

УДК.533.9:662.74

Электродуговые плазмохимические реакторы раздельного, совмещенного и раздельно-совмещенного типов

Б.И. Михайлов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Email:mikhailov@itam.nsc.ru

В различных областях науки и техники используется большое разнообразие электродуговых реакторов. В связи с этим назрела необходимость их систематизации.

Представлена классификация большинства существующих видов электродуговых реакторов в зависимости от взаиморасположения зон плазмогенерации и реакционных зон. Можно выделить три вида реакторов: раздельного типа, совмещенного и раздельно-совмещенного. В зависимости от использованных конструкторских решений внутри каждого вида имеется некоторый разброс в достигнутых результатах по тепловому КПД, возможности набора мощности, по ресурсу работы и т. д.

Реакторы комбинированного нагрева в настоящей работе не рассматривались. Они весьма специфичны и требуют отдельного исследования.

Ключевые слова: электродуговой плазмотрон, плазмохимия, плазмохимический реактор, плазмообразующая среда, классификация, ресурс, мощность, тепловой КПД, реакционная зона, порошкообразная фракция, футеровка, сканирование, V-образная дуга, жидкометаллический электрод, технологичность, компактность.

ВВЕДЕНИЕ

В плазмохимических реакторах используется практически безынерционный нагревательный элемент — электрическая дуга. Большая мощность и высокая плотность тепловой энергии в дуге обуславливают достижение высоких температур в реакторе, позволяют создавать в нем среду практически любого химического состава и вести химические процессы с высокой скоростью и производительностью. Высокая плотность энергии в электрической дуге обеспечивают создание компактных технологических установок.

Безынерционность электрической дуги допускает автоматизацию процесса и быструю перестройку режима работы реактора под сильно различающиеся исходное сырье для выпуска из него продукции широкого ассортимента [1]. Например, процесс газификации угля легко перестраивается с выпуска синтез-газа на производство ацетилена и других веществ [2].

Вышесказанное сильно отличает плазмохимические реакторы от печей-газификаторов традиционных схем Лурги, Винклера, Копперс-Тотцека и др., а также от огневых печей, оснащенных газовыми или мазутными горелками.

В настоящее время остро стоит вопрос об экологичном уничтожении самых различных отходов, просроченных пестицидов и других веществ, а также о плазмохимическом получении оксидов урана для атомных электростанций, проведения гидропиролиза тетрафторида кремния SiF_4 и получения из него фторводорода HF и ультрадисперсного кремнезема SiO_2 , получения титановых белил TiO_2 из хлористого титана TiCl_4 и т. д.

При плазмохимическом подходе становится возможным комплексный (безотходный) способ переработки угля [3], при котором кроме синтез-газа из шлаков получают железо, алюминий, технический кремний, карбосилиций, ферросилиций и многие другие вещества в виде товарной продукции. И происходит это экологически чисто без выбросов в атмосферу серы, окислов азота и серы, диоксида и других вредных веществ.

Хотя примеры использования электрической дуги в химических технологиях известны уже с начала XX века, но широкое ее применение стало возможным только с появлением и разработкой электродуговых плазмотронов. Позже их использование связано с аэродинамическими испытаниями моделей при больших числах Маха и с обсуждением возможности создания ионных двигателей для космических кораблей, но настоящее крупнотоннажное их использование началось с появления науки плазмохимии, основателем которой в стране по праву считается профессор Л.С. Полак (Институт нефтехимического синтеза АН СССР). Уместно здесь же указать, что плазмотронное направление связано с именем сибирского ученого академика М.Ф. Жукова. Можно сказать, что плазмохимия — это химия высокотемпературных процессов, которые при обычных температурах совсем не идут или идут, но очень медленно. Совпадение по времени появления плазмохимии и источников высокотемпературных потоков любого заданного состава — плазмотронов — оказалось чрезвычайно плодотворным.

Устройство, внутри которого с помощью плазмотронов создается высокотемпературная среда, куда подается требуемый химический реагент, взаимодействующий со средой для получения соответствующих продуктов, называется плазмохимическим реактором. Как правило, это стационарно работающее проточное устройство.

1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Общие требования предъявляемые к реакторам: достижимая мощность, энтальпия, тепловой коэффициент полезного действия (КПД), ресурс непрерывной работы, производительность и безопасность в эксплуатации.

Несмотря на то, что во всех конструкциях использован один и тот же нагревательный элемент — электрическая дуга, достижения высоких показателей могут существенно различаться из-за особенностей конкретных технических решений. Все схемы реакторов за исключением схемы с жидкометаллическими электродами обладают общим свойством — осевой симметрией, что делает конструкции простыми в изготовлении, т. е. технологичными.

Одним из главных достоинств плазмохимических реакторов является их высокая производительность, определяемая высокой скоростью протекания в них химических процессов.

Скорость процесса зависит от двух факторов: скорости химической реакции и скорости смешения реагирующих компонентов. При этом скорость процесса лимитируется скоростью наиболее медленного из указанных факторов. При низких температурах ограничивающим фактором является скорость реакции. В этом случае считается, что процесс идет в кинетической области.

С ростом температуры скорость химических реакций резко возрастает и лимитирующим фактором становится недостаточная скорость перемешивания реагирующих компонентов.

Поскольку в условиях плазмохимического реактора температуры высоки, то роль скорости смешения многократно возрастает. Если скорость потока мала, то перемешивание определяется скоростью диффузии. Такой процесс принято считать идущим в диффузионной или ламинарной области. Повышение производительности работы реактора требует значительной интенсификации перемешивания в нем компонентов.

Это достигается путем перехода на турбулентный режим течения реагирующего потока. Увеличение расхода плазмообразующего газа и тока дуги интенсифицирует процесс смешения. Про такой процесс можно сказать, что он протекает в области интенсивной турбулизации плазмореагирующего потока.

Наличие на входе в реактор аэродинамического уступа (рис. 1) сильно турбулизует поток. Одним из интересных решений повышения турбулизации потока является взаимная турбулизация встречных струй. Наложение на дугу внешних магнитных полей также способствует лучшему перемешиванию реагирующих сред в реакторе.

Интересно сопоставить результаты двух серий опытов [4]. Одна серия проводилась на установке мощностью всего несколько киловатт с небольшим расходом пароводяной плазмы. Число Рейнольдса в реакторе составляло $Re = 0,016$ [5]. Режим течения при этом являлся ламинарным. В результате степень превращения углерода из угля в газ оказалась равной 50–60 %.

Другая серия экспериментов [6] также проводилась в одноструйном реакторе, но оснащенном паровихревым плазмотроном относительно большой мощности в 30–50 кВт и расходом 1–2 г/с. Здесь для турбулизации потока плазмы в реакторе использован уступ. Идея внезапного расширения струи на уступе широко используется в плазмотронах осевой схемы [2]. Здесь также выходящая из сопла струя, попадая в реактор большего, чем сопло сечения, внезапно расширяется с образованием вихревой рециркуляционной зоны (см. рис. 1). Угольный порошок вводится радиально под срез сопла.

Турбулизация потока имеет место при выполнении условий [4]:

1) Число Рейнольдса в струе перед выходом из плазмотрона должно быть $Re \geq Re_{кр}$. Ввиду сильного воздействия внезапного расширения $Re_{кр} \cong 800$;

2) Отношение диаметра реактора d_p к диаметру сопла d_c плазмотрона должно быть в пределах $d_p/d_c = 1,8 - 2,0$.

При этих условиях в реакторе непосредственно за срезом сопла образуется максимально большая рециркуляционная зона с мощными вихревыми течениями (см. рис. 1). Угольный порошок, подаваемый здесь в реактор, подхватывается вих-

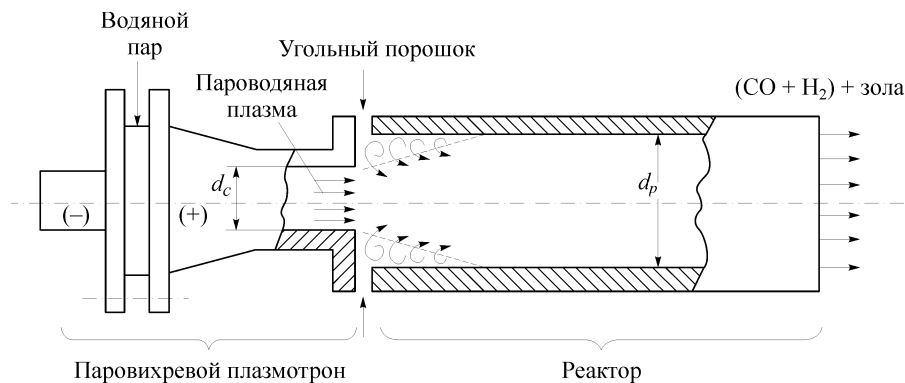


Рис. 1. Схема стыковки одноструйного реактора с плазмотроном.

рями и равномерно распределяется по сечению реактора. Это резко ускоряет процесс смешения и обеспечивает высокую степень превращения углерода из угля в газ до 96 %, а степень превращения содержащейся в сере минеральной части угля в газ H_2S до 90 %.

Повышение мощности установки обеспечивается либо увеличением единичной мощности плазмотрона, либо увеличением их числа, т. е. переходом на многоструйную схему реактора. Используя опыт работы с одноструйным реактором, здесь также возможно использование принципа внезапного расширения.

Из вышесказанного следует, что создание в плазмохимических реакторах зон с повышенной турбулентностью сильно увеличивает скорость взаимодействия реагентов. Это увеличивает также и полноту процесса газификации и производительность установки в целом.

Одним из принципиальных этапов проектирования плазмохимического реактора является выполнение с помощью пакетов программ «Астра-3», «Гермит», термодинамического анализа, позволяющего определять в зависимости от температуры равновесный газовый состав взаимодействующих реагентов и отвечать на ряд важных вопросов:

1. Какая плазменная среда является оптимальной?
2. Какова должна быть температура процесса? Это важно для обеспечения максимального теплового КПД реактора, высокой производительности процесса и получения требуемой дисперсности конденсированного порошкообразного продукта, как, например, при производстве мелкодисперсного диоксида титана TiO_2 [7];
3. Являются ли целевые продукты реакции стабильными или, наоборот, неустойчивыми? В последнем случае требуется специальная закалка для сохранения полученного продукта от разрушения на выходе из реактора.

Например, продуктом пароводяной газификации угля является синтез-газ ($CO + H_2$). Этот газ стабилен во всем интервале температур, от тех, что в реакторной зоне, и до комнатной.

Наоборот, ацетилен C_2H_2 неустойчив при $T < 1800$ К, и его выход зависит от скорости закалки. Снижение скорости закалки с $6 \cdot 10^6$ К/с уменьшает выход ацетилена с 50 % до 20 % [8]. Эффективны способы закалки водой, методом сверхзвукового расширения и др. При этом скорость закалки составляет примерно 10^7 К/с. При хорошей закалке выход ацетилена даже возрастает за счет реакции компонентов C_2H , C_2 , CN с водородом [9];

4. Какова максимально целесообразная температура в реакторе? Выше нее токсичные компоненты в составе уже отсутствуют, т. е. произошло их высокотемпературное уничтожение.

Из расчета кинетики процесса определяется скорость химических реакций и время τ образования частиц (требуемого размера) целевого продукта в зависимости от температуры. На основании этих данных и известной скорости реагирующей среды V в реакторе определяется его длина $l_p = \tau V$.

2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ РЕАКТОРОВ

Разработанные к настоящему времени плазмохимические реакторы подразделяются на три основных категории (рис. 2): реакторы раздельного, совмещенного и раздельно-совмещенного типов.

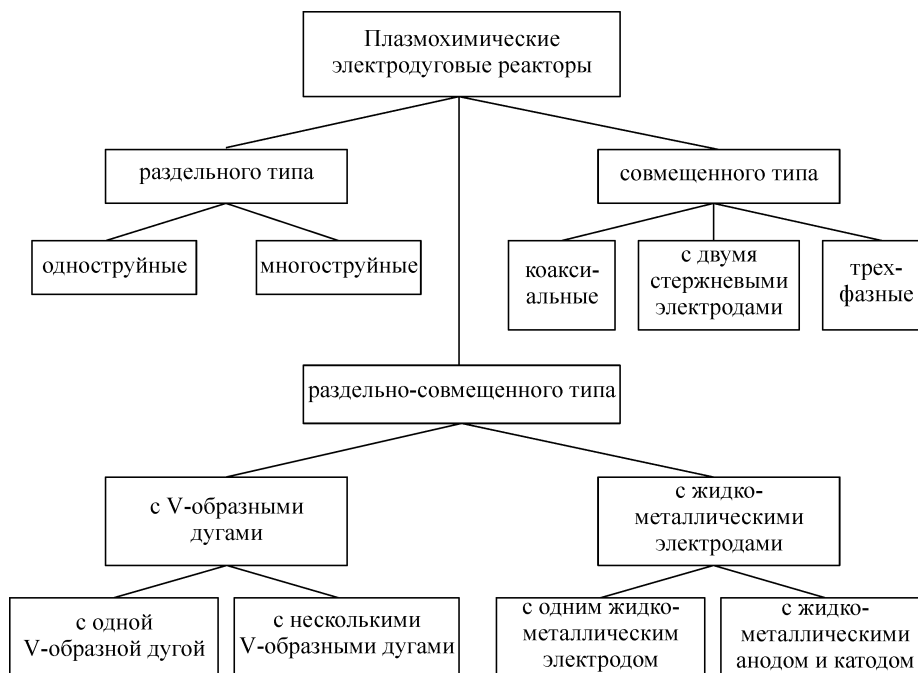


Рис. 2. Классификация электродуговых плазмохимических реакторов.

2.1. Струйные реакторы

В них зоны плазмогенерации и плазмохимического реагирования пространственно разобщены. Генерация плазмы в этих реакторах осуществляется с помощью одного или нескольких плазмотронов, работающих на одну общую камеру смешения, являющуюся по существу реактором. На рис. 3 показана схема трехструйного реактора для газификации угля в среде пароводяной плазмы.

Достоинствами этих реакторов являются:

- быстрое смешение высокотемпературных газовых струй с перерабатываемым сырьем,
- возможность большого увеличения мощности реактора за счет увеличения числа работающих плазмотронов и роста единичной мощности каждого из них,
- возможность раздельного питания каждого плазмотрона своим плазмообразующим газом, что позволяет подбирать в реакторе реакционную среду требуемого состава,
- повышенный за счет рассредоточения мощности ресурс непрерывной работы реактора,
- возможность отключения при работе, например, для профилактики одного или нескольких плазмотронов без заметного изменения мощности реактора в целом,
- мобильность изменения режима работы, обеспечивающая легкость автоматизации процесса и др.

Этот тип реакторов прост в изготовлении. Конструктивно он представляет собой цилиндрическую водоохлаждаемую стальную камеру с крышкой, к которой крепятся один или несколько плазмотронов. К концу реактора могут присоединяться закалочная камера и шлакосборник. При необходимости реактор изнутри может иметь футеровку из жаростойкого материала. Наличие осевой симметрии позволяет сделать операцию установки теплозащитного слоя предельно простой.

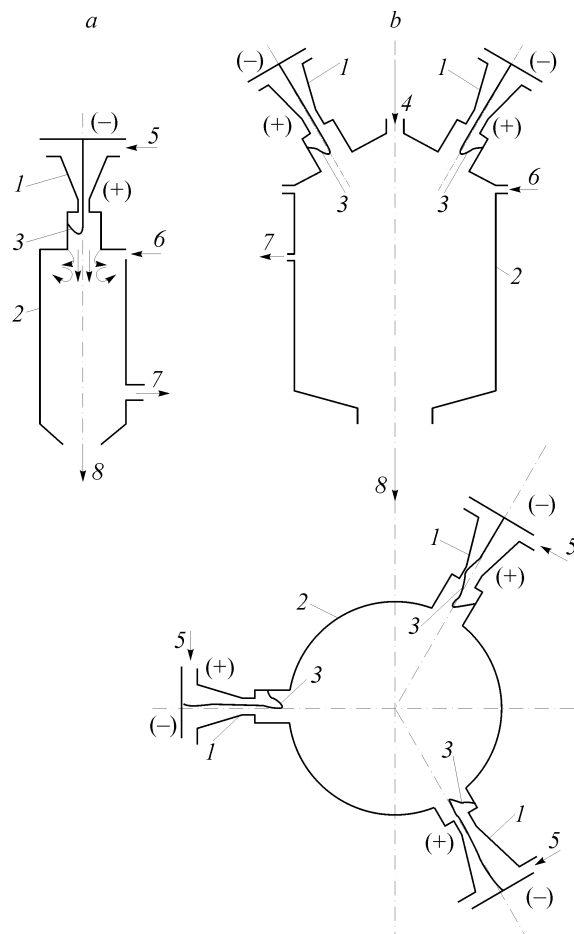


Рис. 3. Реакторы раздельного типа: одноструйный (а), многоструйный (б).

Плазматрон (1), реакционная камера (2), дуга (3), дисперсный реагент (4), плазмообразующий газ (5), реагент (6), продукт (7), шлак (8).

Настоящая схема реактора достаточно хорошо исследована. Для расчета тепловых потерь в водоохлаждаемую стенку реактора без футеровки используется предложенная в работе [10] формула

$$(1-\eta)/\eta = 145(\bar{L})^{0,50} \text{Re}^{-0,75},$$

проверенная в диапазоне изменения критериев подобия:

$$\text{Re} = 5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4, \bar{L} = 2 - 4.$$

Аналогичная экспериментальная формула, полученная в работе [10] для реактора с двухслойной футеровкой из графита и асбеста, имеет вид

$$(1-\eta)/\eta = 105 \cdot \text{Re}^{-0,85} (\bar{L})^{0,63}.$$

Формула справедлива в интервале изменения критериев подобия:

$$\text{Re} = 700 - 2300, \bar{L} = 1 - 10.$$

В работе показано, что даже небольшие слои изоляции позволяют увеличить тепловой КПД реактора на 7 % из-за снижения тепловых потерь [11] в стенку из-за повышения ее температуры.

Использование принципа ротации, состоящего в том, что без остановки реактора можно периодически по заданному циклу заменять поочередно плазмотроны для производства регламентных работ, замены электродов и т. д., практически обеспечивает бесконечно большой ресурс непрерывной работы многоструйного реактора в целом.

Достоинством реакторов раздельного типа является также то, что в них горение дуги происходит в идеальных условиях без вредного воздействия вводимого сырья.

2.1.1. Струйные реакторы с вихревой тепло- и массоизоляцией

Многоструйные реакторы допускают внутри своего класса различные модификации. Интересным вариантом является реактор вихревого типа. В нем при определенных условиях удается рассредоточить дисперсный материал, подвергающийся плазменной обработке, в определенных зонах реактора, расположенных на некоторых расстояниях от оси [13], что практически исключает возможность массопереноса на стенку реактора, повышая тем самым его КПД. Для одноструйных реакторов этот факт экспериментально исследован в работе [13].

Существование эффекта радиального распределения дисперсного материала в условиях трехструйного вихревого реактора показано в работе [14]. При проведении этой работы использовался метод дымовых продувок. Схема эксперимента представлена на рис. 4. Световой нож формировался с помощью системы из трех линз. Параллельный пучок света, формируемый двумя собирающими линзами Л1 и Л2, разворачивается в вертикальной плоскости цилиндрической линзой Л3. Щелевая диафрагма вырезает из него плоский луч света — световой нож, который направляется на исследуемый объект — прозрачную модель реактора, продуваемую дымом. Образующиеся в реакторе при дымовых продувках конфигурации, состоящие из дымовых частиц, оказываются рассеянными световым ножом. Свет рассеивается на них и при наблюдении объекта с направления преимущественного рассеяния дымовая конфигурация визуализируется. Ее можно наблюдать и фотографировать. Из-за конденсации дыма подводящий дымопровод должен быть максимально коротким. В нашем случае генератор дыма установлен непосредственно на крышке реактора (см. рис. 4). Наличие вентиля В1 позволяет изменять расход воздуха через дымогенератор и тем самым регулировать его производительность.

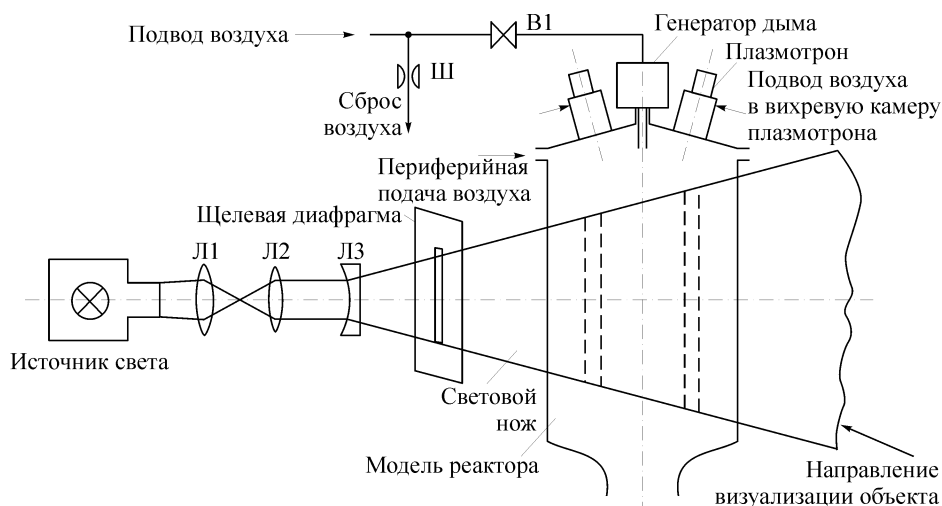


Рис. 4. Схема установки по исследованию столбообразных конфигураций.

Источником света служила лампа ДРШ-250. Дым, подаваемый в верхнюю часть реактора, в зависимости от аэродинамической обстановки внутри него заполнял либо весь объем реактора, либо располагался в определенных его зонах.

Исследованию подвергалась модель трехструйного реактора с расположенными на его верхней крышке тремя плазмотронами, установленными так, чтобы углы между их осями в плане составляли 120° . Выяснено, что при определенных условиях (рис. 5) частицы дыма собираются на определенном расстоянии от оси, образуя устойчивую цилиндрическую конфигурацию диаметром, близким к диаметру выходного отверстия реактора.

Установлено, что образование таких конфигураций реализуется при определенном соотношении расходов $\xi = G_n / G_\Sigma$, где G_n — периферийный расход воздуха через крышку реактора, G_Σ — суммарный расход воздуха через плазмтроны.

В координатах $G_n - G_\Sigma$ (см. рис. 5) область существования стационарного цилиндрического распределения дымовых частиц расположена между двумя пограничными линиями $G_{n, \max}$ и $G_{n, \min}$. При $G_n > G_{n, \max}$ — дымовые частицы размываются по всему сечению реактора, при $G_n < G_{n, \min}$ — конфигурация начинает пульсировать и тоже размывается. Дополнительным условием стабильности цилиндрического распределения частиц является совпадение направлений периферийной и плазмтронных закруток потоков. Изменение направления вращения хотя бы одного из вихрей разрушает картину распределения. Явление образования вблизи оси вихревой камеры устойчивых “столбообразных” структур из мелкодисперсных частиц изучено еще недостаточно.

На частицу, вовлеченную вихревым потоком в движение вокруг оси, действует система сил, состоящая из центробежной, газодинамической и сил Стокса и Магнуса. Оценки показывают, что газодинамической силой и силой Магнуса можно пренебречь, т. к. они на несколько порядков меньше центробежной силы. Центробежная сила $F_{цб} = (1/6) \pi d_p^3 \rho_p V_\varphi^2 / R$ и сила Стокса $F_{ст} = 3\pi r d_n V_R$ одного порядка, т. е. $F_{ст} / F_{цб} \approx 1$ или

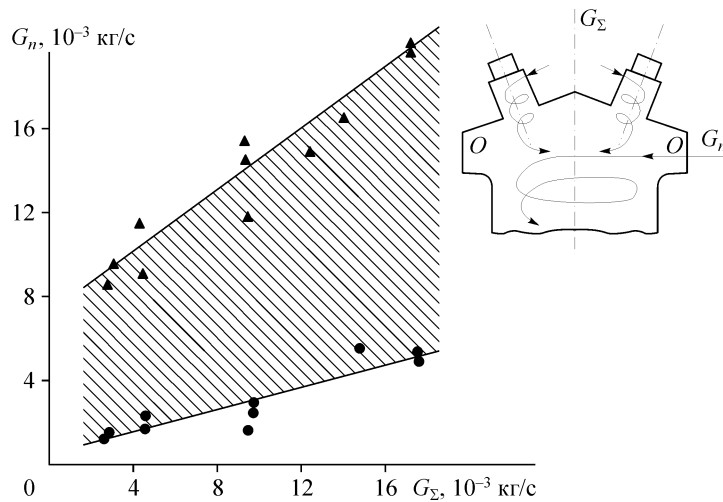


Рис. 5. Область стабильного существования столбообразных конфигураций.

$$\frac{9}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{R}{d_p^2} \frac{V_R \eta}{V_\phi^2} \approx 1,$$

где d_p, ρ_p — диаметр и плотность частицы соответственно, V_ϕ, V_R — тангенциальная и радиальная составляющие скорости вихря в реакторе соответственно, η, ρ — динамическая вязкость и плотность среды в реакторе соответственно.

Из этой формулы видно, что с уменьшением размера частиц и их плотности зона их сосредоточения располагается ближе к оси реактора. При наличии частиц разного размера, как обычно и бывает, более крупные частицы оказываются дальше от оси, а мелкие — ближе к ней. Поэтому, если имеется четкое разделение частиц в вихревом реакторе на n размерных фракций, то в нем должно наблюдаться n столбообразных концентрично расположенных конфигураций разных радиусов. В реальности четких фракций нет, а есть определенное распределение частиц по размерам, что дает в результате столбообразную конфигурацию конечной толщины с размытыми наружной и внутренней границами. Кроме того, поскольку частицы в реакторе реагируют со средой, масса и плотность их уменьшается. От частицы остается лишь ажурный каркас, состоящий, например, при газификации бурого угля из минеральной его части. Отсюда следует, что реагирующая частица по мере взаимодействия со средой постепенно мигрирует в направлении к оси и выводится из реактора по спиральной сужающейся траектории.

Таким образом, вихревая стабилизация дисперсного материала обеспечивает:

- массоизоляцию реактора,
- технологическую направленность в процессе переработки (от периферии к центру),
- низкие потери тепла через стенку реактора.

2.2. Реакторы совмещенного типа

В реакторах такого типа реакционная зона и зона тепловыделения объединены в одном объеме. Они позволяют перерабатывать высококонцентрированные пылегазовые смеси в соотношении шихта: газ, равном 15:1 и более, т. к. подача обрабатываемого материала в зону разряда повышает энергетическую эффективность технологического устройства [8].

В качестве примера на рис. 6 приведена конструкция электродугового реактора совмещенного типа, работающего на постоянном токе [15]. Реактор состоит из цилиндрической камеры с футеровкой из огнеупорного материала для снижения тепловых потерь через стенку. Плазмообразующий газ вводится тангенциально в зону горения дуги, а измельченный твердый материал подводится сверху. Магнитное поле выполняет две функции. Во-первых, под действием поперечной силы движение дуги интенсифицируется. Усиливается ее тепловое взаимодействие с реагентами, делая более эффективным протекание плазмохимических реакций. Во-вторых, увеличивается электрическое сопротивление

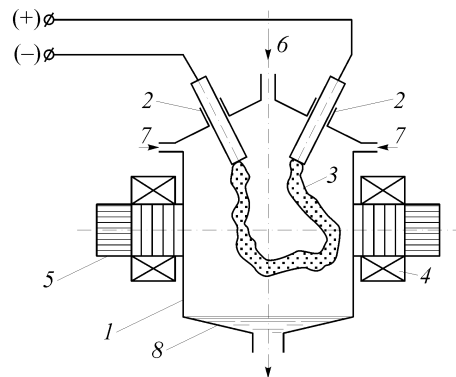


Рис. 6. Реактор совмещенного типа постоянного тока.

Камера (1), стержневые электроды (2), дуга (3), катушки (4), магнитопровод (5), ввод дисперсного сырья (6), плазмообразующий газ (7), шлак (8).

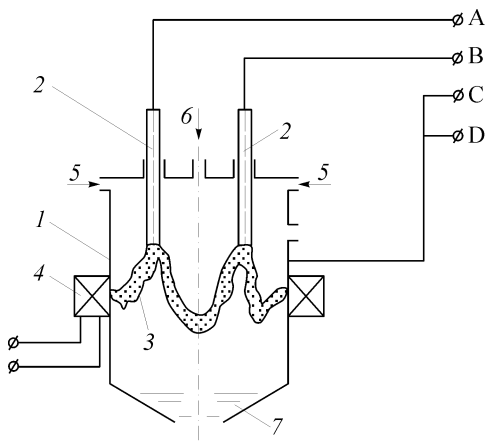


Рис. 7. Трехфазный реактор совмещенного типа.

Камера (1), стержневые электроды (2), дуга (3), соленоид (4), плазмообразующий газ (5), дисперсное сырье (6), шлак (7).

ление дуги, ее вольтамперная характеристика становится более восходящей и создаются условия для работы реактора без балластного сопротивления. Поперечное магнитное поле создается подковообразным магнитом. Его обмотка последовательно соединяется с дугой.

Другая конструкция реактора совмещенного типа (рис. 7) отличается тем, что в нем использован трехфазный переменный ток. Постоянное продольное магнитное поле образуется с помощью соленоида. Два электрода — угольные, как и в первой конструкции, а третьим служит заземленный корпус. Футеровка отсутствует. Под действием ponderomotorных сил дуги перемещаются в межэлектродном пространстве, перекрывая все сечение реактора. Образующиеся шлаки стекают из реактора в шлакоосборник. В таком реакторе могут перерабатываться двухфазные потоки с весовым соотношением шихта: газ, равным 10:15 [1].

На рис. 8 показана принципиальная схема коаксиального электродугового реактора совмещенного типа с одним стержневым (расходуемым графитовым) электродом и одним кольцевым. Питание дуги осуществляется однофазным переменным током [8]. Трубчатый электрод выполнен из графита и плотно вставлен внутрь стального водоохлаждаемого корпуса реактора. Обрабатываемый материал в виде порошка и газообразный реагент подаются в реактор сверху. Электрическая дуга, взаимодействуя с осевым постоянным магнитным полем, вращается, ометая все поперечное сечение реактора. Поскольку ток дуги переменный, то вращение периодически меняет свое направление. Это вызывает дополнительную турбулизацию течения в реакторе, еще более усиливая взаимодействие между реагентами. Осевое магнитное поле создается электромагнитной катушкой, питающейся постоянным током.

Из теории подобия следует, что с увеличением размеров установки, т. е. с увеличением мощности, тепловой коэффициент полезного действия возрастает как [15]

$$\eta_T = 1 - (a/H),$$

где a — постоянный размерный коэффициент, H — характерный размер.

Однако создание совмещенных электродуговых реакторов представляет

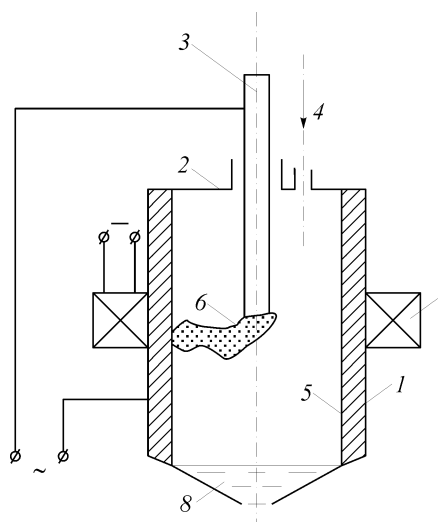


Рис. 8. Коаксиальный реактор совмещенного типа.

Камера (1), стержневые электроды (2), дуга (3), катушки (4), магнитопровод (5), ввод дисперсного сырья (6), плазмообразующий газ (7), шлак (8).

собой довольно сложную техническую задачу. Это обусловливается трудностью организации устойчивого горения дуги в дуговой камере, сложностью самой конструкции и особенно ее магнитной системы. Поэтому в реакторах совмещенного типа достаточно проблематичен вопрос повышения мощности установки.

Это усугубляется также и отсутствием в настоящее время источников большой (порядка 10–100 МВт) единичной мощности. Напомним, что этого нельзя сказать об n -струйных (многоструйных) реакторах, где каждый из плазмотронов питается от индивидуального источника и для которых проблема набора мощности менее остра из-за суммирования мощностей плазмотронов. Последнее справедливо и для многопарных реакторов V-образного типа. В настоящее время разработано достаточно много эффективных конструкций реакторов совмещенного типа средней мощности (порядка нескольких сот киловатт) и интерес к ним сохраняется. Большой интерес представляют реакторы комбинированного типа [16], вобравшие в себя достоинства реакторов обоих типов.

2.3. Реакторы разделяюще-совмещенного типа

В этих установках только часть внутренней полости реактора является объемом, в котором одновременно протекают и химическое взаимодействие реагентов и плазмогенерация. Остальная часть объема используется исключительно в интересах плазмогенерации.

К таким реакторам относятся реакторы V-образного типа и реакторы с расплавленными (жидкометаллическими) электродами.

2.3.1. Реакторы V-образного типа

Эти реакторы (рис. 9) вобрали в себя достоинства отдельных и совмещенных реакторов.

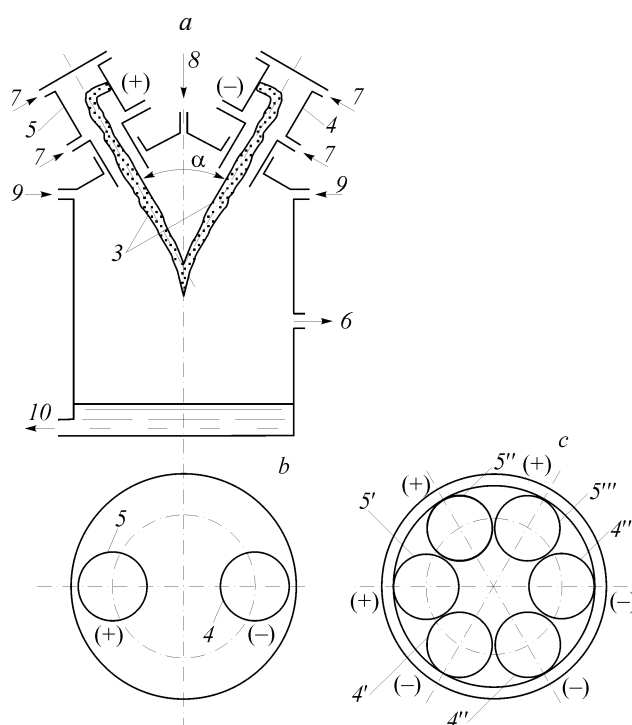


Рис. 9. Реактор V-образного типа.

a — продольный разрез корпуса (1) реактора, крышка (2), дуга (3), анодные узлы (4, 4', 4'', 4'''), катодные узлы (5, 5', 5'', 5'''), газообразный продукт (6), плазмообразующий газ (7), дисперсное сырье (8), технологический газ (9), шлак (10); реакторы с одной (b), с тремя (c) V-образными дугами (вид сверху).

Приэлектродные участки дуги работают, по сути, в идеальных для горения электрической дуги условиях. На работу электродных узлов не влияют вводимые в реактор химические реагенты. Поджиг дуги и запуск V-образной дуги протекают в обычных для плазмотронов линейных схем условиях. В зависимости от того, какие катоды используются: термоэлектронные (горячие) или автоэлектронные (холодные), могут быть разработаны различные варианты схем V-образных реакторов. Наиболее перспективными являются схемы с трубчатыми катодами и анодами. При этом могут быть использованы различные способы сканирования дуговыми пятнами рабочих участков электродов, например, газовое, аэромагнитное, магнитно-дискретное, магнитно-волновое, автосканирование и т. д. [18, 19].

В V-образных реакторах очень важен выбор величины угла α — угла сходимости плазменных струй в затопленном пространстве. Исследования влияния этого угла на устойчивость горения V-образной дуги показывают, что оптимален угол α порядка 60° . Если он меньше, то возрастают пульсации напряжения и тока дуги, что ведет к неустойчивости разряда. Если $\alpha > 60^\circ$, то увеличиваются потери тепла в стенку, что понижает тепловой КПД реактора.

Достоинством, заимствованным от схем реактора совмещенного типа, является ввод реагентов, в том числе и порошкообразных, непосредственно в зону горения дуги. Это увеличивает эффективность тепловой обработки порошкообразного сырья, повышает турбулентное перемешивание струй реагентов, повышая производительность процесса химического взаимодействия.

Реактор V-образного типа внешне напоминает многоструйный реактор. Он тоже имеет цилиндрическую форму. Имеется также крышка, в которой под углом 60° установлены два (т. е. одна пара) электродных узлов. Электродных узлов может быть и больше одной пары: две, три, четыре и т. д. Нарастиванием числа пар электродных узлов можно пропорционально их числу увеличивать мощность реактора. Кроме того, V-образная многопарная схема реактора позволяет, как и в случае многоструйного реактора, использовать метод поочередной ротации электродных узлов для производства их профилактики или замены. Это позволяет, как и в многоструйных реакторах, обеспечить практически неограниченный ресурс работы реактора в целом.

Таким образом, реакторы V-образного типа, вобравшие в себя достоинства остальных схем, можно считать наиболее перспективными.

2.3.2. Реакторы с расплавленными (жидкометаллическими) электродами

Такие реакторы бывают двух видов: с одним и с двумя расплавленными электродами.

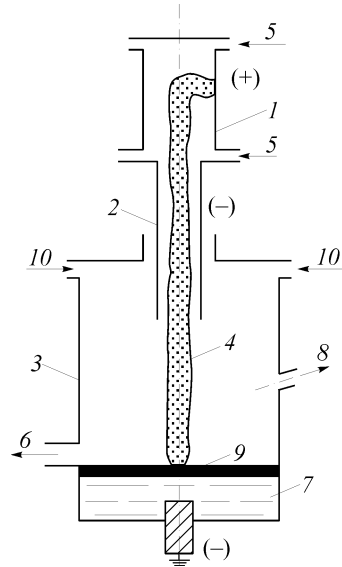
2.3.2.1. Реактор с одним жидкометаллическим электродом

Он состоит из цилиндрического корпуса (рис. 10), в верхней части которого смонтирован, анодный узел с пусковой диафрагмой и относительно короткой цилиндрической дуговой камерой. Обратная полярность подключения обеспечивает пусковому узлу повышенный ресурс работы.

Анодный узел изолирован от остальной конструкции. Внизу реактора под открытым концом трубчатой дуговой камеры расположена ванночка с электропроводящим материалом, подключенная к отрицательной заземленной клемме источника питания. В анодный узел подается плазмообразующий газ. После осциллирования загоревшаяся дуга замыкается на диафрагму, обеспечивая косвенный режим нагрева. С повышением расхода дуга выдувается из нижнего конца камеры и замыкается на содержимое ванночки. За счет энергии плазменной струи и тепла,

Рис. 10. Реактор с одним жидкометаллическим подовым электродом.

Катодный узел (1), пусковой анод (2), камера (3), дуга (4), плазмообразующий газ (5), дисперсное сырье (6), продукт (7), жидкометаллический катод (8), жидкометаллический анод (9), шлак (10), летка (11), корпус реактора (12).



выделяющегося в катодном пятне дуги $Q_K = I \cdot U_K$, материал в ванночке, которым может быть железо или любой другой металл, расплавляется.

Естественно, что в самом пятне дуги температура достигает $T_{\text{кип}}$ и выше. Материал в ванночке кипит и испаряется, насыщая своими парами пространство в реакторе и загрязняя в нем плазموхимическую среду.

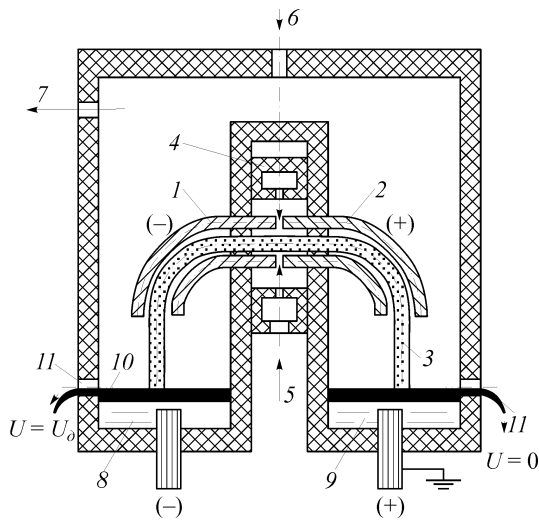
Для оценки ресурса работы жидкометаллического электрода и степени загрязнения среды предположим, что подводимая к жидкометаллическому электроду мощность, равная $Q_K = I \cdot U_K$, где $U_K \approx 10 \text{ В}$ — катодное падение потенциала, I — ток дуги, полностью затрачивается на испарение. Тогда из баланса энергии:

$$I \cdot U_K = G_c \cdot \lambda_{\text{исп}},$$

где $\lambda_{\text{исп}} = 6,1 \text{ кДж/г}$ [20] — скрытая теплота испарения железа, секундный расход G_c жидкометаллического электрода

$$G_c = \frac{I \cdot U_K}{\lambda_{\text{исп}}} = \frac{500 \cdot 10}{6,1 \cdot 10^3} = 0,82 \text{ г/с}.$$

Это приблизительно в 10^3 раз больше эрозии медного анода при работе газодвухвального плазмотрона на токе 500 А. Суточный расход жидкометаллического электрода равен $G_{\text{сут}} = 0,82 \cdot 3600 \cdot 24 = 70,8 \cdot 10^3 \text{ г} = 70,8 \text{ кг}$, а годовой — $G_{\text{год}} = 70,8 \cdot 365 = 25,8 \cdot 10^3 \text{ кг} = 25,8 \text{ тонн}$.



В действительности этот результат несколько завышен. Не все тепло идет на испарение. Часть рассеивается в окружающее пространство. Часть испарившегося металла обязательно вернется назад в ванну и сконденсируется в ней и не только в ней, но

Рис. 11. Реактор с двумя жидкометаллическими электродами.

Пусковой катод (1), пусковой анод (2), дуга (3), вихревая камера (4), плазмообразующий газ (5), дисперсное сырье (6), продукт (7), жидкометаллический катод (8), жидкометаллический анод (9), шлак (10), летка (11), корпус реактора (12).

и на внутренних стенках реактора, нарушая электроизоляцию электродного узла. А это нежелательно, т. к. могут возникнуть трудности с повторными запусками, когда поверхность металлической ванны окажется окисленной, если плазмообразующая среда содержит в своем составе кислород. Т. е. эта схема чревата рядом неприятных последствий.

Но термин жидкометаллический электрод не означает, что он должен быть неохлаждаемый. Наличие в нем мощного испарения металла говорит лишь о том, что определенную часть тепла надо снимать обычным охлаждением. С помощью него можно свести скорость испарения до любого желательного уровня $G_{\text{исп}}^*$. Для этого надо подать в систему охлаждения жидкометаллического электрода воду в количестве $G_{\text{в, ж}}$, равном

$$G_{\text{в, ж}} = \frac{U_{\text{к}} I - G_{\text{исп}}^* \cdot \lambda_{\text{исп}}}{C_{\text{в}} (t_{\text{к}} - t_{\text{о}})}.$$

Это выражение следует из уравнения баланса энергии

$$U_{\text{к}} I = G_{\text{исп}}^* \cdot \lambda_{\text{исп}} + G_{\text{в, ж}} \cdot C_{\text{в}} (t_{\text{к}} - t_{\text{о}}),$$

где $C_{\text{в}}$ — удельная теплоемкость воды, $t_{\text{к}}$, $t_{\text{о}}$ — конечная и начальная температуры воды в системе охлаждения.

Таким образом, совсем несложно избавиться от чрезмерного загрязнения среды в реакторе.

2.3.2.2. Реакторы с жидкометаллическими катодом и анодом

Прототипом электродугового узла этого реактора является газовихревой плазмотрон с двухсторонним истечением [21], имеющий два противоположно направленных выходных трубчатых электрода.

Если плавно загнуть концы обоих трубчатых электродов вниз и подать в вихревую камеру газ, то вихревое течение от этого не нарушится. Последующий поджиг дуги приведет к тому, что некоторое увеличение расхода вынесет ее приэлектродные участки на установленные под загнутыми концами одноименные электроды (рис. 11) [22]. Изобретение — остроумно и в целом ряде случаев может успешно использоваться.

В этой схеме один из жидкостных электродов делается заземленным, а другой всегда находится под высоким напряжением дугового разряда. Это обстоятельство в ряде случаев, связанных со шлакоудалением, приводит к трудностям в эксплуатации такого устройства.

От чрезмерного загрязнения плазменной среды в реакторе здесь, как и в предыдущем случае, можно избавиться путем должного охлаждения электродных узлов. Эти реакторы неосесимметричные, что делает их менее технологичными в изготовлении. Следствием этого являются и высокое значение удельной поверхности, а следовательно и повышенные тепловые потери через стенку и меньший тепловой КПД, чем у реакторов других схем.

Плазмохимические реакторы — это пример новой техники и, естественно, по мере внедрения их в различные виды производств они непрерывно будут совершенствоваться в части увеличения теплового КПД, мощности, производительности и ресурса работы.

Использование, например, в новых разработках внутренней футеровки реакционных зон существенно снизит теплообмен плазменной среды со стенками [12], что существенно повысит тепловой КПД. Целесообразно также и использование разработанных ранее [24, 25] схем и моделей процессов смешения струй и дисперсных реагентов и др.

ВЫВОДЫ

В настоящее время существует несколько принципиальных схем электродуговых плазмохимических реакторов.

1. Струйные реакторы раздельного типа. Они очень компактны. В многоструйном исполнении они обладают большим — практически неограниченным ресурсом работы, т. к. позволяют использовать принцип поочередной ротации плазмотронов без остановки всей технологической линии. Их суммарная мощность также достаточно велика. Особенно хороши они при использовании газообразных реагентов и легко обеспечивают плазмообразующую среду любого требуемого состава.

2. Реакторы совмещенного типа. Их целесообразно использовать при наличии порошкообразных реагентов. Они обладают высоким тепловым КПД, особенно на повышенных мощностях. Однако их создание представляет собой довольно сложную техническую задачу. Это обусловливается трудностью организации устойчивого горения дуги в дуговой камере, сложностью самой конструкции и особенно ее магнитной системы.

3. Реакторы раздельно-совмещенного типа. Следует выделить среди них реакторы с V-образными дугами, т. к. они вобрала в себя достоинства реакторов двух первых схем.

4. Реакторы с двумя жидкометаллическими электродами. Они также являются реакторами раздельно-совмещенного типа. В них один из электродов всегда находится под высоким напряжением дуги, что существенно ограничивает их технологические возможности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даутов Г.Ю., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И. и др. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы. Новосибирск: Наука. СП РАН, 2004. 464 с. (Низкотемпературная плазма. Т. 20).
2. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Михайлов Б.И. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука. СП РАН, 1999. 712 с. (Низкотемпературная плазма. Т. 17).
3. Жуков М.Ф., Михайлов Б.И. и др. Новые технологии сжигания топлива // Энергетика страны и регионов. Теория и методы управления. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. С. 176–190.
4. Mikhailov B.I. The Influence of turbulence on coal gasification in a plasmachemical reactor // ICMAR, June 30–July 6, 2008. Novosibirsk, Russia. Abstracts. Part II. P. 110–111.
5. Колобова Е.А. Газификация углей и шлама гидрогенизации в плазме водяного пара // Химия твердого топлива. 1983. № 2. С. 91–96.
6. Георгиев И.Б., Михайлов Б.И. Газификация угля в плазме водяного пара // Химия высоких энергий. 1991. Т. 25, № 1. С. 76–80.
7. Парфенов О.Г., Пашков Г.Л. Проблемы современной металлургии титана. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. 279 с.
8. Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990. 200 с.
9. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Моссэ А.Л. и др. Плазмохимическая технология. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991. 392 с. (Низкотемпературная плазма. Т. 4).
10. Жуков М.Ф., Сухинин Ю.И., Воробьева Н.М. Камера смешения многодугового подогревателя // Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы. Алма-Ата: Изд-во Каз. ПТИ. 1970. С. 518–523.
11. Галевский Г.В., Корнилов А.А., Крутский Ю.Л., Лимихов Л.К. Исследование энергетического баланса трехструйной плазмохимической установки // Исследование плазменных процессов и устройств. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1978. С. 117–125.
12. Михайлов Б.И. Влияние футеровки плазмохимического реактора на теплообмен // III Всеросс. конф., 16–20 марта 2009. Новосибирск, Россия, Тез. докл. С. 115–116.
13. Багрянев Г.И., Кислых В.И. Нарушение разделения мелких частиц в вихревой камере // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1980. № 3. Вып. 1. С. 23–29.
14. Михайлов Б.И., Иохимович Я.Б., Янковский А.И. Модельные исследования многоструйного плазмовихревого реактора // X Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. Минск, 1980. Ч. 2. С. 119–120.

15. **Ибраев Ш.Ш., Сакипов З.Б.** Электродуговые реакторы совмещенного типа и методика их расчета. Алма-Ата: Изд-во Гылым, 1991. 48 с. (Препринт).
16. **Войчак В.П., Михайлов Б.И., Гончаров А.Г.** Разработка плазменного газогенератора для ТЭС // XI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. Новосибирск, 1989. Ч. 1. С. 32–33.
17. **Сергеев П.В., Ибраев Ш.Ш., Локша В.К., Шепель Г.А.** О несущей способности дуги, горящей в коаксиальном нагревателе // Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. 1975. Алма-Ата: Наука Казахской ССР. Вып. 10. С. 157–163.
18. **Михайлов Б.И.** Сканирование пятном дуги трубчатых электродов в газовихревых плазмотронах // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 2. С. 415–430.
19. **Михайлов Б.И.** Автосканирование в плазмотронах с магнитовихревой стабилизацией // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 3. С. 551–553.
20. **Физический** энциклопедический словарь. Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1962. 608 с.
21. **Жидович А.И., Кравченко С.К., Ясько О.И.** Плазмотрон двухстороннего истечения с переменным диаметром электродов. ИФЖ, 1968, 15, № 2. С. 203–206.
22. **Предтеченский М.Р., Тухто О.М.** Плазмотрон с жидкометаллическими электродами // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40, № 2. С. 149–154.
23. **Тухватуллин А.М., Засыпкин И.М.** Плазмохимическая технология переработки углеводородного сырья, обезвреживания и утилизации токсичных отходов // Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы. (Низкотемпературная плазма. Т. 20). Новосибирск: Наука. Сибирское отделение РАН, 2004. С. 307–327.
24. **Моссэ А.Л., Буров И.С.** Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. Минск: Наука и техника. 1980. 208 с.
25. **Сурис А.Л.** Плазмохимические процессы и аппараты. М.: Химия. 1989. 314 с.

Статья поступила в редакцию 1 июня 2009 г.