

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-30-41>

УДК 661.665.1

РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ (ОБЗОР)

^{1,2)} Семейко К.В., ³⁾ Малиновский А.И., ³⁾ Гребеньков А.Ж., ⁴⁾ Саенко С.Ю.,
⁴⁾ Лобач К.В., ²⁾ Кустовская А.Д., ⁵⁾ Ляпощенко А.А., ⁵⁾ Склабинский В.И.

¹⁾ *Институт газа НАН Украины, Киев, Украина*

²⁾ *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

³⁾ *Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

⁴⁾ *Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина*

⁵⁾ *Сумской государственный университет, Сумы, Украина*

E-mail для контактов: k_simeyko@ukr.net

В статье представлен краткий обзор промышленных технологий и результатов научных исследований процессов получения карбида кремния. Исследования по получению мелкодисперсного, пористого и наноразмерного карбида кремния проводятся в ведущих научно-исследовательских институтах и организациях мира. Среди научных задач, которые возникают перед исследователями, можно отметить снижение энергозатрат, повышение экологической безопасности промышленных технологий и чистоты готового продукта. Одним из перспективных способов получения карбида кремния является карботермическое восстановление капсулированного пироуглеродом кремнезема в реакторах с электротермическим псевдооживленным слоем.

Ключевые слова: карбид кремния, карботермическое восстановление, наноматериалы, толерантное ядерное топливо, новые технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Карбид кремния с повышенной чистотой кристаллов, благодаря своим высоким механическим, электротехническим и физико-химическим характеристикам, становится одним из наиболее перспективных и востребованных компонентов при реализации современных технических решений.

Керамика на основе карбида кремния обладает значительной механической прочностью (при высоких температурах) и износостойкостью, низким коэффициентом термического расширения, высоким сопротивлением окислению (жаростойкостью) до 1600 °С, а также высокой инертностью к химическому (таблица 1) и радиационному воздействию [1, 2]. Поэтому представляется особенно перспективным её использование в ядерной энергетике, в частности, для изготовления оболочек ТВЭЛ (в рамках концепции толерантного топлива) [3], а также в качестве защитного покрытия микротрещин для высокотемпературных газоохлаждаемых ядерных реакторов [4].

Таблица 1. Химическая стойкость карбида кремния (SiC)

Среда	Концентрация, %	Температура, °С	Коррозия, мм/год
H ₂ SO ₄	95–98	160±10	0,06
NaOH	30	100	0,06
H ₃ PO ₄	85	300±10	0,28
HNO ₃	60	20±1	0,06
KOH	45	100	0,12
HCl	20	100	0,12
HF:HNO ₃	40+10	60±2	6,5

Карбид кремния представляется жизнеспособным материалом для изготовления стенки термоядерного реактора, в котором ожидаются высокие температуры и высокорadiационная среда [5].

Наряду с растущим спросом на карбид кремния в сталелитейной промышленности, проявляется также потребность на этот продукт и в электронной промышленности, в этой отрасли он используется для производства полупроводников. Ожидается, что растущее во всем мире использование возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии простимулирует спрос на карбидокремниевые полупроводники. В последнее десятилетие наблюдается существенный прогресс как в технологиях получения карбида кремния, так в разработках технологий создания полупроводниковых приборов на его основе. Эти направления обсуждались на международных конференциях International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) и European Conference on Silicon Carbide and Related Materials European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM). Развитие аэрокосмической, оборонной, автомобильной промышленности, медицины и энергетики также стимулирует возрастание потребностей в карбиде кремния. Таким образом, приобретают все большую актуальность исследования, направленные на создание энергоэффективных технологий получения карбида кремния.

Основными мировыми производителями карбида кремния являются AGSCO Corporation; Carborundum Universal Limited; Dow Chemical Co.; Entegris, Inc.; ESD-SIC b.v.; ESK-SIC GmbH; Grindwell Norton Ltd. and Saint Gobain Ceramic Materials GmbH [6].

Объем мирового рынка карбида кремния в 2019 году оценивался в 2,52 миллиарда долларов США, и ожидается, что в период с 2020 по 2027 год показатель совокупного среднегодового темпа роста (CAGR) составит почти 16,1%.

Известно примерно 250 кристаллических форм карбида кремния (SiC) [7]. Полиморфизм SiC характеризуется большим количеством схожих кристаллических структур, называемых политипами. Они являются вариациями одного и того же химического соединения, которые идентичны в двух измерениях, но отличаются в третьем. Рассмотрим самые распространённые модификации карбида кремния.

Альфа-карбид кремния (α -SiC) (рисунок 1) является наиболее часто встречающимся полиморфом. Эта модификация образуется при температуре свыше 1700 °С и имеет гексагональную решётку, а кристаллическую структуру типа вюрцита (лучистая цинковая обманка).

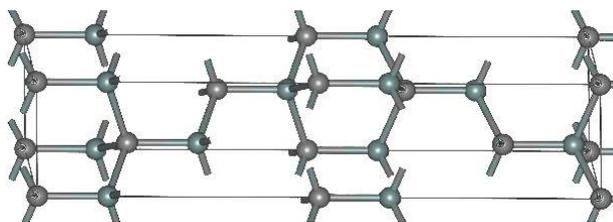


Рисунок 1. Структура (α)6H-SiC

Бета-модификация (β -SiC) (рисунок 2) образуется при температурах ниже 1700 °С с кристаллической структурой типа цинковой обманки (аналог структуры алмаза) [8]. До недавнего времени форма имела сравнительно небольшое коммерческое использование, однако в настоящее время интерес к ней возрастает в связи с использованием карбида кремния в качестве гетерогенных катализаторов.

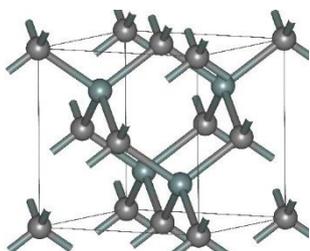


Рисунок 2. Структура (β)3C-SiC

Нагревание бета-формы до температур свыше 1700 °С способно приводить к постепенному переходу кубической бета-формы в гексагональную (2H, 4H, 6H, 8H) и ромбическую (15R) [9].

ПРОМЫШЛЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ

В конце XIX века почти одновременно карбид кремния был получен Шутценбергом, Муассаном и Ачесоном. Разработанный Ачесоном способ получения карбида кремния [10, 11] применяется в основе его промышленного производства. В соответствии с этим способом в кремнезем (диоксид кремния SiO₂) добавляют малозольный или нефтяной кокс, после чего производят термообработку ($t=2000...2500^{\circ}\text{C}$), пропуская электрический ток через угольные электроды и сердечник. В шихту также добавляют пова-

ренную соль и в зависимости от ее количества получают зелёный или черный поликристаллический карбид кремния. Продолжительность процесса около 40 часов. После такой обработки неизбежно присутствие большое количество неконтролируемых примесей. Полученный методом Ачесона карбид кремния применяется для изготовления абразивного инструмента, подложек для изготовления полупроводниковых приборов, в качестве источника паров при выращивании кристаллов по методу Лели, а также для изготовления других изделий из карбида кремния.

Выпускаемый абразивной промышленностью карбид кремния по содержанию примесей подразделяется на два класса: черный и зеленый. Зеленый цвет монокристаллам придает азот, а черный – алюминий. Зеленый карбид кремния содержит меньшее количество примесей. В таблице 2 представлен химический состав черного и зеленого карбида кремния.

Таблица 2. Химический состав черного и зеленого карбида кремния (SiC), %мас.

Карбид кремния	SiC	Fe	Al	CaO	SiO ₂
Зеленый	98,70	0,11	0,06	0,01	—
Черный	96,21	1,05		—	0,94

Метод Лели заключается в испарении поликристаллического карбида кремния ($t=2500...2650^{\circ}\text{C}$) и последующей конденсации паров на случайных зародышах. Данным методом из карбида кремния прессованием изготавливают втулку, которую помещают в графитовый тигель. На внутренних стенках втулки температура на 50–70 °С ниже, чем на внешних стенках, что приводит к конденсации паров в полости втулки и росту монокристаллов. Большое количество зародышей приводит к избытку мелких кристаллов и образованию друз.

До начала 1980 гг. метод Лели был единственным методом производства кристаллов для полупроводниковой промышленности [12].

Одним из технически простых и широко используемых является процесс синтеза карбида кремния, заключающийся в восстановлении кремнезема углеродом электродуговым методом [13]. Многостадийный процесс последовательного прохождения реакций заканчивается образованием карбида кремния. Другой промышленный способ, предложенный Куном [14], предусматривает использование дуговой печи, в которой дуга зажигается между электродами, состоящими из смеси диоксида кремния и углерода. Горение дуги и восстановление кремнезема происходит в восстановительной или нейтральной атмосфере. К другим методам синтеза, например, силицирования графита, реакционном спекании карбидокремниевых материалов и получении порошков чистого карбида кремния относятся синтез из кремния и углерода, причем карбид кремния образуется при всех температурах вплоть до 2000 °С. Но такой способ до-

статочно дорогостоящий из-за высокой стоимости кремния. В настоящее время проводятся исследования по оптимизации режимов работы электродуговой печи, поиску недорогих катализаторов, исходных реагентов и иных расходных материалов [15]. В частности, предлагается использование природного угля для изготовления электродов электродуговой системы, а также в качестве исходного источника углерода для проведения синтеза различных материалов [16]. Известна работа [17], в которой предлагается подход к модернизации электродугового метода, в частности, получение углеродных ультрадисперсных материалов в воздушной среде при нормальном или пониженном давлении. Данное решение предполагает потенциально значительный экономический эффект за счет снижения стоимости оборудования, потребления электрической энергии и расходных материалов, вследствие исключения из системы вакуумно-газового оборудования и непосредственно корпуса реактора в его традиционном исполнении. Подобные системы функционируют за счет генерации монооксида углерода и активного потребления кислорода в пространстве, окружающем электродуговую плазму, инициированную на графитовых электродах в воздушной среде [18].

ПОЛУЧЕНИЕ КУБИЧЕСКОГО И НАНОРАЗМЕРНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

В Томском политехническом университете разработан метод получения кубической фазы карбида кремния путем отжига в воздушной среде порошкового продукта электродугового синтеза, состоящего из β -SiC, графита и небольшого количества кремния. Благодаря высокой стойкости β -SiC к окислению в воздушной среде удалось произвести его очистку в процессе горения фазы графита в температурном интервале ~ 700 – 900 °C. В работе использовались два типа прекурсоров: 1) смесь порошкового кремния с рентгеноаморфным углеродом в виде микроразмерных волокон; 2) смесь порошкового кремния с порошковым углеродом. Соотношение масс в исходной смеси составляет Si:C=2:1. По результатам анализа методом рентгеновской дифрактометрии получен порошковый материал с содержанием β -SiC близким к 99% об., а по результатам анализа методом растровой электронной микроскопии β -SiC характеризуется широким (от $\sim 0,1$ до ~ 10 мкм) распределением частиц по размерам и типичной для данной фазы формой кристаллов [19].

Этот результат обеспечивают два фактора: наличие в составе смеси исходных реагентов углеродных волокон и достаточное количество подведенной энергии – 216 кДж/г [19–21].

Одновременно внимание исследователей сосредоточено на получении наноразмерных частиц карбида кремния в матрицах, а также карбидокремниевых нанопроволок и нанотрубок [22]. Для этого используются следующие основные технологические процессы и методы: электрохимическое и химичес-

кое травление, карбидизация кремния и его оксида, имплантация ионов углерода в кремний, совместная имплантация ионов углерода и кремния в матрицы типа SiO₂ [23]. Для синтеза нанокристаллического карбида кремния используется два метода: карботермическое восстановление диоксида кремния и химическое осаждение из газовой фазы. Первый, несмотря на кажущуюся простоту и основываясь на термическом взаимодействии углерода с диоксидом кремния, представляет собой совокупность более 20 различных реакций и последовательностей гетерогенных взаимодействий, скорость которых лимитируется как диффузионными механизмами, так и площадью поверхности контакта фаз. Ключевым фактором, оказывающим наибольшее влияние на химическое взаимодействие контактирующих фаз и физико-химические свойства конечного продукта, является морфология исходных материалов и выбранный метод синтеза смеси контактирующих фаз SiO₂-C. Данные термодинамического анализа системы Si-C-O по результатам экспериментальных исследований карботермического восстановления различных форм углерода позволяют не только выявить общие закономерности синтеза карбидокремниевых материалов с известной морфологией, но и описать механизмы роста наноструктур карбида кремния. Другим методом получения нанокристаллического карбида кремния является химическое осаждение из газовой фазы. Процессы в газовой фазе играют одну из ключевых ролей не только при создании покрытий, но и для объемных конструкций из карбида кремния. Типичными прекурсорами в этих процессах являются производные силана и углеводородов, органохлорсиланы и прочие, которые подвергаются термической деструкции в водороде при высоких температурах (обычно выше 1500 °C), для получения карбида кремния. При этом очевидным недостатком рассмотренных методик является наличие химически активных продуктов реакций (водород, хлористый водород, хлор и пары воды), которые в различных соотношениях представляют не только химически активные, но и взрывоопасные смеси. Поэтому задача поиска и синтеза прекурсоров нового класса, взаимодействие или термическое разложение которых не приводит к образованию в газовой фазе коррозионно-активных и взрывоопасных соединений, представляется актуальной в настоящее время [24].

В работе [25] рассмотрена механическая активация реакционных порошковых смесей для получения субмикронных частиц карбида кремния методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Проведены сравнительные исследования процесса механической активации при использовании различных источников углерода: сажи или графита. Исходная смесь в первом случае представляла собой крупные частицы (осколки) кремния и пластинчатые частицы графита. Во втором случае исходная смесь состояла из крупных частиц кремния

(размером до 20 мкм), вокруг которых концентрировались мелкие частицы сажи (размером менее 200 нм). Проведенные сравнительные исследования смесей (с добавлением сажи Si+C(сажа) и с графитом Si+C(графит)) показали, что в случае применения графита композиционные частицы образуются практически с одновременным разрушением и уменьшением размера частиц двух компонентов (Si и C). Вследствие того, что сажа мелкодисперсная, то в смеси Si+C(сажа) происходит обволакивание сажей частиц кремния в процессе их разрушения. Применение азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза позволило получить из шихты состава «19Si+6NaN₃+(NH₄)₂SiF₆+20C» продукт, состоящий практически полностью из β-SiC – 89,4% мас., с примесью α-Si₃N₄ – 5,5% мас. и Si – 5,1% мас., представляющий собой наноразмерные частицы карбида кремния (80–150 нм), объединенные в агломераты размером до 50 мкм.

В Самарском государственном техническом университете проведены исследования влияния различных источников углерода на морфологию и размер частиц карбида кремния, полученного по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. В качестве источника углерода использовались следующие материалы: активированный уголь «БАУ» на древесной основе; активированный уголь «АГ-2» на каменноугольной основе; сажа П700; графит. В процессе горения смеси «19Si+20C+6NaN₃+(NH₄)₂SiF₆» образуется карбид кремния в виде равных частиц, размером от 70 до 200 нм. Карбид кремния с частицами наименьшего размера (70–150 нм) образуется при использовании активированного угля «АГ-2» на каменноугольной основе [26–27].

В работах [28–31] доказана возможность плазменно-динамического синтеза карбида кремния. Приводятся результаты синтеза ультрадисперсного карбида кремния при воздействии плазменной углерод-кремниевой струи сверхзвуковой скорости на медную перегородку, анализируется фазовый и гранулометрический состав продукта при различных количествах подведенной к системе энергии. Высококоростная плазменная струя генерировалась коаксиальным магнитоплазменным ускорителем с графитовыми электродами. Исследовался продукт, получаемый в системе Si-C, образуемой в гиперскоростной струе плазмы. Выявлено, что продукт состоит в основном из искомой фазы кубического карбида кремния, а также непрореагировавших прекурсоров. В работе [30] проведен расчет гранулометрического состава порошкообразных продуктов, получена функция распределения частиц по размерам, а также обобщенная зависимость среднего размера частиц от подведенной к системе энергии (рисунок 3).

Как следует из рисунка 3, при увеличении количества подводимой энергии для процесса синтеза наблюдается рост размеров частиц. Полученную зави-

симость можно пояснить увеличением энергетических параметров плазменного потока, индуцированного вблизи медной преграды, которые влияют на время роста кристаллов. Таким образом, варьируя энергией потока плазмы (определяется количеством подведенной энергии к системе) возможно изменять дисперсность синтезированного нанопорошка.

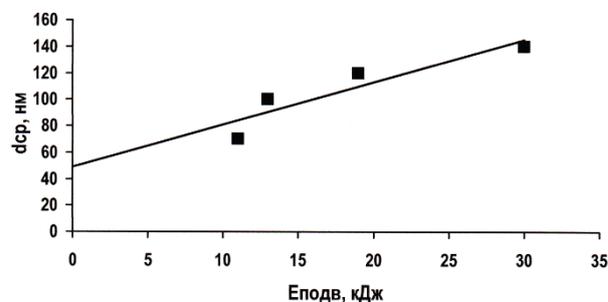


Рисунок 3. Зависимость среднего размера частиц нанокарбида кремния от уровня приложенной энергии [30]

В статье [32] описано формирование наночастиц кремний - карбид кремния на границе раздела фаз оксид графена – кремний. В зависимости от толщины пленки оксида графена полученные наночастицы диспергируются на поверхности кремния. Показано, что наночастицы дисперсного кремния формируются на графеноксидных слоях, в то время как одномерные наноструктуры содержат самоорганизующиеся наночастицы Si-SiC с внедренным оксидом графена. Предложен метод легкого химического осаждения из паровой фазы в псевдооживленном слое для синтеза монодисперсных наночастиц карбида кремния (SiC) с использованием гексаметилдисилазана ((CH₃)₃Si)₂NH [33]. Получены наночастицы SiC средним размером частиц от 10 до 200 нм. Преимущества технологии с псевдооживленным слоем для получения наночастиц карбида кремния представляются в особенностях зоны гомогенной реакции, узкого распределения температуры и сверхкороткого времени пребывания реагентов. В работе [34] наноматериалы из карбида кремния получены в результате твердофазной реакции метатезиса разных источников кремнезема, магния и углерода. Данный метод позволяет при 600 °С синтезировать кристаллические наноматериалы β-SiC различной морфологии.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

Пористый карбид кремния привлекает внимание исследователей и разработчиков полупроводниковых приборов [35], поскольку имеет свойство к интенсивной фотолюминесценции при комнатной температуре. Основным методом формирования пористой структуры карбида кремния является метод электрохимического анодирования [36–37]. В статье [36] использовалась пластина 6H-SiC, анодирование осуществлялось в электролите HF:H₂O:C₂H₅OH – 1:1:2 при освещении поверхности образцов источником ультрафиолетового света. При плотности тока 20, 60

и 100 мА/см² исходные толщины пористого карбида кремния составляли 26, 18 и 16 мкм соответственно, а с ростом плотности тока скорость роста слоя пористого карбида кремния увеличивалась нелинейно и составляла 1,73, 3,6 и 5,33 мкм/мин. Проведенные исследования в работе [38] показали, что пористый слой карбида кремния на подложке можно использовать как буферный слой для получения более совершенных, чем на подложке, эпитаксиальных слоев карбида кремния. В статье [39] описаны результаты электронно-микроскопических исследований поперечных срезов (микрошлифов) пористого карбида кремния, полученного электрохимическим травлением на подложках 6H-SiC. Между порой (пустотой) и не подвергшимся травлению материалом карбида кремния выявлен промежуточный слой, состоящий из нарушенной области, включающей в себя двумерные дефекты, и полностью аморфная часть. Слой эпитаксиального карбида кремния непосредственно в месте контакта с пористым слоем сохраняет избыток углерода. Авторами [40] проведен анализ таких показателей и характеристик образцов керамики из пористого карбида кремния: морфология, физическая фаза, скорость потери массы, плотность, пористость, прочность на изгиб и стойкость к тепловому удару. Пористая керамика карбида кремния изготавливалась смешением промышленного порошка кремния и фенольной смолы бария. Образцы керамики, спекаемые в вакууме, обладают лучшей прочностью на изгиб и пористостью, в то время как образцы керамики, спекаемые в атмосфере с инертным газом (аргон Ar), имеют более высокую чистоту и высокое значение ударной вязкости. В работе [41] получены SiC-структуры с пористостью от 20 до 60% с использованием двух методов: эмульгирования и литья под давлением. Эмульгирование приводит к получению изотропных материалов со связанными пораами, а литье под давлением может использоваться для изготовления высокоанизотропных материалов с характерной многослойной архитектурой. Спекание в жидком состоянии (с добавками Al₂O₃ и Y₂O₃As) при 1800 °C на порошке SiC/Al₂O₃ обеспечивает оптимальное уплотнение для пористых структур. Материалы, полученные литьем под давлением с контролируемой смесью микро- и наночастиц, демонстрируют более высокую степень сжатия.

ПОЛУЧЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

Значительных успехов в исследовании вопроса получения мелкодисперсного карбида кремния достигли ученые Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, которыми разработана технология синтеза карбида кремния в электротермическом псевдооживленном слое (ЭТПС). Разработанная автоматизированная экспериментальная установка с реактором ЭТПС (внутренний диаметр

реактора 180 мм, напряжение на электродах ДС 0–200 В, электрический ток до 150 А) [42] состоит из следующих составных частей (рисунок 4):

- реакторный блок;
- система газораспределения и продувки всех узлов установки;
- система вывода и утилизации образующихся газообразных продуктов;
- система газового анализа;
- системы подачи в реактор исходных материалов и вывода твердых продуктов;
- система измерения температуры;
- регулируемый источник электропитания;
- система автоматизированного управления и контроля.

Принцип работы реактора ЭТПС заключается в создании электротермического кипящего слоя из смеси углеродного восстановителя С и мелкодисперсных частиц диоксида кремния SiO₂ заданного массового состава (рисунок 5).

В условиях ЭТПС протекают электрические, тепловые и химические процессы, совокупность которых приводит к определенным особенностям образования промежуточных соединений и конечных продуктов. Метод получения мелкодисперсного карбида кремния карботермическим восстановлением кремнезёма посредством технологии ЭТПС предполагает следующую последовательность стадий. В реактор загружается исходное количество мелкодисперсных частиц углеродного восстановителя с заданным распределением частиц по размерам (фракционным составом). В процессе вывода реактора на рабочий температурный режим (1400–1800 °C) в нижнюю его часть через газораспределительную решетку со строго заданной скоростью подводится инертный газ для образования кипящего слоя частиц, а затем подается электрический потенциал на электроды. После достижения рабочего значения температуры в кипящем слое и прокалики исходного углеродного восстановителя в реактор подаются мелкодисперсные частицы диоксида кремния. На поверхности нагретых частиц прокаленного углеродного восстановителя протекают химические реакции с образованием карбида кремния. При этом частицы увеличиваются в весе, опускаются в нижнюю часть реактора и выводятся из реактора при помощи устройства для выгрузки. Продолжительность процесса определяется таким образом, чтобы весь кварцевый песок прореагировал с образованием карбида кремния. Устойчивая работа реактора ЭТПС позволяет довести концентрацию образования карбида кремния в шихте до 50–60% мас., после чего продукт выгружается и подлежит декарбонизации. Энергетическая эффективность данного метода возрастает с увеличением масштаба установки за счет снижения относительной величины потерь теплоты в окружающую среду [42–46].



Рисунок 4. Экспериментальная установка с реактором ЭТПС [42]

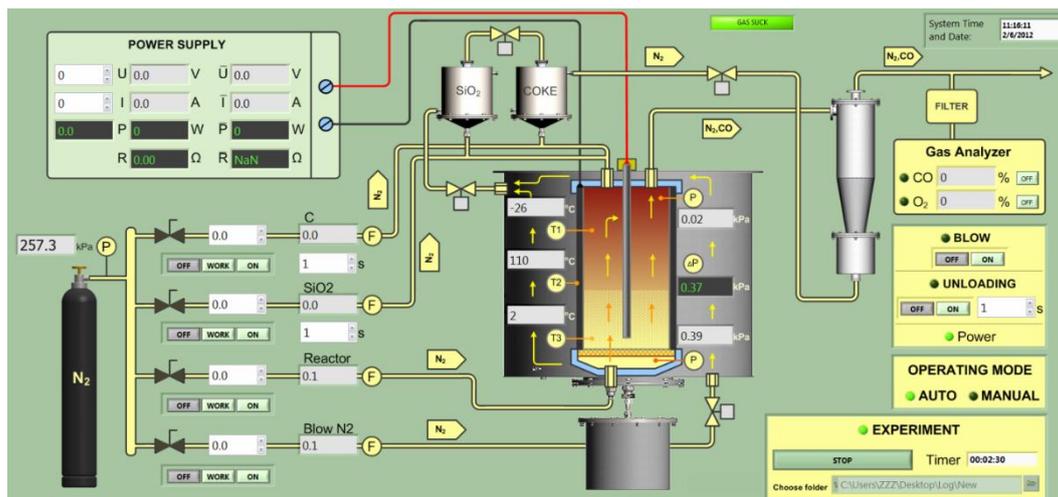


Рисунок 5. Мнемосхема управления установкой ЭТПС, выводимая на дисплей ПК [42]

Институтом газа НАН Украины совместно с Институтом тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси и Национальным научным центром «Харьковский физико-технический институт» проводятся исследования, направленные на развитие технологического метода получения мелкодисперсного карбида кремния в реакторе электротермического псевдооживленного слоя для карботермического восстановления кремнезёма, капсулированного углеродом повышенной чистоты [47, 48]. Экспериментально подтверждено принципиальную возможность получения карбида кремния из кремнезема, капсулированного пироуглеродом [49, 50]. Полученный карбид кремния практически не содержит примесей. Дальнейшие исследования направлены на изучение возможности использования полученного карбида крем-

ния для создания толерантного ядерного топлива. Также данными научно-исследовательскими учреждениями и организациями, совместно с Национальным авиационным университетом и Сумским государственным университетом планируется проведение исследований возможности использования полученного карбида кремния в аэрокосмической технике и других отраслях промышленности.

Выводы

Повышение мирового спроса на карбид кремния стимулирует развитие новых технологий его получения. Исследования по получению мелкодисперсного, пористого и наноразмерного карбида кремния проводятся в ведущих научно-исследовательских институтах и организациях мира. Промышленным методом получение карбида кремния до сих пор является кар-

ботермическое восстановление, предложенное Ачесоном в XIX веке, который основан на восстановлении SiO₂ углеродом в крупнотоннажных электрических печах. Данный метод характеризуется низкой чистотой готового продукта, значительным объемом ручного труда, а также невозможностью получения порошкового готового продукта. Более современные методы характеризуются высокими энергозатратами, токсичностью при использовании силанов, технической сложностью при применении плазменных технологий, а также низкой производительностью при получении наночастиц SiC.

Одним из перспективных способов получения карбида кремния является карботермическое восстановление капсулированного пироуглеродом кремнезема в реакторах с ЭТПС. Благодаря получению пироуглерода из газовой фазы обеспечивается высокая чистота полученного карбида кремния. Равномерное распределение температур в псевдооживленном слое и максимальный контакт фаз «SiO₂-C» повышает выход готового продукта. Генерация теплоты непосредственно внутри реактора с ЭТПС позволяет снизить тепловые и как следствие энергетические затраты.

Статья подготовлена в рамках международного научно-исследовательского проекта (совместный конкурс НАН Украины – НАН Беларуси) «Разработка и исследование энергоэффективной инновационной технологии синтеза мелкодисперсного карбида кремния с повышенной степенью чистоты в электротермическом кипящем слое» (№ госрегистрации: 0120U101740) и прикладных научно-исследовательских работ «Создание новых гранулированных материалов для ядерного топлива и катализаторов в активной гидродинамической среде» (МОН Украины, № госрегистрации: 0120U102036).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А.А. О сравнении радиационной стойкости кремния и карбида кремния. – Физика и техника полупроводников [Текст] / А.А. Лебедев, В.В. Козловский // 2014, том 48, вып. 10. – С. 1329–1331.
2. Hrubcína L. Исследование радиационной стойкости Si- и SiC- детекторов на пучке ионов Хе. [Текст] / L. Hrubcína, Ю.Б. Гурова, В. Zaf'kob, О.М. Иванова, С.В. Митрофанова, С.В. Розова, В.Г. Сандуковский, В.А. Семина, В.А. Скуратова // Приборы и техника эксперимента. – 2018, № 6. – С. 5–7.
3. Cozzo C. SiC Cladding Thermal Conductivity Requirements for Normal Operation and LOCA Conditions. [Текст] / C. Cozzo // Prog. Nucl. Eng. 2018, 106, P. 278–283.
4. Гребенник В.Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направления развитие атомной энергетики [Текст] / В.Н. Гребенник, Н.Е. Кухаркин, Н.Н. Пономарев-Степной // М.: Энергоатомиздат. 2008. – 136 с.
5. Ahn K. Safety Evaluation of Silicon Carbide and Zircaloy-4 Cladding during a Large-Break Loss-of-Coolant Accident [Текст] / K. Ahn, K. Joo, S.P. Park // Energies. 2018, 11, 3324. – 13 p. <https://doi.org/10.3390/en11123324>
6. Silicon Carbide Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Black & Green), By Application (Steel, Automotive, Aerospace, Military & Defense), By Region, And Segment Forecasts, 2020–2027. [Текст] Grand View Research is registered in the State of California at Grand View Research, Inc. San Francisco. 2020. – 94 p.
7. Cheung R. Silicon carbide microelectromechanical systems for harsh environments [Текст] / R. Cheung // Imperial College Press. 2006. – 181 p.
8. Takahiro Muranaka. Superconductivity in carrier-doped silicon carbide [Текст] / Takahiro Muranaka, Yoshitake Kikuchi, Taku Yoshizawa, Naoki Shirakawa, Jun Akimitsu // Science and Technology of Advanced Materials. Volume 9. 2008. – P. 4–8. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/4/044204>
9. Хенит Г. Карбид кремния [Текст] / Г. Хенита, Р. Рол // пер. с англ.; М. Мир: 1972. – 349 с.
10. Pat. No. 17911 Great Britain. Synthese von SiC während des Schmelzprozesses. von Kohlenstoff und Aluminiumsilikaten. 1892.
11. Pat. No. 492767 US. Production of artificial crystalline carbonaceous materials / E.G. Acheson // Applicant and patent holder: E.G. Acheson, Assingor to the carborundum company. applic. date: 10.05.1892; publ. date: 28.02.1893.
12. Агеев О.А. Карбид кремния: технология, свойства, применения [Текст] / О.А. Агеев, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, В.С. Киселев, Р.В. Конакова, А.А. Лебедев, В.В. Миленин, О.Б. Охрименко, В.В. Поляков, А.М. Светличный, Д.И. Чередниченко / Под общей редакцией член-корр. НАНУ, д.ф.-м.н., проф. Беляева А.Е., д.т.н., проф. Конаковой Р.В. // Харьков: «ИСМА». 2010. – 532 с.
13. Parmentier J. Formation of SiC via carbothermal reduction of a carbon –containing MCM-48 silica phase: a new route to produce high surface area SiC [Текст] / J. Parmentier et al. // Ceramics International, V.28, Issue 1, 2002. – P. 1–7.
14. Coune G. and all, High porosity SiC prepared via a process involving an SHS stage [Текст] / G. Coune and all // Journal of the European Ceramic Society, Vol.23, Issue 11, 2003. – P. 1949–1956.
15. Yanjie Su. Carbon nanomaterials synthesized by arc discharge hot plasma [Текст] / Yanjie Su, Yafei Zhang // Carbon, Vol. 83. 2015. – P. 90–99.
16. Jieshan Qiu. Synthesis of carbon-encapsulated nickel nanocrystals by arc-discharge of coal-based carbons in water [Текст] / Jieshan Qiu, Yongfeng Li, Yunpeng Wang, Zongbin Zhao, Ying Zhou, Yanguo Wang // Fuel, Vol. 83. 2004. – P. 615–617.
17. Jiang Zhao, Yanjie Su, Zhi Yang, Liangming Wei, Ying Wang, Yafei Zhang. Arc synthesis of double-walled carbon nanotubes in low pressure air and their superior field emission properties // Carbon. 2013. Vol. 58. – P. 92–98.
18. Yanjie Su. Low-cost synthesis of single-walled carbon-nanotubes by low-pressure air arc discharge [Текст] / Yanjie Su, Hao Wei, Tongtong Li, Huijuan Geng, Yafei Zhang // Materials Research Bulletin. 2014. – P. 23–24.
19. Пак А.Я. Электродуговой синтез и очистка от углеродных примесей кубического карбида кремния в воздушной атмосфере [Текст] / А.Я. Пак, М. А. Рудмин, Г.Я. Мамонтов, О.А. Болотникова // Сверхтвердые материалы, № 3. 2018. – С. 3–12.

20. Пак А.Я. Влияние энергии на фазовый состав продукта безвакуумного электродугового карбида кремния [Текст] / А.Я. Пак, Г.Я. Мамонтов, О.А. Болотникова // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, Т. 19, № 2. 2018. – С. 165–176.
21. Кокорина А.И. Электродуговой синтез карбида кремния и получение высоконаполненного металломатричного композита на его основе [Электрон. текстовые дан.] / А.И. Кокорина, А.Я. Пак // Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий: сборник тезисов V Всероссийского научного семинара, 5–6 декабря 2019, Томск. – С. 37–38.
22. Андриевский Р.А. Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура, свойства [Текст] / Р.А. Андриевский // Успехи химии, № 78(9). 2009. – С. 889–900.
23. Севастьянов В.Г. Влияние природы прекурсоров высокодисперсного углерода на морфологию наночастиц карбида кремния [Текст] / В.Г. Севастьянов, Р.Г. Павелко, Н.Т. Кузнецов // Химическая технология, Т. 1. 2007. – С. 12–17.
24. Павелко Р.Г. Синтез высокодисперсных форм карбида кремния [Текст]: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.01: защищена 24.05.2007 / Павелко Роман Георгиевич. – М.: 2007. – 222 с.
25. Московских Д.О. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез нанопорошков карбида кремния [Текст] / Д.О. Московских, А.С. Мукасян, А.С. Рогачев // Доклады Академии Наук. 2013. – Т. 449. – № 2. – С. 1–4.
26. Сафаева Д.Р., Титова Ю.В., Майдан Д.А. Получение карбида кремния по азидной технологии с использованием различных источников углерода [Текст] / Д.Р. Сафаева, Ю.В. Титова, Д.А. Майдан // Современные материалы, техника и технологии, № 6(14). 2017. – С. 129–133.
27. Кондратьева Л. А. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошков нитридных композиций Si₃N₄-TiN, Si₃N₄-AlN, Si₃N₄-BN, AlN-BN, AlN-TiN, BN-TiN с применением азидов натрия и галоидных солей [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 01.04.17: защищена: 28.09.2018 / Кондратьева, Людмила Александровна. Самара: 2018. – 881 с.
28. Сивков А.А. Прямой плазмодинамический синтез ультра-дисперсного карбида кремния [Текст] / А.А. Сивков, Д.С. Никитин, А.Я. Пак, И.А. Рахматуллин // Письма в ЖТФ, Том 39. Вып. 2. 2013. – С.15–20.
29. Сивков А.А. Получение ультрадисперсного кристаллического карбида кремния методом плазмодинамического синтеза [Текст] / А.А. Сивков, Д.С. Никитин, А.Я. Пак, И.А. Рахматуллин // Сверхтвердые материалы, № 3. 2013. – С. 11–18.
30. Никитин Д.С. Плазмодинамический синтез нанодисперсного карбида кремния и возможность изменения характеристик продукта [Текст] / Д.С. Никитин, А.А. Сивков / Вектор науки ТГУ, №3. 2013. – С. 80–82.
31. Никитин Д.С. Плазмодинамический синтез нанодисперсного карбида кремния и управление составом продукта [Текст] / Д.С. Никитин // Материалы XX Международной научно-практической конференции: «Современные техника и технологии» Секция 6: Материаловедение. 2014. – С. 71–72.
32. Manuel Alejandro Perez-Guzman. Growth and Self-Assembly of Silicon-Silicon Carbide Nanoparticles into Hybrid Worm-Like Nanostructures at the Silicon Wafer Surface [Текст] / Manuel Alejandro Perez-Guzman, Rebeca Ortega-Amaya, Yasuhiro Matsumoto, Andres Mauricio Espinoza-Rivas, Juan Morales-Corona, Jaime Santoyo-Salazar, Mauricio Ortega-Lopez // Nanomaterials, No. 8 (954). 2018. – P. 47–56. <https://doi.org/10.3390/nano8110954>
33. Liu, R. Large-scale synthesis of monodisperse SiC nanoparticles with adjustable size, stoichiometric ratio and properties by fluidized bed chemical vapor deposition [Текст] / R. Liu, M. Liu, J. Chang // Journal of Nanoparticle Research, No. 19. 2017. – P. 42–48. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3737-y>
34. Mita Dasog. Low temperature synthesis of silicon carbide nanomaterials using a solid-state method [Текст] / Mita Dasog, Larissa F. Smith, Tapas K. Purkait, Jonathan G. C. Veinot // Chemical Communication, No. 49. 2013. – P. 7004–7006. <https://doi.org/10.1039/c3cc43625j>
35. Ivanov P.A. Effective Carrier Concentration in Porous Silicon Carbide [Текст] / P.A. Ivanov, M.G. Mynbaeva, S.E. Sadow // Semicond. Sci. Technol., Vol. 19, No 3. 2004. – P. 319–322.
36. Matsumoto T. Blue-Green Luminescence from Porous Silicon Carbide [Текст] / T. Matsumoto, J. Takahashi, T. Tamaki, T. Furtagi // Applied Physics Letter, Vol. 64(2). 1994. – P. 226–228. <https://doi.org/10.1063/1.111979>
37. Shor J.S. Direct observation of porous SiC formed by anodization in HF [Текст] / J.S. Shor, J. Grinerg, B.Z. Weiss., A.D. Kzurz // Applied Physics Letters, Vol. 62. 1993 – P. 2836–2838.
38. Светличная П.А. Получение и свойства пористого карбида кремния [Текст] / П.А. Светличная, Н.Н. Московченко, П.В. Серба // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, № 1. 2005.– С. 53–57.
39. Сорокин Л.М. Особенности структуры пористого карбида кремния, полученного электрохимическим травлением наложках 6H-SiC [Текст] / Л.М. Сорокин, Н.С. Савкина, В.Б. Шуман, А.А. Лебедев, Г.Н. Мосина, Дж. Хатчисон // Письма в ЖТФ, Том 28, вып. 22. 2002. – С. 23–31.
40. Hongsheng. Influence of sintering atmosphere on the performance of porous silicon carbide ceramics [Текст] / Hongsheng, Kaihong Zhang, Ziqiang Li, Xiaoxue Liu // Proceedings 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology. 2016. – P. 150–155.
41. Ferraro, C., Garcia-Tunon, E., Barg, S., Miranda, M., Ni, N., Bell, R., Saiz, E. SiC porous structures obtained with innovative shaping technologies. [Текст] / C. Ferraro, E. Garcia-Tunon, S. Barg, M. Miranda, N. Ni, R. Bell, E. Saiz // Journal of the European Ceramic Society, Vol. 38, Issue 3. 2018. – P. 823–835. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.09.048>
42. Бородуля В.А., Виноградов Л.М., Гребеньков А.Ж., Михайлов А.А. Синтез карбида кремния в электротермическом реакторе с кипящим слоем углеродных частиц [Текст] / В.А. Бородуля, Л.М. Виноградов, А.Ж. Гребеньков, А.А. Михайлов // Горение и плазмохимия, Т. 13, № 2. 2015. – С. 92–102.
43. Бородуля В.А. Карботермический синтез пористых порошков карбида кремния в реакторе электротермического кипящего слоя и перспективы его использования в полимерных композитах [Текст] / В.А. Бородуля, Л.М. Виноградов, А.Ж. Гребеньков, В.И. Дубкова, А.А. Михайлов, Т.И. Пинчук // Материалы 6-го Меж-

- дународного симпозиума «Пористые проницаемые материалы и технологии и изделия на их основе». 19–20 октября 2017 г., Минск. – С. 524–538.
44. Бородуля В.А. Синтез карбидокремниевых порошковых материалов карботермическим восстановлением кремнезема в реакторе электротермического кипящего слоя [Текст] / В.А. Бородуля, Л.М. Виноградов, А.Ж. Гребеньков, А.А. Михайлов // Сборник научных статей «Порошковая металлургия в Беларуси: Вызовы времени». 2017. – С. 357–366.
 45. Дубкова В.И., Наночастицы мелкодисперсного карбида кремния полученного в электротермическом кипящем слое – структурный модификатор термопластичных полимеров [Текст] / В.И. Дубкова, В.А. Бородуля, Л.М. Виноградов, С.М. Данилова-Третьяк, Л.Е. Евсеева., Т.И. Пинчук // ИФЖ, Том 92, № 5. 2019. – С. 2291–2305.
 46. Евразийский патент ЕА № 027539, МПК С01В 31/36 (2006.01), С01В 31/00 (2006.01), В01J 8/00 (2006.01). Способ и установка для получения карбида кремния / В.А. Бородуля, Л.М. Виноградов, А.Ж. Гребеньков, А.А. Михайлов; заявитель и собственник патента: Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси». – № 20150055; заявл. 07.05.2015; опубл. 31.08.2017.
 47. Пат. 146598 Україна, МПК С23С16/26. Спосіб одержання піровуглецю / К.В. Сімейко, В.О. Бородуля, С.Ю. Саєнко, К.В. Лобач, О.П. Кожан, В.М. Дмитрієв М.А. Сидоренко, Я.О. Івачкін, О.В. Марасін, С.С. Кустовський, Р.Є. Чумак; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. – № у 202006806; заявл. 22.10.2020; опубл. 04.03.2021.
 48. Пат. 133969 Україна, МПК (2019.01) С04В 3500, С04В 35/56 (2006.01) С01В 32/956 (2017.01). Спосіб одержання карбїду кремнію / К.В. Сімейко, Б.І. Бондаренко, В.А. Бородуля, Л.М. Виноградов, А.Ж. Гребеньков, О.П. Кожан, В.М. Дмитрієв, В.С. Рябчук, М.А. Сидоренко, І.О. Писаренко; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. – № у 201811907; заявл. 3.12.2018; опубл. 25.04.2019.
 49. Семейко К.В. Развитие некоторых сопутствующих технологий ядерных реакторов с газовым теплоносителем IV поколения / К.В. Семейко // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 2019. – Выпуск 3 (79). – С. 24–29.
 50. Сімейко К.В. Науково-технологічні основи високотемпературних процесів у електротермічному псевдо-зрідженому шарі. дис. ... докт. техн. наук. 05.17.08, захищена 26.03.2021 / Сімейко Костянтин Віталійович. Львів, 2021. – 391 с.
 51. Cozzo C. SiC Cladding Thermal Conductivity Requirements for Normal Operation and LOCA Conditions. [Текст] / C. Cozzo // Prog. Nucl. Eng. 2018, 106, P. 278–283.
 52. Grebennik V.N. Vysokotemperaturnye gazookhlazhdaemye reaktory – innovatsionnoe napravleniya razvitiya atomnoy energetiki [Текст] / V.N. Grebennik, N.E. Kikharkin, N.N. Ponomarev-Stepnoy // М.: Energoatomizdat. 2008. – 136 p.
 53. Ahn K. Safety Evaluation of Silicon Carbide and Zircaloy-4 Cladding during a Large-Break Loss-of-Coolant Accident [Текст] / K. Ahn, K. Joo, S.P. Park // Energies. 2018, 11, 3324. – 13 p. <https://doi.org/10.3390/en11123324>
 54. Silicon Carbide Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Black & Green), By Application (Steel, Automotive, Aerospace, Military & Defense), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027. [Текст] Grand View Research is registered in the State of California at Grand View Research, Inc. San Francisco. 2020. – 94 p.
 55. Cheung R. Silicon carbide microelectromechanical systems for harsh environments [Текст] / R. Cheung // Imperial College Press. 2006. – 181 p.
 56. Takahiro Muranaka. Superconductivity in carrier-doped silicon carbide [Текст] / Takahiro Muranaka, Yoshitake Kikuchi, Taku Yoshizawa, Naoki Shirakawa, Jun Akimitsu // Science and Technology of Advanced Materials. Volume 9. 2008. – P. 4–8. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/4/044204>
 57. Khenit G. Karbid kremniya [Текст] / G. Khenita, R. Rol // transl. from english.; Moscow. Mir: 1972. – 349 p.
 58. Pat. No. 17911 Great Britain. Synthese von SiC während des Schmelzprozesses. von Kohlenstoff und Aluminiumsilikaten. 1892.
 59. Pat. No. 492767 US. Production of artificial crystalline carbonaceous materials / E.G. Acheson // Applicant and patent holder: E.G. Acheson, Assingor to the carborundum company. applic. date: 10.05.1892; publ. date: 28.02.1893.
 60. Ageev O.A. Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primeneniya [Текст] / O.A. Ageev, A.E. Belyaev, N.S. Boltovets, V.S. Kiselev, R.V. Konakova, A.A. Lebedev, V.V. Milenin, O.B. Okhrimenko, V.V. Polyakov, A.M. Svetlichnyy, D.I. Cherednichenko / Pod obshchey redaktsiyey chlen-korr. NANU, d.f.-m.n., prof. Belyaeva A.E., d.t.n., prof. Konakovoy R.V. // Khar'kov: "ISMA". 2010. – 532 p.
 61. Parmentier J. Formation of SiC via carbothermal reduction of a carbon-containing MCM-48 silica phase: a new route to produce high surface area SiC [Текст] / J. Parmentier et al. // Ceramics International, V.28, Issue 1, 2002. – P. 1–7.
 62. Coune G. and all, High porosity SiC prepared via a process involving an SHS stage [Текст] / G. Coune and all // Journal of the European Ceramic Society, Vol. 23, Issue 11, 2003. – P. 1949–1956.
 63. Yanjie Su. Carbon nanomaterials synthesized by arc discharge hot plasma [Текст] / Yanjie Su, Yafei Zhang // Carbon, Vol. 83. 2015. – P. 90–99.
 64. Jieshan Qiu. Synthesis of carbon-encapsulated nickel nanocrystals by arc-discharge of coal-based carbons in water [Текст] / Jieshan Qiu, Yongfeng Li, Yunpeng Wang, Zongbin Zhao, Ying Zhou, Yanguo Wang // Fuel, Vol. 83. 2004. – P. 615–617.

REFERENCES

17. Jiang Zhao, Yanjie Su, Zhi Yang, Liangming Wei, Ying Wang, Yafei Zhang. Arc synthesis of double-walled carbon nanotubes in low pressure air and their superior field emission properties // Carbon. 2013. Vol. 58. – P. 92–98.
18. Yanjie Su. Low-cost synthesis of single-walled carbon-nanotubes by low-pressure air arc discharge [Tekst] / Yanjie Su, Hao Wei, Tongtong Li, Huijuan Geng, Yafei Zhang // Materials Research Bulletin. 2014. – P. 23–24.
19. Pak A.Ya. Elektrodugovoy sintez i ochildka ot uglerodnykh primesey kubicheskogo karbida kremniya v vozdushnoy atmosfere [Tekst] / A.Ya. Pak, M. A. Rudmin, G.Ya. Mamontov, O.A. Bolotnikova // Sverkhverdye materialy, No. 3. 2018. – P. 3–12.
20. Pak A.Ya. Vliyaniye energii na fazovyy sostav produkta bezvakuumnogo elektrodugovogo karbida kremniya [Tekst] / A.Ya. Pak, G.Ya. Mamontov, O.A. Bolotnikova // Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya, Vol. 19, No. 2. 2018. – P. 165–176.
21. Kokorina A.I. Elektrodugovoy sintez karbida kremniya i poluchenie vysokonapolennogo metallomatrichnogo kompozita na ego osnove [Elektron. tekstovye dan.] / A.I. Kokorina, A.Ya. Pak // Mezhdistsiplinarnyye problemy additivnykh tekhnologiy: sbornik tezisov V Vserossiyskogo nauchnogo seminaru, 5–6 dekabrya 2019, Tomsk. – P. 37–38.
22. Andrievskiy R.A. Nanorazmernyy karbid kremniya: sintez, struktura, svoystva [Tekst] / R.A. Andrievskiy // Uspekhi khimii, No. 78(9). 2009. – P. 889–900.
23. Sevast'yanov V.G. Vliyaniye prirody prekursorov vysokodispersnogo ugleroda na morfologiyu nanochastits karbida kremniya [Tekst] / V.G. Sevast'yanov, R.G. Pavelko, N.T. Kuznetsov // Khimicheskaya tekhnologiya, Vol. 1. 2007. – P. 12–17.
24. Pavelko R.G. Sintez vysokodispersnykh form karbida kremniya [Tekst] : dis. ... kand. khim. nauk: 02.00.01: zashchishchena 24.05.2007 / Pavelko Roman Georgievich. – Moscow.: 2007. – 222 p.
25. Moskovskikh D.O. Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyy sintez nanoporoshkov karbida kremniya [Tekst] / D.O. Moskovskikh, A.S. Mukas'yan, A.S. Rogachev // Doklady Akademii Nauk. 2013. – Vol. 449. – No. 2. – P. 1–4.
26. Safaeva D.R., Titova Yu.V., Maydan D.A. Poluchenie karbida kremniya po azidnoy tekhnologii s ispol'zovaniem razlichnykh istochnikov ugleroda [Tekst] / D.R. Safaeva, Yu.V. Titova, D.A. Maydan // Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii, No. 6(14). 2017. – P. 129–133.
27. Kondrat'eva L. A. Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyy sintez poroshkov nitridnykh kompozitsiy Si₃N₄-TiN, Si₃N₄-AlN, Si₃N₄-BN, AlN-BN, AlN-TiN, BN-TiN s primeneniem azida natriya i galoidnykh soley [Tekst]: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 01.04.17: zashchishchena: 28.09.2018 / Kondrat'eva, Lyudmila Aleksandrovna. Samara: 2018. – 881 p.
28. Sivkov A.A. Pryamoy plazmodinamicheskiy sintez ul'tradispersnogo karbida kremniya [Tekst] / A.A. Sivkov, D.S. Nikitin, A.Ya. Pak, I.A. Rakhmatullin // Pis'ma v ZhTF, Vol. 39. Issue 2. 2013. – P.15–20.
29. Sivkov A.A. Poluchenie ul'tradispersnogo kristallicheskogo karbida kremniya metodom plazmodinamicheskogo sinteza [Tekst] / A.A. Sivkov, D.S. Nikitin, A.Ya. Pak, I.A. Rakhmatullin // Sverkhverdye materialy, No. 3. 2013. – P. 11–18.
30. Nikitin D.S. Plazmodinamicheskiy sintez nanodispersnogo karbida kremniya i vozmozhnost' izmeneniya kharakteristik produkta [Tekst] / D.S. Nikitin, A.A. Sivkov / Vektor nauki TGU, No. 3. 2013. – P. 80–82.
31. Nikitin D.S. Plazmodinamicheskiy sintez nanodispersnogo karbida kremniya i upravlenie sostavom produkta [Tekst] / D.S. Nikitin // Materialy XKh Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: «Sovremennyye tekhnika i tekhnologii» Sektsiya 6: Materialovedenie. 2014. – P. 71–72.
32. Manuel Alejandro Perez-Guzman. Growth and Self-Assembly of Silicon–Silicon Carbide Nanoparticles into Hybrid Worm-Like Nanostructures at the Silicon Wafer Surface [Tekst] / Manuel Alejandro Perez-Guzman, Rebeca Ortega-Amaya, Yasuhiro Matsumoto, Andres Mauricio Espinoza-Rivas, Juan Morales-Corona, Jaime Santoyo-Salazar, Mauricio Ortega-Lopez // Nanomaterials, No. 8 (954). 2018. – P. 47–56. <https://doi.org/10.3390/nano8110954>
33. Liu, R. Large-scale synthesis of monodisperse SiC nanoparticles with adjustable size, stoichiometric ratio and properties by fluidized bed chemical vapor deposition [Tekst] / R. Liu, M. Liu, J. Chang // Journal of Nanoparticle Research, No. 19. 2017. – P. 42–48. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3737-y>
34. Mita Dasog. Low temperature synthesis of silicon carbide nanomaterials using a solid-state method [Tekst] / Mita Dasog, Larissa F. Smith, Tapas K. Purkait, Jonathan G. C. Veinot // Chemical Communication, No. 49. 2013. – P. 7004–7006. <https://doi.org/10.1039/c3cc43625j>
35. Ivanov P.A. Effective Carrier Concentration in Porous Silicon Carbide [Tekst] / P.A. Ivanov, M.G. Mynbaeva, S.E. Sadow // Semicond. Sci. Technol., Vol. 19, No. 3. 2004. – P. 319–322.
36. Matsumoto T. Blue-Green Luminescence from Porous Silicon Carbide [Tekst] / T. Matsumoto, J. Takahashi, T. Tamaki, T. Furtagi // Applied Physics Letter, Vol. 64(2). 1994. – P. 226–228. <https://doi.org/10.1063/1.111979>
37. Shor J.S. Direct observation of porous SiC formed by anodization in HF [Tekst] / J.S. Shor, J. Grinerg, B.Z. Weiss., A.D. Kzurz // Applied Physics Letters, Vol. 62. 1993 – P. 2836–2838.
38. Svetlichnaya P.A. Poluchenie i svoystva poristogo karbida kremniya [Tekst] / P.A. Svetlichnaya, N.N. Moskovchenko, P.V. Serba // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature, No. 1. 2005.– P. 53–57.
39. Sorokin L.M. Osobennosti struktury poristogo karbida kremniya, poluchennogo elektrokhimicheskim travlenim na polozhkakh 6H-SiC [Tekst] / L.M. Sorokin, N.S. Savkina, V.B. Shuman, A.A. Lebedev, G.N. Mosina, Dzh. Khatchison // Pis'ma v ZhTF, Vol. 28, Issue 22. 2002. – P. 23–31.
40. Hongsheng. Influence of sintering atmosphere on the performance of porous silicon carbide ceramics [Tekst] / Hongsheng, Kaihong Zhang, Ziqiang Li, Xiaoxue Liu // Proceedings 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology. 2016. – P. 150–155.
41. Ferraro, C., Garcia-Tunon, E., Barg, S., Miranda, M., Ni, N., Bell, R., Saiz, E. SiC porous structures obtained with innovative shaping technologies. [Tekst] / C. Ferraro, E. Garcia-Tunon, S. Barg, M. Miranda, N. Ni, R. Bell, E. Saiz // Journal of the European Ceramic Society, Volume 38, Issue 3. 2018. – P. 823–835. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.09.048>

42. Borodulya V.A., Vinogradov L.M., Greben'kov A.Zh., Mikhaylov A.A. Sintez karbida kremniya v elektrotermicheskom reaktore s kipyashchim sloem uglerodnykh chastits [Tekst] / V.A. Borodulya, L.M. Vinogradov, A.Zh. Greben'kov, A.A. Mikhaylov // Gorenje i plazmohimiya, Vol. 13, No. 2. 2015. – P. 92–102.
43. Borodulya V.A. Karbotermicheskiy sintez poristyykh poroshkov karbida kremniya v reaktore elektrotermicheskogo kipyashchego sloya i perspektivy ego ispol'zovaniya v polimernykh kompozitakh [Tekst] / V.A. Borodulya, L.M. Vinogradov, A.Zh. Greben'kov, V.I. Dubkova, A.A. Mikhaylov, T.I. Pinchuk // Materialy 6-go Mezhdunarodnogo simpoziuma «Poristye pronitsaemye materialy i tekhnologii i izdeliya na ikh osnove». 19–20 oktyabrya 2017 g., Minsk. – P. 524–538.
44. Borodulya V.A. Sintez karbidokremnievykh poroshkovykh materialov karbotermicheskim vosstanovlenie kremnezema v reaktore elektrotermicheskogo kipyashchego sloya [Tekst] / V.A. Borodulya, L.M. Vinogradov, A.Zh. Greben'kov, A.A. Mikhaylov // Sbornik nauchnykh statey «Poroshkovaya metallurgiya v Belarusi: Vyzovy vremeni». 2017. – P. 357–366.
45. Dubkova V.I., Nanochastitsy melkdispersnogo karbida kremniya poluchennogo v elektrotermicheskom kipyashchem sloe – strukturnyy modifikator termoplastichnykh polimerov [Tekst] / V.I. Dubkova, V.A. Borodulya, L.M. Vinogradov, S.M. Danilova-Tret'yak, L.E. Evseeva., T.I. Pinchuk // IFZh, Vol. 92, No. 5. 2019. – P. 2291–2305.
46. Evraziyskiy patent EA № 027539, MPK S01V 31/36 (2006.01), S01V 31/00 (2006.01), B01J 8/00 (2006.01). Sposob i ustanovka dlya polucheniya karbida kremniya / V.A. Borodulya, L.M. Vinogradov, A.Zh. Greben'kov, A.A. Mikhaylov; zayavitel' i sobstvennik patenta: Gosudarstvennoe nauchnoe uchrezhdenie «Institut teplo- i masoobmena im. A.V. Lykova Natsional'noy akademii nauk Belarusi». – No. 20150055; zayavl. 07.05.2015; opubl. 31.08.2017.
47. Pat. 146598 Ukraïna, MPK C23C16/26. Sposib oderzhannya pirovugletsyu / K.V. Simeiko, V.O. Borodulya, S.Yu. Saenko, K.V. Lobach, O.P. Kozhan, V.M. Dmitriev M.A. Sidorenko, Ya.O. Ivachkin, O.V. Marasin, S.S. Kustovskiy, R.С. Chumak; zayavnik i patentovlasnik: Institut gazu NAN Ukraïni. – No. u 202006806; zayavl. 22.10.2020; opubl. 04.03.2021.
48. Pat. 133969 Ukraïna, MPK (2019.01) C04B 3500, C04B 35/56 (2006.01) C01B 32/956 (2017.01). Sposib oderzhannya karbidu kremniyu / K.V. Simeiko, B.I. Bondarenko, V.A. Borodulya, L.M. Vinogradov, A.Zh. Greben'kov, O.P. Kozhan, V.M. Dmitriev, V.S. Ryabchuk, M.A. Sidorenko, I.O. Pisarenko; zayavnik i patentovlasnik: Institut gazu NAN Ukraïni. – No. u 201811907; zayavl. 3.12.2018; opubl. 25.04.2019.
49. Simeiko K.V. Razvitie nekotorykh soputstvuyushchikh tekhnologiy yadernykh reaktorov s gazovym teplonositelem IV pokoleniya / K.V. Simeiko // Vestnik Natsional'nogo yadernogo tsentra Respubliki Kazakhstan. – 2019. – No. 3 (79). – P. 24–29.
50. Simeiko K.V. Naukovo-tekhnologichni osnovi visokotemperaturnikh protsesiv u elektrotermichnomu psevdozridzhenomu shari. dis. ... dokt. tekhn. nauk. 05.17.08, zakhishchena 26.03.2021 / Simeiko Kostyantyn Vitaliyovich. L'viv, 2021. – 391 p.

КРЕМНИЙ КАРБИДІН ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ (ШОЛУ)

^{1,2)} К.В. Семейко, ³⁾ А.И. Малиновский, ³⁾ А.Ж. Гребеньков, ⁴⁾ С.Ю. Саенко,
⁴⁾ К.В. Лобач, ²⁾ А.Д. Кустовская, ⁵⁾ А.А. Ляпощенко, ⁵⁾ В.И. Склабинский

¹⁾ Украина ҰҒА Газ институты, Киев, Украина

²⁾ Ұлттық авиация университеті, Киев, Украина

³⁾ Беларусь ҰҒА А.В. Лыков атындағы Жылу және масса алмасу институты, Минск, Беларусь

⁴⁾ «Харьков физика-техника институты» ұлттық ғылыми орталығы, Харьков, Украина

⁵⁾ Сумы мемлекеттік университеті, Сумы, Украина

Мақалада өнеркәсіптік технологиялар мен кремний карбидін өндіру процестерін ғылыми зерттеу нәтижелеріне қысқаша шолу жасалады. Ұсақ дисперсті, кеуекті және наноөлшемді кремний карбидін алу бойынша зерттеулер әлемнің жетекші ғылыми-зерттеу институттары мен ұйымдарында жүргізіледі. Зерттеушілер алдында туындайтын ғылыми міндеттердің ішінде энергия шығынын азайтуды, өнеркәсіптік технологиялардың экологиялық қауіпсіздігін және дайын өнімнің тазалығын арттыруды атап өтуге болады. Кремний карбидін өндірудің келешек әдістерінің бірі – электротермиялық жалған сұйылтылған қабатпен реакторларда пирокөміртегімен капсулаланған кремнеземді карботермиялық қалпына келтіру.

Түйін сөздер: кремний карбиді, карботермиялық қалпына келтіру, наноматериалдар, төзімді ядролық отын, жаңа технологиялар.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES OF SILICON CARBIDE PRODUCING (REVIEW)

^{1,2)} K.V. Simeiko, ³⁾ A.I. Malinouski, ³⁾ A.Zh. Grebenkov, ⁴⁾ S.Yu. Sayenko,
⁴⁾ K.V. Lobach, ²⁾ A.D. Kustovska, ⁵⁾ O.O. Liaposhchenko, ⁵⁾ V.I. Sklabinskyi

¹⁾ *The Gas Institute of the NASU, Kyiv, Ukraine*

²⁾ *National Aviation University, Kyiv, Ukraine*

³⁾ *A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk, Belarus*

⁴⁾ *National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, Ukraine*

⁵⁾ *Sumy State University, Sumy, Ukraine*

The article provides a brief overview of industrial technologies and scientific research of the silicon carbide production process. Research on the production of finely dispersed, porous and nano-sized silicon carbide is carried out in leading scientific institutions of the world. The main scientific tasks currently facing researchers are to reduce energy consumption, increase the environmental safety of industrial technologies, improve purity of the finished product. One of the promising methods for producing silicon carbide is the carbothermal reduction of silica encapsulated with pyrocarbon in reactors with an electrothermal fluidized bed.

Keywords: *silicon carbide, carbothermal reduction, nanomaterials, tolerant nuclear fuel, new technologies.*