования химических реактивов. Метод основан на особенности углерода сублимировать при температуре выше 2000°C вместе с примесями химических элементов и десублимировать при охлаждении одним из первых превращаясь в высокочистый графит на поверхности катализатора из графита. Примеси, находящиеся в газообразном состоянии, отделяются от образовавшегося графита. В зонах графитации реактора с меньшей температурой примеси улетучиваются, либо сорбируются образовавшимся графитом. Отделение графита с максимальной температурой десублимации углерода от графита в зонах с меньшей температурой, где уже графит сорбирует примеси, является особенностью такого технического решения.

Ключевые слова: плазма, сублимация, десублимация, графитация, уголь, графит, сепарация, катализатор.



Айменов, Ж.Т. Деминерализация каменного угля плазмохимическим методом и синтез искусственного графита [Текст] / Ж.Т. Айменов, А.В. Протопопов, А.А. Саипов, А.Ж. Мерекеева, А. Кадирали // Механика и технологии / Научный журнал. – 2026. – №3(93). – С.484-492. <https://doi.org/10.55956/QYMI2463>

Введение. Обеспечение экологической безопасности, в настоящий период времени, зависит от возможностей человечества освоить новейшие технологии создания энергоносителей на основе графита. Природные запасы

графита весьма ограничены, а степень чистоты природного графита для новых задач требует его рафинирования от минеральных примесей [1-3]. Растущий спрос на высокочистый графит требует создания новых источников сырья для этого, стратегически важного продукта. Существует прогноз «ВМІ», что спрос на графит в области промышленности производства аккумуляторов вырастет до 2050 года более чем в 14 раз в сравнении с сегодняшним днем [4]. Такое развитие широкого спроса на графит обусловлено его использованием в энергетике, машиностроении, химической промышленности и других сферах производственной деятельности.

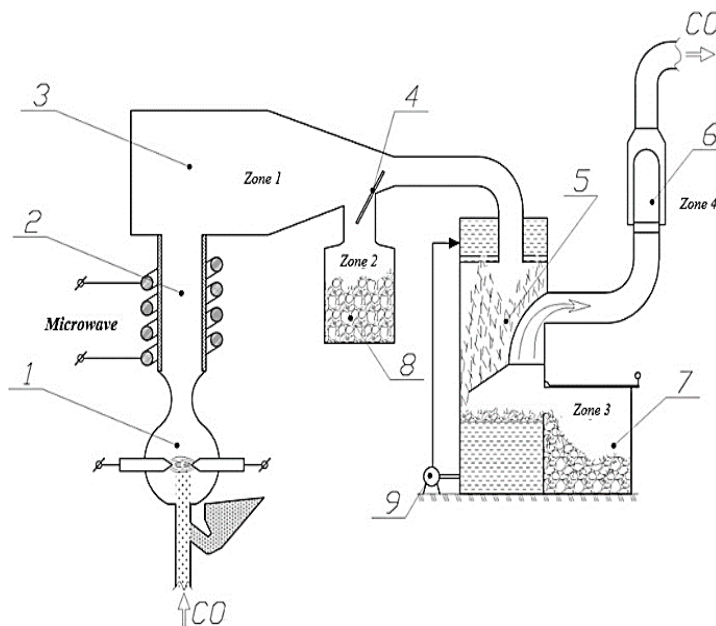
В этой статье рассматривается возможность восполнения потребностей в искусственном графите – получением его из угля месторождения Сарытоган, находящегося в Казахстане. Запасы этого месторождения оцениваются в 60 миллионов тонн [5], важным представителем молодых угольных запасов, пригодных для производства искусственного графита, является уголь Шубаркольского месторождения. Шубаркольский уголь по минеральному составу относится к высококачественным длиннопламенным углям с зольностью 5–13%, серой – менее 0,5%, и высокой теплотой сгорания 5100–5700 ккал/кг, с содержанием минералов-оксидов: кальция, железа, магния, натрия и калия [5,6]. Перечисленные особенности этого угля обеспечивают его преимущество для использования в производстве высокочистого графита по плазменным технологиям [7].

Цель авторов статьи привлечь ученых Казахстана к решению важнейшей проблемы в промышленности искусственного графита с использованием современных достижений в области плазмохимии углерода, базирующейся на особенностях свойств углерода сублимировать и десублимировать при фазовых превращениях выше 2000°C, когда почти все вещества примесей в конденсированном состоянии, а углерод графитизируется – это и есть новый процесс при рафинировании графита в области высоких температур.

Условия и методы исследований. Преимуществами плазмохимической технологии являются: высокая скорость протекания процессов сублимации углерода и возможность десублимации с управлением процессом структурообразования графита. В низкотемпературной плазме степень ионизации не превышает 1–2%. Поэтому в плазменных средах значительное влияние на физико-химические процессы могут оказывать электромагнитные явления, управляющие динамикой спинов не спаренных электронов. По утверждению авторов [8], происходит сепарация изотопов между продуктами и исходными реагентами в химических процессах. Эта особенность углерода используется для синтеза высокочистого графита. Плазмохимический способ получения графита, основан на использовании плазмы для превращения углерода аморфного – угольного, в кристаллическое – графит. Плазмохимический метод позволяет получать графит высокочистый кристаллизацией атомарного углерода десублимацией на катализаторе – порошке графита, который активирует графитацию углерода [9]. Для реализации выполнения задачи создана плазмохимическая установка из двух плазмообразующих аппаратов: дугового плазмотрона (рис. 1 позиция 1) и индукционного (СВЧ) плазмотрона (рис 1 позиция 2) Температура в реакционных зонах плазмотронов достигает значений до 2000°C-6000°C.

Принцип работы плазмохимической установки следующий: каменный уголь предварительно измельчают до фракции 0,005–0,05 мм и подают в реакционную зону в потоке углекислого газа с расходом около 5 л/мин.

Угольную взвесь подвергают воздействию плазменной дуги при температуре реакционной зоны 2500–3000°C. В результате высокотемпературной обработки происходит сублимация углеродсодержащего сырья с образованием газовой смеси, содержащей, в частности, CO, CO₂ и атомарный углерод. Полученный атомарный углерод направляют из реакционной зоны в зону графитизации, в которой присутствует высокодисперсный порошок графита, выполняющий функцию центров, или зародышей, конденсации и кристаллизации углерода. В качестве затравочного материала используют порошок графита с размером частиц около 0,005–0,01 мм, при этом в исходном описании предусмотрено его введение в количестве 2–5% по объёму относительно графитизируемого углерода. Зона графитизации выполнена многоступенчатой и содержит элементы, предназначенные для снижения скорости движения газопылевого потока и увеличения времени пребывания углеродсодержащих компонентов в зоне кристаллизации. В процессе движения через зону графитизации атомарный углерод конденсируется и кристаллизуется на затравочных частицах графита с образованием высокодисперсного графита. После графитизации полученный графит отделяют от газового потока посредством последовательного осаждения и улавливания. Мелкодисперсная графитовая фаза, остающаяся в газовом потоке, поступает в систему газоочистки и улавливается с помощью водяного душа. После улавливания графит охлаждается до температуры, обеспечивающей возможность его безопасного контакта с атмосферным воздухом.



1 – камера реактора электродуговой плазмы с графитовыми электродами и устройством подачи сырья с углекислым газом; 2 – камера СВЧ; 3 – графитизатор (зона 1); 4 – экран-ловушка графита из десублимированного атомарного углерода; 5 – камера водяного орошения дыма; 6 – фильтр уловитель пыли (зона 4); 7 – бункер сбора графита (зона 3); 8 – бункер сбора синтезированного графита (зона 2) и (зона 3); 9 – насос специального раствора

– поглотителя CO_2 , перекачивает из отстойника водный поглотитель с отделенной графитовой пеной в сборник (зона 3).

Рис. 1. Схема плазмохимической установки синтеза графита из угольного порошка Шубаркольского месторождения Казахстана [8-11]

Газообразные продукты направляют в систему отделения углекислого газа от остальных компонентов газового потока. Выделенный углекислый газ частично возвращают в реактор, а избыток CO_2 может быть направлен на дальнейшее хранение. Подана заявка на изобретение (заявка №2026/0992.1 от 08.09.2026г) на способ получения высокодисперсного графита из каменного угля и конструкцию устройства для его осуществления.

Исследования материалов – их химического и фазового составов выполнялись в лаборатории ИРЛИП Конструкционных и биохимических материалов НАО «Южно-Казахстанский университет имени Мухтара Ауэзова» и научной лаборатории АО «Институт Металлургии и обогащения» рентгено-флюорисцентным анализом и массоспектральными анализами.

Результаты исследований и их обсуждение. Основные этапы, разрабатываемого плазмохимического получения графита из угля включают:

1. Подготовка сырья: уголь измельчают до необходимого размера частиц, и подвергают специальной очистке от зольных примесей.

2. Генерация плазмы: для получения плазмы используется электродуговой плазмотрон с графитовыми электродами и реакционной камерой из графита [8,9].

3. Взаимодействие с плазмой: Частицы угля подаются в плазменную зону реактора потоком углекислого газа для создания в реакционной камере плазмы с восстановительной средой, то есть с избытком активного углерода. В плазме происходит разрушение сложной атомной структуры угля с образованием ионизированного углерода и ионов минеральных примесей. Катализатор – графит в виде дисперсного порошка подается дозировано в графитовый реактор – в зону горловины реактора (рис. 1, зона 5).

4. Важный этап – десублимация [8,9] углерода происходит на поверхности катализатора – графитация атомарного углерода на поверхности кристаллических частиц катализатора (графита), что создает условия формированию кристаллической структуры по подобию структуры катализатора.

5. Очистка и обработка: образовавшиеся, в реакционной зоне – зоне графитизации, высокодисперсные частицы графита и другие сконденсированные примеси отделяются от газовой составляющей специальным водным раствором. В гидросепараторе графит отделяется от оставшихся примесей [9].

Преимущества плазмохимического способа [9]: высокая скорость процесса; плазмохимический способ позволяет получать в зоне графитации графит в форме высокодисперсного порошка с кристалличностью, задаваемой структурой катализатора.

Возможность получения графита с заданными свойствами обеспечивается изменением условий процесса десублимации. С использованием катализатора для кристаллизации углерода представилась возможность управлять структурой получаемого графита, следовательно и его техническими характеристиками. Катализатор с требуемой кристаллической структурой способствует снижению энергетических препятствий на

зарождение зародышей кристаллизации, так как при десублимации атомарный углерод кристаллизуется на поверхности катализатора, копируя его структуру.

Недостатки:

- высокая энергоемкость процесса: плазмохимический способ получения графита требует больших удельных затрат энергии;
- сложность оборудования: создание и поддержание плазмы в рабочих условиях требует сложного и дорогостоящего оборудования. Но это оправдывается качеством получаемого продукта и его особыми свойствами, обеспечивающими его применение в отраслях промышленности специального назначения.

Такое оборудование (рис. 1) нами создано на основе анализа и положительных идей научных публикаций [8-16].

Подробно с работой плазмохимической установки синтеза графита из угольного порошка Шубаркольского месторождения Казахстана можно ознакомиться в материалах [8,9].

Химический состав пробы угля: С – 83,3%, О – 15%, Al – 0,4%, Si – 1%, S – 0,3%. Структура образца пробы угля показана на рисунке 2а. Химический состав пробы полученного графита: С – 98%, О – 1,0%, Si – 1%, S – 0,3%. Спектрограмма образца пробы угля показана на рисунке 2б.

Макроструктура образца угля Шубаркольского (прессовка из молотого угля) показана на рисунке 2а, с характеристическим спектром элементного состава – 2б. Макроструктура графита, из угля Шубаркольского месторождения показана на рисунке 3а, с характеристическим спектром элементного состава материала – 3б. Рисунки получены на РЭМ в ИРЛИП «Конструкционные и биохимические материалы».

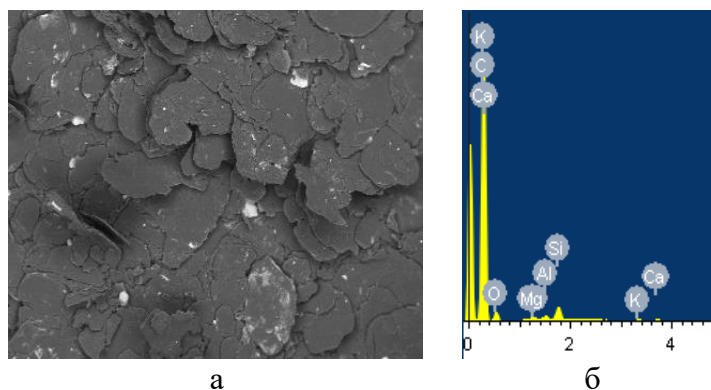


Рис. 2. Макроструктура образца угля Шубаркольского (прессовка из молотого угля) – а, с характеристическим спектром элементного состава материала – б

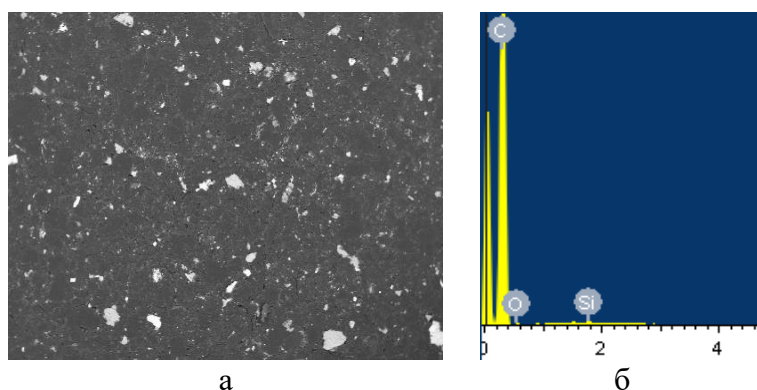


Рис. 3. Макроструктура графита, из угля Шубаркольского месторождения – а, с характеристическим спектром элементного состава материала – б.

Исследовался химический состав графита, образовавшегося в различных зонах графитации, установлено, что в зонах графитации с более низкой температурой увеличивается количество примесей (табл. 1). Зависимость содержания примесей в графите от зоны графитации и её средней температуры в процессе. Возникла необходимость выяснения избирательности абсорбции примесей, образовавшимся графитом и изучения механизмов этого процесса для научного обоснования сорбционных свойств, создаваемого сорбента из углеродных материалов. Эта задача требует решения и дополнительных исследований на высоком физическом уровне.

Рентгенофлуорисцентным анализом (РФА) (рис. 4), подтверждается получение высокочистого графита.

Таблица 1

Результаты химического состава графита в зонах графитации установки
ПХСГ

	Зона 1 Плазмотрон	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5	Зона 6 Фильтр
Температурный интервал графитации, °С	6000-2000	2000-1500	1500-1000	1000-800	800-700	60-70
Химический состав графита, характерные спектры приведены в приложении	Не обнаружен продукт	Не обнаружен продукт	C – 87,6% O – 8,6% Mg – 0,2% Si – 1,1% Fe – 1,1% и др.	64,12 19,5 0,4 0,6 13,8 и др.	Не обнаружен продукт	85,2 9,4 0,17 1,16 2,67 и др.

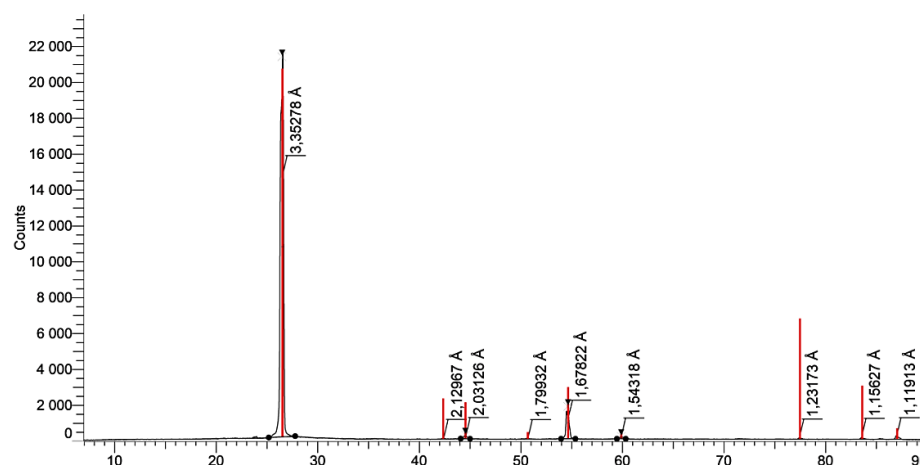


Рис. 4. Рентгенофлуорисцентный спектр пробы порошка из зоны 2 – характерен для высокочистого графита

Выполнены испытания по получению графита на плазмохимической установке синтеза графита с возможностью получения терморасширенного графита. Установка сконструирована на основе совмещения термической обработки сырья – угля Шубаркольского месторождения, в графитовой камере электродугового плазмотрона с графитовыми электродами, создающими электрическую дугу в защитной от окисления атмосфере из углекислого газа с воздействием высокочастотным – СВЧ магнитным полем. СВЧ электромагнитное поле создаётся индуктором высокочастотной установки – ВЧИ 11-60/1,76. Сочетание нагрева порошкового угольного сырья с электромагнитным воздействием на образующуюся плазму обеспечивает сублимацию углерода, а при охлаждении обеспечивает в камере графитации, выполненной из графита, и подачи в неё катализатора – процесс образования графита. При таком условии происходит копирование структуры атомов катализатора – графитового порошка. Катализатор может использоваться с требуемым кристаллическим строением, зависимо от цели синтеза.

Заключение. Предстоит изучить влияние СВЧ радиации в плазменном реакторе на формирование атомной структуры графита и установить зависимость её от интенсивности и времени реакции в СВЧ диапазоне.

Важная особенность она же и преимущество – углерод десублимируют при самой высокой температуре, когда еще все примеси в газообразном состоянии, поэтому самым важным для получения высокочистого графита является отделение его от примесей, находящихся ещё в газообразном состоянии. Отделение графитовой, пыли от газообразных примесей является важной и не простой задачей. Нами найдено решение этой задачи, но еще требуется его усовершенствование для непрерывного и массового производства.

Список литературы

1. Saryglar Ch.A., Chysym R.B. Main directions of coal processing // Fundamental Research. – 2018. – No. 11-1. – P. 121–127.
2. Imash A.A., Kaidar B.B., Zhumatayev Ye.A., Smagulova G.T. Ways of complex processing of coals // Kazakh University. – 2021. – Vol. 19. – P. 327–338. – DOI: 10.18321/cpc471.

3. Fialkov A.S. Processes and equipment for the production of powdered carbon-graphite materials. – Moscow: Aspect Press, 2007. – 687 p.
4. Safonov A.A., Mausymbayeva A.D., Portnov V.S. et al. Analysis of the possible use of coals from the Shubarkol deposit in the smelting of technical silicon // Coal. – 2019. – No. 2. – P. 68–72.
5. Seleznev A.N. Carbon raw materials for the electrode industry. – Moscow: Profizdat, 2000. – 256 p.
6. Coal Grade D (Shubarkol Deposit) [Electronic resource]. – Access mode: <https://vdbuildcorp.kz/catalog/ugol-marki-d-shubarkolskoe-mestorozhdenie-0>.
7. Protopopov A.V., Suleimenov E.A., Protopopov M.A., Saipov A.A. Method of production of thermochemically expanded graphite. Utility Model of the Republic of Kazakhstan No. 10432, IPC C01B 31/04. – Published 18.04.2025. – Bulletin No. 16.
8. Aimenov Zh.T. et al. Artificial graphite from Shubarkol coal obtained by sublimation of carbon atoms into the gas phase followed by desublimation into high-purity graphite // Complex Use of Mineral Resources. – 2027. – Vol. 341, No. 2. – P. 27–35.
9. Potapov A.M., Protopopov A.V., Assan A.K. Method for producing thermally expanded graphite. Innovative Patent of the Republic of Kazakhstan No. 20316, IPC C01B 31/04. – Published 17.11.2008. – Bulletin No. 11.
10. Global Carbon & Graphite Market to Reach US\$7.5 Billion by 2015 // New Report by Global Industry Analysts [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.prweb.com/releases/carbon/graphite/prweb4545674.html>.
11. Samoilov V.M. RU2257341C1. Method for producing fine-grained graphite. – 27.07.2005.
12. Karpenko E.I. RU2087525C1. Method of gasifying coals and electroarc plasma reactor for coal gasification. – 20.08.1997.
13. Karpenko E.I. RU2031553C1. Plasma reactor for coal gasification. – 20.03.1995.
14. Aladekomo J., Bragg R. Structural transformations induced in graphite by grinding: analysis of 002 X-ray diffraction line profiles // Carbon. – 1990. – Vol. 28, No. 6. – P. 897–906.
15. Samoilov V.M. Production of fine-grained carbon fillers and development of technology for the production of fine-grained graphites based on them : diss. ... Dr. tech. sci. / V.M. Samoilov. – Moscow, 2006. – 358 p.
16. Maire J., Merring J. Graphitization of soft carbons // Chemistry and Physics of Carbon. – 1970. – Vol. 6. – P. 125–190.

Исследования выполнены в рамках проекта AP26102281 «Разработка технологии и оборудования для получения полидисперсных графитовых сорбентов из углеродсодержащего сырья для обеспечения экологической безопасности в горнодобывающей, перерабатывающей и нефтехимической промышленности», профинансированного Комитетом науки МНВО РК.

Материал поступил в редакцию 18.08.26, принят 18.09.26.

**Ж.Т. Айменов¹, А.В. Протопопов¹, А.А. Саипов¹,
А.Ж. Мерекеева¹, А. Кадирали¹**

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

КӨМІРДІ ПЛАЗМОХИМИЯЛЫҚ ӘДІСПЕН МИНЕРАЛСЫЗДАНДЫРУ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ГРАФИТ СИНТЕЗІ

Аңдатпа. Мақалада химиялық реактивтерді пайдаланбай экологиялық таза технология ретінде көміртегі шикізатын (көмірді) тазартудың плазмалық әдісімен жасанды графит алу мүмкіндігі қарастырылады. Бұл әдіс көміртектің ерекшеліктеріне негізделген – 2000°C-тан жоғары температурада химиялық элементтердің қоспаларымен бірге сублимацияға ұшырайды және салқындаған кезде

алғашқылардың бірі болып десублимацияға ұшырап графит катализаторының бетінде жоғары таза графитке айналады. Газ тәрізді күйдегі қоспалар түзілген графиттен бөлінеді. Температурасы төмен реактордың графитация аймақтарында қоспалар буланып кетеді немесе түзілген графитпен сорылады. Көміртекті десублимациялаудың максималды температурасы бар графитті графиттен төмен температуралы аймақтарда бөлу, онда графит қоспаларды сорбциялайды, бұл техникалық шешімнің ерекшелігі болып табылады.

Түйін сөздер: плазма, сублимация, десублимация, графиттеу, көмір, графит, бөлу, катализатор.

Zh.T. Aimenov¹, A.V. Protopopov¹, A.A. Saipov¹, A.Zh. Merekeyeva¹, A. Kadirali¹

¹M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

DEMINERALIZATION OF COAL BY PLASMA CHEMICAL METHOD AND SYNTHESIS OF ARTIFICIAL GRAPHITE

Abstract. This article examines the possibility of producing artificial graphite using plasma refining of carbon feedstock (coal), a more environmentally friendly technology that does not use chemical reagents. The method is based on carbon's ability to sublime at temperatures above 2000°C, along with impurities of chemical elements, and desublimates upon cooling, becoming one of the first to form high-purity graphite on the surface of a graphite catalyst. Impurities in a gaseous state are separated from the resulting graphite. In the lower-temperature graphitization zones of the reactor, the impurities evaporate or are sorbed by the resulting graphite. Separating graphite at the maximum carbon desublimation temperature from graphite in the lower-temperature zones, where the graphite sorbs the impurities, is a key feature of this technical solution.

Keywords: plasma, sublimation, desublimation, graphitization, carbon, graphite, separation, catalyst.