

Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 621.36:66.096.5

DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2019.03>

Семейко К.В., канд. техн. наук,
Ильенко Б.К., канд. техн. наук, **Сидоренко Н.А.**
Институт газа НАН Украины, Киев
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: k_simeyko@ukr.net

Применение техники электротермического псевдооживленного слоя для осуществления высокотемпературных технологических процессов (Обзор)

При реализации высокотемпературных процессов с подводом тепла в зону реакции (аллотермические процессы) невозможно или экономически нецелесообразно сжигание органического топлива для достижения необходимого уровня температур. Рассмотрены возможности реализации указанных процессов применением техники электротермического псевдооживленного слоя (ЭТПС). К числу таких процессов следует отнести, например, получение водорода пиролизом углеводородных газов, получение карбида кремния и других карбидов, получение искусственного графита и термическую очистку природного графита, высокотемпературный нагрев газов и газовых смесей. Указанные процессы могут осуществляться в диапазоне температур 600–3000 °С с использованием мелкодисперсных материалов либо непосредственно в газовой фазе с применением ЭТПС. В некоторых процессах технология ЭТПС может быть использована как источник получения высокотемпературного газа, применяемого либо для осуществления данного технологического процесса, либо для обеспечения функционирования технологического или теплотехнического оборудования. Рассмотрены основные конструктивные характеристики оборудования, обеспечивающие реализацию процессов в ЭТПС. *Библ. 37.*

Ключевые слова: высокотемпературные процессы и технологии, электротермический псевдооживленный слой.

Высокотемпературные технологические процессы широко применяются в промышленных производствах для получения целевого продукта из исходного сырьевого материала в процессе тепловой обработки. К ним относятся физи-

ческие, химические и массообменные процессы, обеспечивающие заданное превращение исходного сырья.

Указанные процессы реализуются на технологических установках с одно- или многозон-

ной высокотемпературной камерой и независимым источником тепловыделения (органическое или ядерное топливо, электроэнергия), в которых протекают процессы, связанные с тепловой подготовкой и переработкой исходного технологического сырья. К таким установкам также относятся оборудование для регенеративного использования энергетических отходов и утилизации вторичных энергетических ресурсов, вспомогательные механизмы и строительные элементы [1].

В статье на конкретных примерах показана целесообразность применения техники электротермического кипящего слоя для осуществления технологических процессов. Учитывая значительное тепловыделение, которым сопровождаются процессы горения, рассматриваются технологии и процессы, к которым невозможно либо технически сложно применить генерацию теплоты пламенем.

Применение водорода, получаемого пиролизом природного газа в реакторах с электротермическим псевдооживленным слоем

Водород широко применяется в промышленности, его мировое производство достигает 60 млн т/год. Одной из основных сфер его применения (около 50 %) является органический синтез, прежде всего производство аммиака — одного из самых многотоннажных промышленных продуктов. В нефтепереработке используется 35 % производимого в мире водорода, в основном в процессах деструктивной гидрогенизации (гидрокрекинг) и в очистке нефтепродуктов от соединений серы. Водород также применяется в пищевой промышленности (гидрогенизация жиров), металлургии (газы-восстановители) и в других отраслях [2, 3].

Основным процессом производства водорода и водородсодержащих газов является паровая каталитическая конверсия углеводородного сырья (природный газ, газовый конденсат, легкие нефтяные фракции). Процесс осуществляется в трубчатых реакторах, заполненных катализатором с активным компонентом на основе соединений никеля, с внешним подводом тепла для обогрева поверхности реакционных труб. Обычно в промышленных печах конверсии углеводородов поддерживается тепловой режим в слое катализатора 830–850 °С для получения технического водорода и 770 °С в производстве аммиака. Реализация процесса требует значительных расходов топлива, сжигаемого в горелочных устройствах для обогрева реакционных

труб. Например, в производстве аммиака расходуется 1000 м³ топлива на 1 т производимого продукта. Указанная выше температура 830–850 °С является практически предельной, поскольку лимитирующей с точки зрения ее повышения является температура внешней поверхности реакционных труб. Они весьма дорогостоящие, изготавливаются методом центробежного литья из хромоникелевой стали (X23H20C2), предельная температура стенки которой не превышает 1040 °С. Срок эксплуатации таких труб 80–100 тыс. ч, их перегрев приводит к снижению срока эксплуатации и, как следствие, к значительным материальным потерям.

Таким образом, такой широко применяемый в промышленности процесс производства водорода, как каталитическая конверсия углеводородов, имеет ограничения с точки зрения его применения в высокотемпературных процессах, где необходимо использовать водород с температурой выше 900 °С.

Вместе с тем известны технологические процессы, прежде всего в металлургии и машиностроении, для реализации которых необходимо применение водорода при температурах 1500–1700 °С. К таким процессам относятся технологии литья металлических и керамических изделий из мелкодисперсных порошковых композиций с полимерными связующими для производства металлических и керамических деталей. Это изделия сложного профиля с достаточно высокими требованиями к точности изготовления практически без отходов материала и последующей механической обработки. Такие процессы получили широкое развитие в конце 1990-х гг. — так называемые CIM (Ceramic Injection Moulding) и MIM (Metal Injection Moulding) технологии. Это также широкий спектр таких процессов, как металлизация, закалка, обжиг керамики, спекание и удаление связующего в атмосфере H₂.

К сфере широкого применения высокотемпературного водорода относятся лабораторные исследования. Указанные процессы осуществляются в высокотемпературных печах в атмосфере чистого водорода при 1450 или 1700 °С.

Другие альтернативные способы получения водорода [2–13] имеют технологические недостатки и представляют сложности промышленного внедрения.

Результаты исследований процесса пиролиза природного газа в электротермическом псевдооживленном слое, проведенные в Институте газа НАН Украины при исследовании электротермических псевдооживленных систем, показа-

ли, что этот процесс может быть успешно применен для получения водорода, необходимого для реализации указанных технологий. Исследовался пиролиз природного газа при его пропуске через разогретый до 1300–1500 °С псевдооживленный слой дробленого графита двух фракций 0,07–0,14 и 0,14–0,26 мм и высоте слоя 60–100 мм. Полученные газообразные продукты пиролиза природного газа содержат 98 % H₂, 0,8 % CO, 0,6 % N₂, 0,5 % CH₄ [14]. Оптимальными условиями для получения водорода следует считать температуры псевдооживленного слоя не менее 1400–1500 °С при времени контакта около 1 с. Для получения 1000 м³ технического водорода необходимо израсходовать около 500 м³ природного газа и 500 кВт электроэнергии. При этом в качестве ценного побочного продукта выделяется около 260 кг пирографита.

Высокотемпературные процессы в металлургии

Последние десятилетия ознаменовались значительными успехами в повышении качества металла, что, главным образом, связано с развитием в сфере металлургического производства новой отрасли — специальной электрометаллургии. Процессы спецметаллургии позволяют получать металл с низким содержанием газа и неметаллических примесей, с необходимой плотностью и однородной структурой. Особую группу специальной электрометаллургии составляют процессы переплава: электрошлаковый, вакуумно-дуговой, плазменно-дуговой и электронно-лучевой. Для них общими особенностями являются переплав затратных заготовок (электродов), капельный перенос электродного металла в металлическую ванну, последующая кристаллизация его в водоохлаждаемом кристаллизаторе и электрический источник тепла, под влиянием которого плавится металл. Эти процессы отличаются характером преобразования электрической энергии в тепловую, наличием вакуума и шлака в плавильном пространстве. Среди указанных процессов особенное место занимают методы плавки, в основе которых заложено использование низкотемпературной плазмы.

Из плазменных технологий, которые применяются в металлургии, можно выделить процессы плазменно-водородного восстановления оксидов тугоплавких металлов, плазменной восстановительной плавки оксидов группы железа, получения соединений металлов (карбиды, нитриды, оксиды и др.), позволяющие производить продукты в виде дисперсных порошков. Так называемая плазменная металлургия позво-

ляет производить прямое восстановление металла из руды, значительно ускорить металлургические процессы, получить чистые материалы, снизить расход топлива (восстановителя) [15]. Современные генераторы плазмы, плазмотроны, позволяют любой газ нагреть до температуры от 3273 до 10273–15273 °С [16]. Недостатком плазменной металлургии является высокое потребление электроэнергии, используемой для генерации плазмы. Использование электротермического псевдооживленного слоя (ЭТПС) в качестве альтернативы плазменным процессам не всегда является возможным, поскольку максимальная достигаемая температура в этом процессе — 4000 °С.

Первые попытки плавки металлов в индукционных тигельных печах токами высокой частоты относятся к началу XX в. В индукционной плавильной установке нагреваемый металл или сплав доводится до плавления, то есть меняет свое агрегатное состояние в процессе нагрева. В индукционной нагревательной установке конечная температура нагрева всегда ниже температуры плавления материала. Индукционные тигельные печи широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов на воздухе, в вакууме и в защитных атмосферах. В настоящее время используются такие печи емкостью от десятков граммов до десятков тонн. Тигельные индукционные печи применяются в основном для плавки высококачественных сталей и других специальных сплавов, требующих особой чистоты, однородности и точности химического состава, что недостижимо при плавке в пламенных и дуговых печах [17].

Вакуумная печь для индукционной плавки — это система, включающая в себя герметичную камеру, в которой устанавливаются индукционная тигельная печь и иногда литейная форма. Такие печи применяются для плавки и литья сплавов, направленного отверждения (монокристаллическое литье), электродного и непрерывного литья. Самые совершенные металлургические процессы в вакууме: дегазация стали, внепечная обработка, вакуумная переплавка, точное литье по выплавляемым моделям — в настоящее время позволяют получать высококачественные отливки по составу материала и по качеству литья [18].

Индукционные печи имеют следующие недостатки. Относительно низкая температура шлаков, наводимых на зеркало расплава с целью его технологической обработки; относительно холодные шлаки затрудняют протекание реакций между металлом и шлаком и, следовательно, затрудняют процессы рафинирования.

Шлак в индукционной тигельной печи, индифферентный к электрическому току, нагревается только от расплавляемого металла, поэтому его температура всегда ниже. Сравнительно низкая стойкость футеровки при высоких рабочих температурах расплава и при наличии теплосмен (резких колебаний температуры футеровки при полном сливе металла); высокая стоимость электрооборудования, особенно при частотах выше 50 Гц; более низкий КПД всей установки вследствие необходимости иметь в установке источник получения высокой или повышенной частоты, конденсаторов, а также при плавке материалов с малым удельным сопротивлением.

Технологически некоторые высокотемпературные процессы в металлургии можно осуществить с использованием технологии ЭТПС. Интенсивное перемешивание материала в состоянии псевдооживления способствует выравниванию материала в активной зоне нагрева. Высокая температура в реакционной зоне, возможность подведения в реакционный объем большого количества теплоты и возможность контроля атмосферы рабочей зоны делают ЭТПС одним из эффективных способов проведения высокотемпературных процессов в металлургии.

Для применения ЭТПС следует учитывать тот фактор, что плавление материала в зоне создания псевдооживления затруднит подачу газа в систему, тем самым прекратит работоспособность реактора и выгрузку. Применение инертной атмосферы в описанных процессах позволит повысить выход конечного продукта, тем самым снизить энергозатраты.

Высокотемпературный синтез и обработка материалов

Карбид кремния применяют передовые направления современной науки и техники: атомно-промышленный комплекс, электроника и полупроводниковая техника, керамические и полимерные материалы, авиа- и космические технологии, топливные элементы.

Впервые широкомасштабное производство карбида кремния начал Эдвард Гудрич Ачесон в 1893 г. [19]. Он разработал метод, основанный на восстановлении SiC графитом из SiO₂ и сконструировал электрическую печь, в которой карбид кремния получают до сих пор. Существует множество модификаций метода, однако по существу технология не претерпела значительных изменений с момента ее разработки. В простейшем случае процесс синтеза осуществляется в графитовой электропечи спеканием оксида кремния и углерода.

В электропечах Ачесона через нагреватель (кern) пропускается ток напряжением 100 кА, что приводит к выделению тепла. Kern состоит из графитовых блоков. Реакционную массу в виде смеси SiO₂ (природного песка) и С (графита, кокса) помещают в форме полуцилиндра вокруг нагревателя. Тепловая изоляция при этом обеспечивается за счет слоя песка на поверхности смеси прекурсоров. При нагреве реакционной смеси до 2500–2600 °С вокруг керна образуются зоны синтезированного продукта, кристаллов низкой чистоты и непрореагировавших компонентов. Далее синтезированный продукт разделяется по зонам и обрабатывается.

Особенности конструкции электропечи Ачесона приводят к неравномерности прогрева: слои вблизи керна нагреваются до 3000 °С, а периферийные до гораздо более низкой температуры. Это приводит к принципиальной невозможности обеспечения высокого выхода синтезируемой фазы SiC: доля чистого карбида кремния в продукте составляет 13–15 % при теоретическом выходе 67 % [20]. Столь существенная разница объясняется неполнотой реакций восстановления-карбидизации в зоне пониженных температур [21]. Для получения мелкодисперсного и однородного по составу и чистоте порошка карбида кремния образующийся кусковой продукт подвергается дальнейшей обработке со значительным объемом ручного труда. Производство характеризуется значительным энергопотреблением, низким выходом карбида кремния и повышенными вредными выбросами в окружающую среду.

Значительных успехов в исследовании этого вопроса достигли ученые Института тепло-массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси, разработавшие технологию синтеза мелкозернистого карбида кремния в ЭТПС. Мелкозернистый кварцевый песок периодически вводился в нагретый до 1400–1600 °С псевдооживленный слой (ожижающий агент — азот) углеродного восстановителя (нефтяной кокс, графит), присутствующего в значительном избытке по отношению к SiO₂. Продолжительность процесса определялась таким образом, чтобы весь кварцевый песок прореагировал с образованием SiC. Устойчивая работа реактора ЭТПС позволяла довести концентрацию образования SiC в шихте до 50–60 %, после чего она выгружалась и подлежала декарбонизации. Энергетическая эффективность данного метода будет расти при увеличении масштаба установки за счет снижения относительной величины потерь теплоты в окружающую среду [22, 23].

Чистый графит применяют в ядерной и общей энергетике, в других отраслях промышленности. Искусственные графиты обычно получают из нефтяного кокса (наполнителя) и каменноугольного пека (связующего) [24–26]. Вместо каменноугольного пека в качестве связующего могут быть использованы синтетические смолы, например, фурановые или фенольные. При необходимости введения добавок применяют природный графит и сажу. Формование заготовок осуществляют методом экструзии или прессования. Полученные заготовки подвергают ступенчатой термообработке без доступа воздуха для карбонизации (до 1300–1500 °С), затем графитизации (до 2400–2700 °С). Возможно получение искусственного графита методом нагревания антрацита до высоких температур (около 2200 °С) без доступа воздуха и некоторыми другими методами. Метод характеризуется значительными энергозатратами, а также большими потерями конечного продукта.

Разновидностью искусственного графита является пирографит, получаемый медленным осаждением на нагретой примерно до 2500 °С поверхности углерода при термическом разложении углеводородов [27]. Пирографит практически не обладает пористостью, ему присуща анизотропия свойств.

Графиты природного происхождения всегда содержат примеси. Очистку их от примесей проводят разными способами: с использованием высоких температур (скорость испарения графита значительно ниже скорости испарения многих примесей), вакуума, реакций хлорирования и фторирования и т.д. Для получения наиболее чистых минеральных графитов используют комбинированные способы, многостадийную очистку, что значительно сказывается на стоимости таких сортов графита.

Промышленная компания American Energy Technologies Corp. предложила двухстадийную технологию прокаливания нефтяного кокса, включая первую стадию — нагрев исходного сырья до 900–1200 °С с целью удаления основной части летучих продуктов, и вторую стадию — высокотемпературную обработку кокса в печи с ЭТПС при температуре до 2700 °С. Присутствие псевдооживленного слоя решает несколько технологических и технических задач одновременно: позволяет повысить электросопротивление слоя по сравнению с электросопротивлением плотного слоя частиц углеродного материала (печей Ачесона) и обеспечивает вынос летучих компонентов при высокотемпературном нагреве из рабочей камеры.

Кафедра промышленной теплоэнергетики Национальной металлургической академии Украины совместно с ООО «Центр материаловедения» (г. Киев) и ПП «Конструкторское бюро «Южное»» при поддержке Департамента энергетики США и Брукхевинской Национальной Лаборатории (г. Нью-Йорк, США), Украинского научно-технологического центра (г. Киев) и участия Американской энерготехнологической компании (г. Чикаго, США) разработали конструкцию лабораторной ЭТПС производительностью 10 кг/ч. В соответствии с техническим заданием разработка печи выполнена для обработки графита с размером фракций 100 мкм. Расчетная производительность печи — 0–10 кг/ч; температура обработки — 2000–2500 °С [28, 29].

Учеными Института газа НАН Украины экспериментально доказана возможность высокотемпературной очистки природного графита в ЭТПС до высоких степеней чистоты. В дальнейшем такая технология обещает быть менее энергозатратной, чем метод Ачесона, а также экологически чистой в сравнении с химическими методами очистки.

Высокотемпературный нагрев газов

Высокотемпературные газы от 600 °С и выше широко используются в различных областях техники, в научных исследованиях таких, например, как аэротермогазодинамика летательных аппаратов в условиях, максимально приближенных к натурным [30], а также для исследования физико-химических свойств газов и кинетики химических реакций [31], в технологиях синтеза веществ и обработки поверхности [32].

При получении таких газов нередко возникают значительные сложности технологического характера. Например, одной из основных проблем нагрева газа сжатием до высоких температур 6273–10273 °С в баллистических установках является необходимость сжимать его до сверхвысоких давлений в несколько тысяч атмосфер. Для этого используются тяжелые баллистические установки и мощные компрессоры для толкающего газа [33]. Такие установки не находят широкого применения в научном эксперименте и промышленности из-за громоздкости и неэффективности процесса сжатия.

Высокотемпературный нагрев газа также проводят в комбинированных газовых установках посредством последовательного сжатия легкого газа поршнями в нескольких соединенных между собой камерах [34, 35]. В данных установках требуется использование нескольких независимых камер с вакуумированными объемами, что существ-

венно усложняет конструкцию и делает проблематичной практическую реализацию нагревания газа. Наличие длинных перепускных каналов между камерами увеличивает теплопотери, что снижает эффективность нагрева газа.

При пропуске газа через ЭТПС происходит его нагревание до высоких температур. Опыты показывают, что после прохождения слоя ЭТПС газ имеет высокую температуру и в дальнейшем его можно использовать в вышеописанных процессах. В случае применения технологии ЭТПС отсутствует необходимость сжатия, что приводит к упрощению конструкции нагревательного оборудования, а возможность присоединения оборудования напрямую к реактору ЭТПС снижает потери теплоты при передаче газа.

Использование ЭТПС может открыть перспективы нагрева газов для процесса восстановления в металлургии [36], получения пироуглерода на дисперсный материал [37], получения наноматериалов и других процессов.

Выводы

Высокие энерго- и ресурсозатраты, технологические сложности являются сдерживающим фактором для широкого применения высокотемпературных процессов в разных отраслях энергетического комплекса, промышленности, национальной и экологической безопасности. Указанные ограничения не позволяют получать дополнительный экономический эффект, повышать уровень национальной безопасности и решать экологические проблемы. К числу таких процессов следует отнести, например, получение водорода пиролизом углеводородных газов, получение карбида кремния и других карбидов, получение искусственного графита и термическую очистку природного графита, высокотемпературный нагрев газов и газовых смесей.

Применение ЭТПС в некоторых из рассматриваемых в статье процессов позволит исключить указанные ограничения, а также повысить их эффективность.

Список литературы

1. Несенчук А.П., Лисиенко В.Г., Тимошпольский В.И., Седнин В.А., Малевич Ю.А., Романюк В.Н., Кочетков А.В. Высокотемпературные процессы и установки / Под общ. редакцией В.Г. Лисиенко. Минск : Высшая школа, 1988. 320 с.
2. Берзан В.П., Анисимов В.К. О физико-энергетических процессах при электролитическом разложении воды. *Проблемы региональной энергетики*. 2006. № 1. С. 87–97.

3. Hydrogen production and storage R&D priorities and gaps. OECD/IEA, 2005. 36 p.
4. Кулешов Н.В., Кулешов В.Н., Бахин А.Н., Ибрагимова А., Славнов Ю.А. Разработка новой элементной базы для щелочных электролизеров воды. *Естественные и технические науки*. 2011. № 6. С. 75–79.
5. Пат. 35677 Укр, МПК С 25 В 1/00. Спосіб підвищення ефективності електролізу / С.А. Русаков; заявник і патентовласник: ВАТ «Хартрон». – № u201807114; заявл. 22.05.2009; опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
6. Пат. 2501890С1 РФ, МПК Y 02 E 60366. Электролизер для получения водорода и кислорода из воды. В.В.Баранников, К.Г.Большаков, Д.Г.Кондратьев, А.В.Потанин, Е.Г.Шихов. Заявитель и собственник: ОАО «Уральский электрохимический комбинат». – № 2012119503А; заявл. 11.05.2012; опубл. 20.12.2013.
7. Ramato Ashu Tufa, Jaromír Hnat, Michal Němeček, Roman Kodym, Efreem Curcio, Karel Bouzek. Hydrogen production from industrial wastewaters: An integrated reverse electro dialysis – Water electrolysis energy system. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 203. P. 418–426.
8. Кулешов Н.В., Коровин Н.В., Удрис Е.Я., Кулешов В.Н., Бахин А.Н. Разработка новых электрокатализаторов для низкотемпературного электролиза воды. *Электрохимическая энергетика*. 2012. Т. 12, № 2. С. 51–58.
9. Haotian Wang, Hyun-Wook Lee, Yong Deng, Zhiyi Lu, Po-Chun Hsu, Yayuan Liu, Dingchang Lin & Yi Cui Bifunctional non-noble metal oxide nanoparticle electrocatalysts through lithium-induced conversion for overall water splitting. *Nature communications*. 2015. Macmillan Publishers Limited. 8 p.
10. U.S. Department of Energy. – <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
11. Yaser Khojasteh, Salkuyeh Bradley, A. Saville Heather, L. MacLean. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, Iss. 30. pp. 18894–18909.
12. Gary J. Stiegela, Massood Ramezanb Hydrogen from coal gasification : An economical pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Coal Geology*. 2006, 17 Jan. Vol. 65, Iss. 3–4. pp. 173–190.
13. Xing L. Yan, Ryutaro Hino Nuclear Hydrogen Production Handbook. Taylor and Francis Group LLC. 2011. 433 p.
14. Кожан А.П., Богомолов В.А., Ховавко А.И., Бондаренко Б.И., Семейко К.В. Исследование процесса получения водорода пиролизом углеводородов в аппарате с электротермическим псевдооживленным слоем. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2012. № 2. С. 27–31.
15. Цветков Ю.В., Николаев А.В., Самохин А.В. Плазменные процессы в металлургии и техноло-

- гии неорганических материалов. *Современная электрометаллургия*. 2013. № 4. С. 40–46.
16. Шаповалов В.О., Шейко И.В., Ремізов Г.О. Плазмові процеси та устаткування в металургії. Київ : Хімджест, 2012. 384 с.
 17. Иванова Л.И., Грובה Л.С., Сокунов Б.А., Сарапулов С.Ф. Индукционные тигельные печи : Учеб. пособие. Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2002. 87 с.
 18. Филимоненко А.Н. Вакуумные индукционные печи, область применения. *Литве и металлургия*. 2012. № 3. С. 248–250.
 19. Андриевский Р.А. Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура, свойства. *Успехи химии*. 2009. № 78. С. 889–900.
 20. Derevyanko I.V., Zhadanos A.V. Mathematical Modeling of Heat Power Processes of Silicium Carbide Production in Acheson Furnace. *Metallurgical and Mining Industr.* 2010. Vol. 2, № 5. P.330–335.
 21. Московских Д.О. Получение субмикронного порошка карбида кремния и наноструктурированной керамики на его основе : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 20 с.
 22. Мармер Э.Н. Углеродистые материалы. М. : Металлургия, 1973. 136 с.
 23. Бородуля В.А., Виноградов Л.М., Гребеньков А.Ж., Михайлов А.А. Синтез карбида кремния в электротермическом реакторе с кипящим слоем углеродных частиц. *Горение и плазмохимия*. 2015. Т. 13, № 2. С. 92–102.
 24. Бородуля В.А., Виноградов Л.М., Гребеньков А.Ж., Дубкова В.И., Михайлов А.А., Пинчук Т.И. Карботермический синтез пористых порошков карбида кремния в реакторе электротермического кипящего слоя и перспективы его использования в полимерных композитах. *Материалы VI Международного симпозиума «Пористые проницаемые материалы и технологии и изделия на их основе»*, Минск, Беларусь, 19–20 окт. 2017 г. Минск, 2017. С. 524–538.
 25. Вяткин С.Е., Деев А.Н., Нагорный В.Г., Островский В.С., Сигареев А.М., Соккер Т.А. Ядерный графит. М. : Атомиздат, 1967. 180 с.
 26. Тарабанов А.С., Костиков В.И. Силицированный графит. М. : Металлургия, 1977. 208 с.
 27. Зайковский А.В., Замчий А.О., Нерушев О.А., Новопашин С.А., Сахапов С.З., Смовж Д.В. Электро-
дуговая конверсия метана. *Химия и химическая технология*. 2013. Т. 56, №.5. С. 118– 121.
 28. Федоров С.С., Губинский М.В., Форись С.Н. Выбор размеров рабочего пространства электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 4. С. 87–90.
 29. Fedorov S.S., Gubinskii M.V., Foris S.N. Mathematical Simulation of the Structural Properties of Packed and Fluidized Beds. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. № 89 (3). P. 627–635.
 30. Kislykh V.V. Piston Gasdynamic units with MCC. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. 2002. Vol. 198. P. 321–333.
 31. Кислых В.В., Крапивной К.В. Использование неизоэнтропического многокаскадного сжатия для получения плотного высокотемпературного газа. *Теплофизика высоких температур*. 1990. Т. 28, № 6. С. 1195.
 32. Жуков М.Ф., Фомин В.М. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. *Низкотемпературная плазма*. 2000. Т. 18. С. 425.
 33. Колбановский Ю.А., Щипачев В.С., Черняк Н.Я., Чернышева А.С., Григорьев А.С. Импульсное сжатие газов в химии и технологии. М. : Наука, 1982. 240 с.
 34. Златин Н.А., Мишин Г.И. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М. : Наука, 1974. 334 с.
 35. Волон Д.Ю. Теплотехнические устройства для получения плотного высокотемпературного газа. *Теплофизика высоких температур*. 2006. Т. 44, № 4. С. 604–626.
 36. Махорин К.Е., Карп И.Н., Кожан А.П. Высокотемпературная печь с электротермическим кипящим слоем для нагрева водорода // Информационное письмо Института газа АН УССР. Киев : Наукова думка, 1970. № 15. 32 с.
 37. Богомоллов В.А., Кожан А.П., Бондаренко Б.И., Ховавко А.И., Семейко К.В. Капсулирование кварцевого песка пироуглеродом в электротермическом псевдоожигенном слое. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2013. № 5. С. 36–40.

Поступила в редакцию 20.12.18

Сімейко К.В., канд. техн. наук,
Ільєнко Б.К., канд. техн. наук, **Сидоренко М.А.**
Інститут газу НАН України, Київ
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: k_simeyko@ukr.net

Застосування техніки електротермічного псевдозрідженого шару для здійснення високотемпературних технологічних процесів (Огляд)

При реалізації високотемпературних процесів із підведенням тепла у зону реакції (аллотермічні процеси) неможливо або економічно недоцільне спалювання органічного палива для досягнення необхідного рівня температур. Розглянуто можливості реалізації вказаних процесів застосуванням техніки електротермічного псевдозрідженого шару (ЕТПШ). До числа таких процесів слід віднести, наприклад, виробництво водню піролізом вуглеводневих газів, отримання карбиду кремнію та інших карбідів, отримання штучного графіту та термічну очистку природного графіту, високотемпературний нагрів газів та газових сумішей. Вказані процеси можуть бути здійснені у діапазоні температур 600–3000 °С з використанням дрібнодисперсних матеріалів або безпосередньо у газовій фазі із застосуванням ЕТПШ. У деяких процесах технологія ЕТПШ може бути застосована як джерело отримання високотемпературного газу, який використовується або для здійснення даного технологічного процесу, або для забезпечення функціонування технологічного та теплотехнічного обладнання. Розглянуто основні конструктивні характеристики обладнання, що забезпечують реалізацію процесів в ЕТПШ. *Бібл. 37.*

Ключові слова: високотемпературні процеси та технології, електротермічний псевдозріджений шар.

Simeiko K.V., *Candidate of Technical Sciences,*
Iliencko B.K., *Candidate of Technical Sciences,* **Sydorenko M.A.**
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: k_simeyko@ukr.net

Electrothermal Fluidized Bed Technique Using for Realization of High-Temperature Technological Processes (Review)

When implementing a number of high-temperature processes with heat supply to the reaction zone (allothermic processes), it is impossible or economically inexpedient the burning of fossil fuels to achieve the required temperature level. The possibilities of these processes implementation through the use of electrothermal fluidized bed (ETFB) techniques are considered. Such processes include, for example, the production of hydrogen by the pyrolysis of hydrocarbon gases, the production of silicon carbide and other carbides, the production of artificial graphite and the thermal purification of natural graphite, the high-temperature heating of gases and gas mixtures. These processes can be carried out in the temperature range of 600–3000 °C using fine-dispersed materials or directly in the gas phase using ETFB. In a number of processes ETFB technology can be applied as a source of high temperature gas production, used either for the implementation of this technological process, or for ensuring the operation of technological or heat engineering equipment. Also considered the main structural characteristics of the equipment that ensure the implementation of processes in the ETPS. *Bibl. 37.*

Key words: high-temperature processes and technologies, electrothermal fluidized bed.

References

- Nesenchuk A.P., Lisenko V.G., Timoshpolsky V.I., Sednin V.A., Malevich Yu.A., Romanyuk V.N., Kochetkov A.V. [High temperature processes and installations]. Ed. by V.G.Lisenko. Minsk : Vysshaja shkola, 1988. 320 p. (Rus.)
- Berzan V.P., Anisimov V.K. [About physicochemical processes at electrolytic decomposition of the water]. *Problemy regional'noj jenergetiki [Problems of regional energy]*. 2006. No. 1. pp. 87–97. (Rus.)
- Hydrogen production and storage R&D priorities and gaps. OECD/IEA, 2005. 36 p.
- Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Bahin A.N., Ibragimova A., Slavov Ju.A. [Development of a new elemental base for alkaline electrolyzers of water]. *Estestvennye i tehniczeskie nauki [Natural and technical sciences]*. 2011. No. 6. pp. 75–79. (Rus.)
- Pat. 35677 Ukraine, IPC: C 25 B 1/00. Spisob pidvishhennja efektyvnosti elektrolizu [Method of increasing the efficiency of electrolysis] S.A. Rusakov; Applicant and patent holder: OJSC «Khartron». № u201807114; applic. date: 22.05.2009; publ. date: 25.09 2009. Bul. 18. (Ukr.)
- Pat. RF 2501890C1, IPC Y 02 E 60366. Jelektrolizer dlja poluchenija vodoroda i kisloroda iz vody [Electrolyzer for the production of hydrogen and oxygen from water]. V.V.Barannikov, K.G. Bol'shakov, D.G.Kondrat'ev, A.V.Potinin, E.G. Shihov; Applicant and patent holder: OJSC «Urals Electrochemical Combine». №. 2012119503a; applic. date: 11.05.2012. publ. date: 20.12.2013. (Rus.)
- Ramato Ashu Tufa, Jaromir Hnát, Michal Němeček, Roman Kodým, Efrem Curcio, Karel Bouzek. Hydrogen production from industrial wastewaters: An integrated reverse electrodialysis – Water electrolysis energy system. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 203. pp. 418–426.
- Kuleshov N.V., Korovin N.V., Udriš E.Ja., Kuleshov V.N., Bahin A.N. Razrabotka novyh jelektrokatalizatorov dlja nizkotemperaturnoj elektroliza vody [Development of new electrocatalysts for low-temperature electrolysis of water]. *Jelektrohimicheskaja jenergetika [Electrochemical energy]*. 2012. 12 (2). pp. 51–58. (Rus.)
- Haotian Wang, Hyun-Wook Lee, Yong Deng, Zhiyi Lu, Po-Chun Hsu, Yayuan Liu, Dingchang Lin & Yi Cui Bifunctional non-noble metal oxide nanoparticle electrocatalysts through lithium-induced conversion for overall water splitting. *Nature communications*. 2015. Macmillan Publishers Limited. 8 p.
- U.S. Department of Energy. – <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- Yaser Khojasteh, Salkuyeh Bradley, A. Saville Heather, L. MacLean. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. 42, Iss. 30. pp. 18894–18909.
- Gary J. Stiegela, Massood Ramezanb Hydrogen from coal gasification : An economical pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Coal Geology*. 2006, 17 Jan. Vol. 65, Iss. 3–4. pp. 173–190.
- Xing L. Yan, Ryutaro Hino Nuclear Hydrogen Production Handbook. Taylor and Francis Group LLC. 2011. 433 p.
- Kozhan A.P., Bogomolov V.A. Khovavko A.I., Bondarenko B.I., Simeiko K.V. Issledovanie processa poluchenija vodoroda pirolizom uglevodородov v apparate s jelektrotermicheskim psevdoozhizhennym sloem [Research of hydrogen production by hydrocarbons pyrolysis in the reactor with electrothermal fluidized bed]. *Energotekhnologii i resursosberezenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2012. No. 2. pp. 27–31. (Rus.)
- Cvetkov Yu.V., Nikolaev A.V., Samohin A.V. Plazmennye processy v metallurgii i tehnologii neorganicheskikh materialov [Plasma processes in metallurgy and technology of inorganic materials]. *Sovremennaja jelektrometallurgija [Modern electrometallurgy]*. 2013. No. 4. pp. 40–46. (Rus.)
- Shapovalov V.O., Shejko I.V., Remizov G.O. Plazmovi procesi ta ustakuvannja v metalurgii [Plasma processes and equipment in metallurgy]. Kiev : Himdzhest, 2012. 384 p. (Ukr.)
- Ivanova L.I., Grobova L.S., Sokunov B.A., Sarapulov S.F. Indukcionnye tigel'nye pechi. Uchebnoe posobie. [Induction crucible furnaces. Tutorial]. Ekaterinburg : Uralskiy Gosudarstvennyi Tehniczeskiy University – Uralskiy Polytehniczeskiy Institut. 2002. 87 p. (Rus.)
- Filimonenko A.N. Vakuunnye indukcionnye pechi, oblast' primenenija [Vacuum induction furnace application area]. *Lit'e i metallurgija [Casting and metallurgy]*. 2012. No. 3. pp. 248–250. (Rus.)
- Andrievskij R.A. Nanorazmernyj karbid kremnija: sintez, struktura, svojstva [Nanoscale silicon carbide: synthesis, structure, properties]. *Uspehi himii [Successes of Chemistry]*. 2009. No. 78 (9). pp. 889–900. (Rus.)
- Derevyanko I. V., Zhadanos A. V. Mathematical Modeling of Heat Power Processes of Silicon Carbide Production in Acheson Furnace. *Metallurgical and Mining Industry*, 2010, 2 (5). pp. 330–335.
- Moskovskih D.O. Poluchenie submikronnogo poroshka karbida kremnija i nanostrukturirovannoj keramiki na ego osnove [Obtaining submicron powder of silicon carbide and nanostructured ceramics based on it]. Dissertation of the candidate of technical sciences. Moscow, 2015. 166 p. (Rus.)
- Marmer Ye.N. Uglegrafitovye materialy [Carbon-graphite materials]. Moscow : Metallurgija, 1973. 136 p. (Rus.)
- Borodulya V.A., Vinogradov L.M., Greben'kov A.Zh., Mikhaylov A.A. Sintez karbida kremnija v elektrotermicheskom reaktore s kipyashchim sloem uglerodnykh chastits [Synthesis of silicon carbide in an electrothermal fluidized bed reactor of carbon particles]. *Goreniye i plazmokhimiya [Combustion and plasma chemistry]*. 2015. 13 (2). pp. 92–102. (Rus.)

24. Borodulya V.A., Vinogradov L.M., Greben'kov A.ZH., Dubkova V.I., Mikhaylov A.A., Pinchuk T.I. Karbotermicheskiy sintez poristykh poroshkov karbida kremniya v reaktore elektrotermicheskogo kipyashchego sloya i perspektivy yego ispol'zovaniya v polimernykh kompozitakh [Carbothermal synthesis of porous powders of silicon carbide in an electrothermal fluidized bed reactor and prospects for its use in polymer composites]. *Materials of the 6th International Symposium «Poristyye pronitsayemyye materialy i tekhnologii i izdeliya na ikh osnove» [Porous Permeable Materials and Technologies and Products Based on Them]*. Minsk, 19–20 Oct., 2017. pp. 524–538. (Rus.)
25. Vjatkin S.E., Deev A.N., Nagornyy V.G., Ostrovskiy V.S., Sigareev A.M., Sokker T.A. Jadernyy grafit [Nuclear graphite]. Moscow : Atomizdat, 1967. 180 p. (Rus.)
26. Tarabanov A.S., Kostikov V.I. Silicirovannyj grafit [Silicized graphite]. Moscow : Metallurgiya. 1977. 208 p. (Rus.)
27. Zajkovskiy A.V., Zamchij A.O., Nerushev O.A., Novopashin S.A., Sahapov S.Z., Smovzh D.V. Jelektrodugovaya konversiya metana [Electric arc conversion of methane]. *Himija i himicheskaja tehnologija [Chemistry and Chemical Technology]*. 2013. Vol. 56, iss. 5. pp. 118–121 p. (Rus.)
28. Fedorov S.S., Gubinskiy M.V., Foris' S.N. Vybor razmerov rabocheho prostranstva elektrotermicheskikh pechey kipyashchego sloya dlya pererabotki uglerodnykh materialov [Selection of the size of the working space of electrothermal fluidized bed furnaces for processing carbon materials]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*. 2014. No. 4. pp. 87–90. (Rus.)
29. Fedorov S.S., Gubinskii M.V., Foris S.N. Mathematical Simulation of the Structural Properties of Packed and Fluidized Beds. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. No. 89 (3). pp. 627–635.
30. Kislykh V.V. Piston Gasdynamic units with MCC. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. 2002. Vol. 198. P. 321–333.
31. Kislykh V.V., Krapivnoj K.V. Ispol'zovanie neizotentropicheskogo mnogokaskadnogo szhatija dlja poluchenija plotnogo vysokotemperaturnogo gaza [Using non-isentropic multistage compression to obtain a dense high-temperature gas]. *Teplofizika vysokih temperatur [High Temperature Thermophysics]*. 1990. 28 (6). pp. 1195. (Rus.)
32. Zhukov M.F., Fomin V.M. Vysokojenergeticheskie processy obrabotki materialov [High-energy processing of materials]. *Nizkotemperaturnaja plazma [Low-temperature plasma]*. 2000. Vol. 18. P. 425. (Rus.)
33. Kolbanovskiy Ju.A., Shhipachev V.S., Chernjak N.Ja, Chernysheva A.S., Grigor'ev A.S. Impul'snoe szhatie gazov v himii i tekhnologii [Pulse compression of gases in chemistry and technology]. Moscow : Nauka, 1982. 240 p. (Rus.)
34. Zlatin N.A., Mishin G.I. Ballisticheskie ustanovki i ih primenenie v jeksperimental'nyh issledovaniyah [Ballistic installations and their application in experimental studies.]. Moscow : Nauka, 1974. 334 p. (Rus.)
35. Volov D.Ju. Teplotehnicheskie ustrojstva dlja poluchenija plotnogo vysokotemperaturnogo gaza [Thermal devices for producing dense high-temperature gas]. *Teplofizika vysokih temperatur [Temperature Thermal Physics]*. 2006. 44 (4). pp. 604–626. (Rus.)
36. Makhorin K.E., Karp I.M., Kozhan A.P. Vysokotemperaturnaja pech' s jelektrotermicheskim kipjashhem sloem dlja nagreva vodoroda [High-temperature furnace with electrothermal fluidized bed for hydrogen heating], *Informacionnoe pis'mo instituta gaza AN USSR [Information Letter of Gas Institute of Academy of Sciences of Ukrainian Soviet Socialist Republic]*. Kiev : Naukova Dumka, 1970, No. 15, 32 p. (Rus.)
37. Bogomolov V.O. Kozhan A.P., Bondarenko B.I., Khovavko O.I., Simeiko K.V. Kapsulirovanie kvarcavogo peska pirouglerodom v jelektrotermicheskom psevdoozhizhenom sloe [Research of the process of quartz sand encapsulation by pyrolytic carbon]. *Energotehnologii i resursozberezenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2013. No. 5. pp. 36–40. (Rus.)

Received December 20, 2018