УДК: 533.17; 533.9.072; 533.92

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Мышкин Вячеслав Фёдорович,

доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической физики Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: gos100@tpu.ru

Хан Валерий Алексеевич,

доктор технических наук, доцент кафедры технической физики Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: nt.centre@mail.ru

Беспала Евгений Владимирович,

аспирант кафедры технической физики Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: bespala90@tpu.ru

Тихи Милан,

PhD-профессор кафедры поверхностей и физики плазмы факультета математики и физики Карловского университета, Чешская Республика, 11000, Прага 8, В Холесовичках, 2. E-mail: tichy@nbox.troja.mff.cuni.cz

Ижойкин Дмитрий Александрович,

кандидат физико-математических наук, начальник информационноаналитического отдела Томского государственного архитектурно-строительного университета, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2. E-mail: info@tsuab.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации геометрии плазмохимического реактора для увеличения изотопных эффектов.

Цель работы: поиск оптимальной геометрии плазмохимического реактора, обеспечивающего локализацию высокотемпературной части плазменного потока в осевой области для снижения эффекта обратной диффузии, приводящей к выравниванию изотопной концентрации.

Методы исследования: расчеты и оптимизация газовых потоков внутри плазмохимического реактора путем решения нестационарных уравнений Навье-Стокса и Фурье методом конечно-разностных элементов при помощи пакета COMSOL.

Результаты. Приводятся результаты исследований по оптимизации процесса спиновой сепарации изотопов углерода в низкотемпературной неравновесной плазме, помещенной в постоянное магнитное поле. Проведен анализ процессов, происходящих внутри плазмохимического реактора постоянного диаметра. Показано, что уменьшение изотопных эффектов связано с окислением дисперсной фазы, образующейся на стенках реактора. Предложена конструкция реактора, изолирующая высокотемпературный плазменный поток от стенок камеры. Проведен расчёт газовых потоков внутри плазмохимического реактора с периодически установленными диафрагмами. Показано, что для контрагирования высокотемпературного газового потока в центральной области и изолирования его от стенок плазменного реактора можно использовать тонкие диафрагмы из жаростойкого материала. Из результатов расчетов видно, что диафрагмы конческой формы более эффективны, чем плоские. Установлено, что использование плазменного реактора с диафрагмами для разделения газовой и дисперсной фаз эффективно при расходах плазмообразующего газа, превышающего критическое значение. При этом в значительной мере сохраняется максимально возможный изотопный эффект, возникающий при плазменном неполном окислении паров углерода в магнитном поле.

Ключевые слова:

Плазменный поток, реактор, изотоп углерода, окисление, сажа.

Введение

Плазменные технологии являются одним из перспективных способов переработки газообразного и твердого сырья [1–4]. В низкотемпературной плазме степень ионизации меньше 1 %, а скорости протекания химических реакций значительно выше, чем при комнатных температурах. Неравновесность высокочастотной газоразрядной плазмы позволяет осуществлять физико-химические процессы, невозможные в иных условиях. Нами исследуется изотопный эффект при неполном окислении углерода в низкотемпературной плазме высокочастотного факельного разряда, находящегося во внешнем постоянном магнитном поле [5–7]. Целевой эффект связан с разделением ядер углерода с разными спинами между газовой и конденсированной фазами, подобно магнитному изотопному эффекту в жидкости.

При продвижении плазменного потока вдоль оси реактора непрореагировавший углерод выносится на периферийные, более холодные области разрядного канала и образует дисперсную фазу. При этом во внешнем постоянном магнитном поле содержание ¹³С в газовом и дисперсном продуктах плазменных процессов различается.

В условиях низкотемпературной плазмы изотопный эффект может уменьшиться относительно расчетного значения из-за вероятности окисления образующегося дисперсного углерода при его движении к стенкам плазмохимического реактора через диффузную оболочку разряда. Также возможно окисление образующейся на стенках реактора сажи при контакте стенки с высокотемпературным потоком, содержащим кислород. Поэтому необходимо использовать методы быстрого разделения газовой и дисперсной фаз, образующихся в плазменных процессах [8]. Это возможно путем ограничения высокотемпературной области разряда в осевой части плазмохимического реактора.

Известен метод локализации плазменного канала в осевой части путем тангенциальной подачи плазмообразующей смеси. Однако эффективность сжатия плазменного канала, при тангенциальной подаче плазмообразующей смеси, уменьшается при малых расходах газа.

Цель исследования – поиск оптимальной геометрии плазмохимического реактора, обеспечивающего локализацию высокотемпературной части плазменного потока в осевой области.

Физико-химические процессы в низкотемпературной плазме

Экспериментальные исследования связаны с формированием потока низкотемпературной плазмы в виде факельного разряда с графитового электрода при помощи высокочастотного генератора. В нижнюю часть кварцевого плазмохимического реактора (*d*=0,1 м, *h*=0,6 м) тангенциально подается смесь аргона, гелия и кислорода. Задаваемое для экспериментов содержание кислорода 0,001 мольных долей в плазмообразующей смеси недостаточно для полного окисления паров углерода, образующихся при испарении графитового электрода. В плазмообразующей смеси также возможны незначительные примеси азота. Часть плазмообразующего газа формирует плазменный поток диаметром не более 1 см, в котором происходит неполное окисление паров атомарного углерода. Часть канала плазмохимического реактора занята диффузной оболочкой разряда. Между диффузной оболочкой разряда и стенками реактора образуется поток попутного нагретого газа, температура которого определяет потери на нагрев стенок.

В ВЧ-факельном разряде нагрев плазмообразующей смеси осуществляется электронным ударом. Первый возбужденный электронный уровень имеет следующие значения для атомов: аргона – 93143,76 см⁻¹ [9], кислорода – 15867,86 см⁻¹ [10], углерода – 10192,66 см⁻¹ [11], азота – 19224,46 см⁻¹ [12]. Указанные элементы имеют электронные уровни с энергиями в диапазоне:

- углерод 60333,43–78731,28 см⁻¹;
- кислород 73768,20–97420,99 см⁻¹;
- аргон 104102,10–114975,02 см⁻¹;
- азот 83284,07–104881,35 см⁻¹.

Из-за преобладающего содержания в плазмообразующей смеси аргона основным механизмом нагрева плазмы является возбуждение электронных уровней аргона электронным ударом [13–15]. Нагрев атомов углерода и молекул кислорода происходит в основном при их столкновении с возбужденными атомами аргона.

В низкотемпературной плазме окисление паров углерода возможно в результате протекания следующих газофазных химических реакций:

$$C+O \rightarrow CO, \tag{1}$$

Количество атомарного кислорода в плазме при температурах менее 2500 °С не превышает нескольких процентов. Поэтому вкладом реакции (1) в энергию, выделяющуюся при окислении, можно пренебречь. При недостатке кислорода реакции (3) не наблюдается. По оценкам, энергия, выделяющаяся в результате реакции (2), с учетом всего вводимого в плазменный поток углерода, не превышает 5 Дж. Это значительно меньше 4 кДж/с электроэнергии, потребляемой ВЧ-генератором. Поэтому влиянием химических реакций на баланс энергии можно пренебречь.

Химические реакции (1) и (2) являются радикальными, поэтому во внешнем магнитном поле может проявляться изотопный эффект. Скорость образования оксида углерода в смеси его изотопов описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{d[\text{CO}(t)]}{dt} = k_1[\text{C}(t)][\text{O}(t)] + k_2[\text{C}(t)][\text{O}_2(t)], \quad (4)$$

где [CO(t)] – концентрация оксида углерода; [C(t)] – концентрация атомарного углерода; [O(t)] – концентрация атомарного кислорода; $[O_2(t)]$ – концентрация молекулярного кислорода; $k_1(k_2)$ – константа окисления углерода атомарным (молекулярным) кислородом.

Отсутствие в литературе констант скоростей окисления для изотопов углерода не позволяет использовать уравнение (4) для расчета концентрации ¹³СО при различных условиях. Также следует учитывать то, что при температурах менее 2500 °С диссоциация молекулярного кислорода незначительна.

Моделирование и результаты расчета параметров газового потока

Для оптимизации условий формирования дисперсной фазы рассчитывали газодинамику плазменного потока в плазмохимическом реакторе. Ограничение области горячего газового потока от стенок реактора осуществлялось диафрагмами, формирующими открытые к центральной области реактора полости, на стенках которых оседает конденсированная фаза. При этом унос или окисление сажи со стенок реактора остаточным окислителем становится несущественным.

Предполагалось, что в результате локализации потока вдоль канала разряда нагревание пристеночной области происходит лишь посредством теплопроводности в радиальном направлении и излучения. Поэтому температура стенок плазмохимического реактора в области между диафрагмами увеличивается незначительно.

При моделировании необходимы параметры плазмообразующей смеси при температурах 2000-4000 °С. Динамическую вязкость для смеси плазмообразующих газов рассчитывали с помощью соотношения Чепмена-Энского [16]:

$$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^{n} \left[x_i \, \mu_i \, / \sum_{j=1}^{n} x_j \, \Phi_{ij} \right], \tag{6}$$

где x_i – молярная доля *i*-газа; μ_i – динамическая вязкость *i*-газа; Φ_{ij} – коэффициент, определяемый как

$$\Phi_{ij} = (\mu_i)^{0.5} (\mu_j)^{-0.5}.$$
(7)

Для высокочастотного факельного разряда температура в приосевой области плазменной струи не превышает 4000 °C [17]. Поэтому динамическая вязкость для смеси Ar:He=1:1 принята 0,074 Па·с. При этом считалось, что расход плазмообразующего газа не превышает 8 л/мин, а скорость подачи газа 1 м/с. Предполагалось, что газообразные продукты плазмохимической реакции покидают реактор при атмосферном давлении.

Число Рейнольдса для исследуемого газового потока не превышает 1500. Поэтому решали уравнение Навье–Стокса для ламинарного режима движения газового потока [18, 19]:

$$\rho(\vec{u}\nabla)\vec{u} = \nabla[-p\vec{I} + \vec{\tau}] + \vec{F}, \qquad (8)$$

$$\nabla(\rho u) = 0,\tag{9}$$

где ρ – плотность газовой смеси; p – давление; I – единичный тензор; u – вектор скорости газового потока; ∇ – оператор набла; F – вектор массовых сил; τ – тензор вязких напряжений [20]:

$$u = u_x i + u_y j, \tag{10}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j},\tag{11}$$

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j}, \qquad (12)$$

$$\vec{\tau} = \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{u}) \vec{I}, \qquad (13)$$

где μ – динамическая вязкость газовой смеси; ^{*т*} – символ транспонирования.

В связи с вертикальной ориентацией реактора для упрощения решения примем для начального условия решения уравнения Навье-Стокса $u_x=0$, тогда его можно записать как

$$u = u_0 = ju_{y}, \tag{14}$$

где u_x , u_0 , u_y – проекции вектора скорости газового потока на соответствующие оси.

Граничным условием для стенок реактора является прилипание потока газа к стенкам:

$$u = 0. \tag{15}$$

В расчетах принимали, что высокотемпературный газ, находящийся при атмосферном давлении, подается снизу вверх через центральное отверстие диаметром 1 см, располагаемое вместо цилиндрического электрода, а расход плазмообразующего газа обеспечивает ламинарный поток со скоростью 1,8 м/с по оси плазменного канала. Температуру считали равной 3250 °С по всей длине плазмохимического реактора, как средней величины потока с некоторым распределением температуры при атмосферном давлении. Деформацией лопастей диафрагм и стенок реактора пренебрегали.

На рис. 1 приведены расчетные линии равных скоростей потока газа в цилиндрическом реакторе (*a*) и в цилиндрическом реакторе с диафрагмами (*б*, *в*). Диаметр центральных отверстий диафрагм – 2 см. Результаты расчетов показывают, что диафрагмы оказывают существенное влияние на диаметр высокотемпературной части газового потока на участке между диафрагмами. При использовании конических диафрагм газовый поток в периферийных областях реактора еще меньше. Из графиков на рис. 1, *б*–*г* видно, что увеличение угла наклона диафрагмы, так же как и уменьшение диаметра отверстия, способствует большему концентрированию потока газа в области между диафрагмами. При расчетах охлаждение газового потока вдоль его оси не учитывали.

На рис. 2, *а* приведены расчетные графики распределения скоростей плазменного потока по радиусу цилиндрического реактора без дополнительных конструктивных деталей. Размеры приведены в [см]. В области плазменного реактора, между каналом факельного разряда ($r_1=1$ см) и стенками ($r_2=5$ см), наблюдается значительное изменение скоростей потока. В сечении реактора, находящемся на расстоянии 2 см от высоковольтного электрода, скорость потока в его центральной части достигает 0,55 м/с. Для цилиндрического реактора наблюдается расширение потока движущегося газа (рис. 1, *а* и 2, *а*).

Толщина диафрагмы считалась бесконечно малой. Результаты расчетов распределения величины скорости потока газа в зависимости от угла наклона конической диафрагмы показывают, что



Рис. 1. Линии скоростей газового потока (T=3250 °C) в осевом сечении плазменного реактора: а − без диафрагм; б − с наклоном диафрагм − 0°; в − 15°; г − 30°

Fig. 1. Lines of gas flow velocity (T=3250 °C) in the axial section of the plasma reactor: a - without diaphragms; b - slope of the diaphragms -0° ; $c - 15^\circ$; $d - 30^\circ$

диафрагмы с центральным цилиндрическим отверстием ограничивают область потока горячего газа (см. рис. 1, δ -г и 2, δ). При этом профили скоростей потока незначительно изменяются вдоль оси реактора в области установки диафрагмы, а область потока горячего газа ограничена цилиндрической поверхностью радиусом 2 см, равной диаметру диафрагмы. Диафрагмы предотвращают контакт горячего газа со стенками. На расстоянии 10 см от высоковольтного электрода, где отсутствуют диафрагмы, высокотемпературный газовый поток расширяется и занимает практически всё сечение плазменного реактора.

Экспериментально, из относительных интенсивностей линий свечения аргона, было определено распределение газовой температуры разрядного канала в плазмохимическом реакторе в форме полого цилиндра. При этом факельный разряд возбуждался в реакторе из кварцевого стекла с внутренним диаметром 48 мм с помощью ВЧ-генератора мощностью 4 кВт (частота – 27 МГц). Из экспериментальных данных, полученных на расстоянии от высоковольтного электрода 3-40 см, распределение температуры T вдоль продольной оси zплазменного канала было аппроксимировано с помощью полиномов 3-го порядка в виде функции

$$T(z) = 4057, 72 - 57, 11z + 1,55z^2 - 0,02z^3.$$
(16)

Изменение температуры вдоль плазменного канала было использовано при расчетах распределения скоростей вдоль оси плазмохимического реактора. При этом совместно решали уравнения (8), (9) и стационарное уравнение теплопереноса (17):

$$\rho C_n \vec{u} \nabla T = \nabla T (k \nabla T), \qquad (17)$$

где T – температура газового потока, u – вектор скорости газового потока, получаемый из решения уравнения Навье–Стокса; k – коэффициент теплопроводности; C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; ρ – плотность газового потока.

Для уравнения (17) использовали следующие граничные условия:



Рис. 2. Распределение скорости плазменного потока (T=3250 °C) по радиусу реактора для сечений от высоковольтного электрода: а − цилиндрический реактор; б − цилиндрический реактор с диафрагмами; 1 − 2 см, 2 − 6 см

Fig. 2. Plasma flow velocity distribution (T=3250 °C) along the radius of the reactor for the sections of the high-voltage electrode: a = cylindrical reactor; b = cylindrical reactor with diaphragms; 1 = 2 cm, 2 = 6 cm

$$T\Big|_{r=0} = T(z).$$
 (18)

$$T\big|_{r=R} = T_0. \tag{19}$$

На рис. 3 приведены графики распределения по радиусу реактора скоростей высокотемпературного газа в сечении, расположенном посередине между двумя смежными плоскими диафрагмами (6 см от электрода), при экспериментально определяемом значении температуры. Видно, что уменьшение диаметра отверстий диафрагм приводит к значительному контрагированию высокотемпературного потока в осевой области [21]. Также наблюдается значительное увеличение абсолютного значения скорости в приосевой области реактора. Это способствует уменьшению времени плазменной обработки сырья и увеличению скорости закалки газовых продуктов плазмохимической реакции на выходе из реактора из-за сохранения высоких значений температуры и скорости в осевой области реактора.



Рис. 3. Распределение скоростей плазменного потока (T=3720 °C) по радиусу реактора при диаметре отверстий диафрагм: 1 – 0,5 см; 2 – 1 см; 3 – 2 см; 4 – 3 см

Fig. 3. Plasma flow velocity distribution (T=3720 °C) along the radius of the reactor with the diameter of aperture of the diaphragm: 1 – 0.5 cm; 2 – 1 cm; 3 – 2 cm; 4 – 3 cm

Для дальнейших расчетов также считали, что температура газовой смеси на входе в плазмохимический реактор, стенки которого с внешней стороны охлаждаются воздушным потоком температурой 25 °C, равна 4000 °C. Распределение температуры вдоль оси потока задавали уравнением (16).

На распределение скорости высокотемпературного потока влияет способ ввода плазмообразующего газа внутрь плазмохимического реактора. Так, в работе [22] показано, что тангенциальная подача газа приводит к его поджатию в осевой области и стабилизации газового потока. При этом направление движения газа будет зависеть от разности давлений на концах реактора и радиуса закрутки потока. При осевой подаче плазмообразующего газа профиль скорости высокотемпературного потока существенно зависит от диаметра входного отверстия. На рис. 4 представлена зависимость скорости газового потока по радиусу реактора в сечении, расположенном посередине между двумя смежными плоскими диафрагмами, при различном диаметре входного отверстия. При этом диаметр отверстий диафрагм составлял 2 см при длине реактора 30 см. Из графиков видно, что с увеличением радиуса входного отверстия уменьшается степень локализации газового потока. При этом скорость газа в пристеночной области фактически не изменяется. Поэтому контрагирование потока высокотемпературного газа в основном определяется геометрией и местом расположения диафрагм.



Рис. 4. Распределение скорости плазменного потока (с начальной температурой 4000 °C) по радиусу реактора на расстоянии 6 см от входного отверстия диаметром: 1 – 0,5 см; 2 – 1 см; 3 – 3 см; 4 – 4 см; 5 – 5 см

Fig. 4. Plasma flow velocity distribution (initial temperature 4000 °C) along the radius of the reactor at a distance of 6 cm from the inlet, in diameter: 1 – 0.5 cm; 2 – 1 cm; 3 – 3 cm; 4 – 4 cm; 5 – 5 cm

Для оценки времени нагрева стенок реактора между диафрагмами при ряде консервативных допущений совместно решали нестационарное уравнение Навье-Стокса и уравнение теплопроводности [23, 24]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \nabla T = \nabla T (k \nabla T), \qquad (20)$$

где T – температура газового потока; u – вектор скорости газового потока, получаемый из решения нестационарного уравнения Навье–Стокса; k – ко-эффициент теплопроводности; C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; ρ – плотность газового потока; t – время.

При расчете течения высокотемпературной газовой смеси показатель адиабаты газовой смеси вычисляли по формуле [25]

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{v_1 C_{p1} + v_2 C_{p2}}{v_1 C_{v1} + v_2 C_{v2}},$$
(21)

где C_v – удельная изохорная теплоемкость; V_1 , V_2 – объемные доли 1 и 2 газов; C_{p1} , C_{p2} – удельные изобарные теплоемкости 1 и 2 газов; C_{V1} , C_{V2} – удельные изохорные теплоемкости 1 и 2 газов.

Динамическую вязкость плазмообразующего газа для диапазона температур 2000–4000 °С рассчитывали по формуле Сазерленда [26]:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}},$$
(22)

где μ_0 – динамическая вязкость газовой смеси при температуре T_0 , получаемая из решения уравнения (6); C – постоянная Сазерленда.

Графики зависимости от времени температуры газового потока в пристеночном слое между диафрагмами, при диаметре входного отверстия 1 см, приведены на рис. 5. При этом графики соответствуют разным расходам плазмообразующего газа. На рисунке видно, что с увеличением скорости подачи плазмообразующего газа возрастает максимальная температура газового потока в пристеночном слое и увеличивается время установления максимальной температуры. Так, при скорости подачи газа 10 м/с стенки реактора нагреваются до температуры 590 °С за время порядка 2,5 с.



Рис. 5. Изменение температуры в пристеночном слое на расстоянии 6 см от входного отверстия при среднемассовой температуре плазмы менее 4000 °С и скорости потока плазмы: 1 − 10 м/с; 2 − 5 м/с; 3 − 1 м/с; 4 − 0,1 м/с

Fig. 5. Temperature change in the boundary layer at a distance of 6 cm from the inlet at average plasma temperature less than 4000 °C and velocity of the plasma: 1 – 10 m/s; 2 – 5 m/s; 3 – 1 m/s; 4 – 0.1 m/s

Из решения нестационарного уравнения теплопроводности видно, что при среднемассовой температуре плазмы менее чем 4000 °С и скорости подачи плазмообразующего газа не более 10 м/с температура в пристеночной области между диафрагма-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mei D., Zhu X., Wu C. Plasma-photocatalytic conversion of CO₂ at low temperatures: understanding the synergistic effect of plasma-catalysis // Applied Catalysis B: Environmental. – 2016. – V. 182. – P. 525–532.
- Surface modification of polyester fabric with plasma pretreatment and carbon nanotube coating for antistatic property improvement / C.X. Wang, J.C. Lv, Y. Ren, J.Y. Chen, Q.Q. Zhou, Z.Q. Lu, D.W. Gao, L.M. Jin // Applied Surface Science. 2015. V. 359. P. 196–203.
- Semboshi S., Iwase A., Takasugi T. Surface hardening of age-hardenable Cu-Ti alloy by plasma carburization // Surface and Coatings Technology. - 2015. - V. 283. - P. 262-267.
- Schiavon M., Scapinello M., Tosi P. Potential of non-thermal plasmas for helping the biodegradation of volatile organic compounds (VOCs) released by waste management plants // Journal of Cleaner Production. - 2015. - V. 104. - P. 211-219.
- Spin isotope separation under incomplete carbon oxidation in a low-temperature plasma in an external magnetic field / V.F. Myshkin, V.A. Khan, V.G. Plekhanov, D.A. Izoykin,

ми не превышает температуру испарения углерода. Однако это имеет место лишь в том случае, если стенки плазмохимического реактора охлаждаются потоком воздуха при комнатной температуре 25 °С.

Заключение

Для контрагирования высокотемпературного газового потока в центральной области и изолирования его от стенок плазменного реактора, при расходах плазмообразующей смеси 5, 8, 10 л/мин, можно использовать тонкие диафрагмы из жаростойкого материала. При этом в области формирования плазменного потока – в ректоре с диафрагмами – не происходит контакта высокотемпературного газа со стенками. Расчеты показывают, что угол наклона диафрагм также оказывает влияние на распределение векторов скорости в реакторе.

Уменьшение диаметра отверстия диафрагмы способствует контрагированию потока газа, поддержанию заданных значений скорости и температуры плазменного потока. При этом достигаются лучшие показатели плазмохимической технологии. Реализуемая при этом высокая скорость закалки продуктов плазменных процессов позволяет сохранять расчетные значения концентраций продуктов плазмохимических процессов.

Вязкость газовой смеси, влияющая на газодинамические показатели потока, зависит от температуры. Поэтому при разработке конструкции и выборе геометрических размеров плазменного реактора следует учитывать давление и расход плазмообразующего газа, определяющие температуру и скорость высокотемпературного газового потока при заданной мощности высокочастотного генератора.

При использовании диафрагм в плазменном реакторе с малым расходом плазмообразующей смеси в значительной мере сохраняется максимально возможный изотопный эффект, возникающий в плазменных процессах в магнитном поле.

E.V. Bespala // Russian Physics Journal. – 2015. – V. 57. – № 10. – P. 1442–1448.

- Isotope effects of plasma chemical carbon oxidation in a magnetic field / V.F. Myshkin, V.A. Khan, D.A. Izhoykin, I.A. Ushakov // Natural Science. - 2013. - V. 5. - № 1. - P. 57-61.
- Physical and chemical processes research of isotope separation in plasma under magnetic field / V.F. Myshkin, D.A. Izhoykin, I.A. Ushakov, V.F. Shvetsov // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 880. – P. 128–133.
- Electrical aspects of flame quenching / F.J. Weinberg, D. Dunn-Rankin, F.B. Carleton, S. Karnani, C. Markides, M. Zhai // Proceedings of the Combustion Institute. – 2013. – V. 34. – № 2. – P. 3295–3301.
- Emission and absorption spectroscopy study of Ar excited states in 13.56 MHz argon plasma operating at sub-atmospheric to atmospheric pressure / L.Li. Nikiforov, N. Britun, R. Shyders, C. Leys // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2015. – V. 107. – P. 75–85.
- 10. Roles of singlet oxygen and triplet excited state of dissolved organic matter formed by different organic matters in bacteriophage

MS2 inactivation / S.L. Rosado-Lausell, H. Wang, L. Gutierrez, O.C. Romero-Maraccini, Xi-Zhi Niu, K.Y. Gin, J.P. Croue, T.H. Nguyen // Water Research. - 2013. - V. 47. - № 14. - P. 4869-4879.

- Electronic structure of hydrogenated carbon nanotubes studied by core level spectroscopy / M. Brzhezinskaya, V. Shmatko, G. Yalovega, A. Krestinin, I. Bashkin, E. Bogoslavskaja // Related Phenomena. – 2014. – V. 196. – P. 99–103.
- Yencha A.J., Ellis K., King G.C. High-resolution threshold photoelectron and photoion spectroscopy of molecular nitrogen in the 15,0-52,7 eV photon energy range // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2014. V. 195. P. 160-173.
- Ag K-shell ionization by electron impact: new cross-section measurements between 50 and 100 keV and review of previous experimental data / V.R. Vanin, M.V. Manso Guevara, N.L. Maidana, M.N. Martins, J.M. Fernandez-Varea // Radiation Physics and Chemistry. 2016. V. 119. P. 14-23.
- Yan B., Caflisch R.E., Barekat F. Analysis and simulation for a model of electron impact excitation/deexcitation and ionization/recombination // Journal of Computational Physics. – 2015. – V. 299. – P. 747–786.
- Guerra M., Parente F., Santos J.P. Electron impact ionization cross sections of several ionization stages of Kr, Ar and Fe // International Journal of Mass Spectrometry. - 2013. - V. 348. -P. 1-8.
- Глумов Д.Н., Стрекалов А.В. Способ расчета динамической вязкости газов в широком диапазоне давлений // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 1. – С. 194–209. URL: http://ogbus.ru/authors/Glumov/Glumov_1.pdf (дата обращения: 20.11.2015).
- Carbon and oxygen atoms distribution along low-temperature plasma torch in the magnetic field / V.F. Myshkin, D.A. Izhoykin, E.V. Bespala, I.A. Ushakov // Adv. Mater. Res. 2015. № 1084. P. 93-96.
- Ладыженская О.А. Исследование уравнения Навье-Стокса в случае стационарного движения несжимаемой жидкости //

Успехи математических наук. - 1959. - Т. XIV. - Вып. 3. -С. 75-97.

- Wei D. Regularity criterion to the axially symmetric Navier–Stokes equations // Journal of Mathematical Analysis and Applications. - 2016. - V. 435. - P. 402-413.
- Dahai L., Chao Y., Xiaoyong W. Computational study of supersonic turbulent-separated flows using partially averaged Navierstokes method // Acta Astronautica. - 2015. - V. 107. -P. 234-246.
- Koike K., Ono N. Light intensity analysis of plasma jet constriction with applied magnetic field // Vacuum. 2008. V. 83. N^b 1. P. 25-28.
- 22. Беспала Е.В., Давыдов Е.Ю. Моделирование газовых потоков при плазменной сепарации изотопов углерода в магнитном поле // Сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 34–38.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособ. для вузов: в 10 т. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Физматлит, 2001. – 736 с.
- An inverse time-dependent source problem for the heat equation with a non-classical boundary condition / A. Hazanee, D. Lesnic, M.I. Ismailov, N.B. Kerimov // Applied Mathematical Modeling. - 2015. - V. 39. - № 20. - P. 6258-6272.
- Development and validation of a coupled Navier-Stokes / K. Farber, P. Farber, J. Grabel, S. Krick, J. Reitz, P. Ueberholz // Applied Mathematics and Computation. 2016. V. 272. № 1. P. 648-656.
- Sebastian G., Shine S.R. Natural convection from horizontal heated cylinder with and without horizontal confinement // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 2015. - V. 82. -P. 325-334.

Поступила 30.11.2015 г.

UDC: 533.17; 533.9.072; 533.92

FORMATION OF THE GAS FLOW IN THE PLASMA-CHEMICAL REACTOR

Vyacheslav F. Myshkin,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: gos100@tpu.ru

Valeriy A. Khan,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 1, Academician Zuev Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: nt.centre@mail.ru

Evgeniy V. Bespala,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: bespala90@tpu.ru

Milan Tichy,

Charles University in Prague, 2, V Holesovickach, Prague 8, 18000, Czech Republic. E-mail: tichy@nbox.troja.mff.cuni.cz

Dmitriy A. Izhoykin,

Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Avenue, Tomsk, 634003, Russia. E-mail: info@tsuab.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to optimize the geometry of the plasma- chemical reactor to increase the isotope effects.

The main aim of the study is the search for the optimal geometry of plasma-chemical reactor, which provides high-localization of the plasma flow in the axial region to reduce the back diffusion effect, leading to equalization of isotope concentration.

The methods used in the study: calculation and optimization of the gas flow within the plasma-chemical reactor by the unsteady Navier–Stokes equations and Fourier by the method of finite-difference components using COMSOL.

The results. The authors explained the mechanism of isotopic concentration change in the products of plasma-chemical reactions due to the spin separation of carbon isotopes in a nonequilibrium low-temperature plasma in a magnetic field. An analysis of the processes occurring inside the plasma-chemical reactor of constant width was carried out. It is expected that the reduction of isotope effects is associated with the oxidation of the dispersed phase, which is located on the reactor walls. A method and apparatus for limiting the contact area of the high-temperature plasma flow with the walls of the chamber was proposed. Calculation of gas flows inside the plasma-chemical reactor out. It is shown that for the contraction of high temperature gas flow in the central region and isolating it from the walls of the plasma reactor can be used thin diaphragm of temperature-resistant material. It was also shown that the wall temperature of the plasma-chemical reactor in the region between the diaphragms does not exceed the evaporation temperature of the dispersed phase in some plasma gas flow. The highest possible isotope effect which occurs in the processes of plasma in a magnetic field is largely retained.

Key words:

Plasma flow, reactor, carbon isotope, oxidation, soot.

REFERENCES

- Mei D., Zhu X., Wu C. Plasma-photocatalytic conversion of CO₂ at low temperatures: understanding the synergistic effect of plasma-catalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, vol. 182, pp. 525–532.
- Wang C.X, Lv J.C., Ren Y., Chen J.Y., Zhou Q.Q., Lu Z.Q., Gao D.W., Jin L.M. Surface modification of polyester fabric with plasma pretreatment and carbon nanotube coating for antistatic property improvement. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 359, pp. 196–203.
- Semboshi S., Iwase A., Takasugi T. Surface hardening of age-hardenable Cu-Ti alloy by plasma carburization. Surface and Coatings Technology, 2015, vol. 283, pp. 262-267.
- Schiavon M., Scapinello M., Tosi P. Potential of non-thermal plasmas for helping the biodegradation of volatile organic compounds (VOCs) released by waste management plants. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 104, pp. 211-219.
- Myshkin V.F., Khan V.A., Plekhanov V.G., Izhoykin D.A., Bespala E.V. Spin isotope separation under incomplete carbon oxidation in a low-temperature plasma in an external magnetic field. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1442-1448.
- Myshkin V.F., Khan V.A., Izhoykin D.A., Ushakov I.A. Isotope effects of plasma chemical carbon oxidation in a magnetic field. *Natural Science*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 57-61.
- Myshkin V.F., Izhoykin D.A., Ushakov I.A., Shvetsov V.F. Physical and chemical processes research of isotope separation in plasma under magnetic field. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 128–133.
- Weinberg F.J., Dunn-Rankin D., Carleton F.B., Karnani S., Markides C., Zhai M. Electrical aspects of flame quenching. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 3295–3301.
- 9. Nikiforov L.Li., Britun N., Shyders R., Leys C. Emission and absorption spectroscopy study of Ar excited states in 13.56 MHz ar-

gon plasma operating at sub-atmospheric to atmospheric pressure. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2015, vol. 107, pp. 75–85.

- Rosado-Lausell S.L., Wang H., Gutierrez L., Romero-Maraccini O.C., Niu Xi-Zhi, Gin K.Y., Croue J.P. Roles of singlet oxygen and triplet excited state of dissolved organic matter formed by different organic matters in bacteriophage MS2 inactivation. *Water Research*, 2013, vol. 47, no. 14, pp. 4869–4879.
- Brzhezinskaya M., Shmatko V., Yalovega G., Yalovega G., Krestinin A., Bashkin I., Bogoslavskaja E. Electronic structure of hydrogenated carbon nanotubes studied by core level spectroscopy. *Related Phenomena*, 2014, vol. 196, pp. 99–103.
- Yencha A.J., Ellis K., King G.C. High-resolution threshold photoelectron and photoion spectroscopy of molecular nitrogen in the 15,0-52,7 eV photon energy range. *Journal of Electron Spectro*scopy and Related Phenomena, 2014, vol. 195, pp. 160–173.
- Vanin V.R., Manso G., Maidana N.L., Martins M.N., Fernandez-Varea J.M. Ag K-shell ionization by electron impact: new crosssection measurements between 50 and 100 keV and review of previous experimental data. *Radiation Physics and Chemistry*, 2016, vol. 119, pp. 14–23.
- Yan B., Caflisch R.E., Barekat F. Analysis and simulation for a model of electron impact excitation/deexcitation and ionization/recombination. *Journal of Computational Physics*, 2015, vol. 299, pp. 747-786.
- Guerra M., Parente F., Santos J.P. Electron impact ionization cross sections of several ionization stages of Kr, Ar and Fe. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, vol. 348, pp. 1–8.
- 16. Glumov D.N., Strekalov A.V. Sposob rascheta dinamicheskoy vyazkosti gazov v shirokom diapazone davleniy [The method for calculating the dynamic viscosity of the gas over a wide range of pressures]. *Neftegazovoe delo*, 2011, no. 1, pp. 194–209. Available at: http://ogbus.ru/authors/Glumov/Glumov_1.pdf (accessed 20 November 2015).
- Myshkin V.F., Izhoykin D.A., Bespala E.V., Ushakov I.A. Carbon and oxygen atoms distribution along low-temperature plasma torch in the magnetic field. *Advanced Materials Research*, 2015, no. 1084, pp. 93–96.
- Ladyzhenskaya O.A. Issledovanie uravneniya Nave-Stoksa v sluchae statsionarnogo dvizheniya neszhimaemoy zhidkosti [In-

vestigation of the Navier-Stokes equation for stationary motion of an incompressible fluid]. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1959, vol. 14, iss. 3, pp. 75–97.

- Wei D. Regularity criterion to the axially symmetric Navier-Stokes equations. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2016, vol. 435, pp. 402–413.
- Dahai L., Chao Y., Xiaoyong W. Computational study of supersonic turbulent-separated flows using partially averaged Navierstokes method. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 107, pp. 234–246.
- Koike K., Ono N. Light intensity analysis of plasma jet constriction with applied magnetic field. *Vacuum*, 2008, vol. 83, no. 1, pp. 25–28.
- 22. Bespala E.V., Davydov E.Yu. Modelirovanie gazovykh potokov pri plazmennoy separatsii izotopov ugleroda v magnitnom pole [Simulation of gas flow in the plasma separation of carbon isotopes in the magnetic field]. Sbornik nauchnykh trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Vysokie tekhologii v sovremennoy nauke i tekhnike» [Proc. 4th Int. Scient. and Tech. Conf. of young scientists and students. High technology of modern science and technology]. Tomsk, 2015. pp. 34–38.
- Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika* [Theoretical physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 736 p.
- Hazanee A., Lesnic D., Ismailov M.I., Kerimov N.B. An inverse time-dependent source problem for the heat equation with a nonclassical boundary. *Applied Mathematical Modeling*, 2015, vol. 39, no. 20, pp. 6258-6272.
- Farber K., Farber P., Grabel J., Krick S., Reitz J., Ueberholz P. Development and validation of a coupled Navier-Stokes. *Applied Mathematics and Computation*, 2016, vol. 272, no. 1, pp. 648–656.
- Sebastian G., Shine S.R. Natural convection from horizontal heated cylinder with and without horizontal confinement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 82, pp. 325-334.

Received: 30 November 2015.