

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Е.В. Беспала, аспирант,*

*Е.Ю. Давыдов, студент, гр. 0АМ44*

*Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,*

*тел. (3822)-701-604*

*E-mail: bespala\_evgeny@mail.ru*

**Введение.** Интерес к низкотемпературной плазме как среде для разделения изотопов различных элементов определяется ее характерной особенностью – неравновесностью в распределении по энергетическим состояниям. В низкотемпературной плазме степень ионизации не превышает 1–2%, а многие твердые тела находятся в радикальной форме. Поэтому в плазменных средах значительное влияние на физико-химические процессы с участием изотопов оказывают магнитные явления, управляющие динамикой спинов неспаренных электронов радикалов. При этом возможна сепарация изотопов между продуктами и исходными реагентами химической реакции.

При экспериментальных исследованиях использовался стенд, в котором для формирования плазменного потока использовался ВЧФ-разряд, возбуждаемый в цилиндрическом плазмохимическом реакторе при помощи ВЧ генератора (27 МГц, 4 кВт) с графитового электрода. Пары углерода вводились в плазменный поток путем испарения электрода. Магнитное поле создавалось двумя постоянными магнитами 1.2 Тл и 0.2 Тл. Магниты устанавливались перпендикулярно газовому потоку разноименными полюсами друг к другу.

Экспериментальные данные о содержании  $^{13}\text{C}$  в зависимости от расстояния от конца графитового электрода до центра магнитного поля, показывают следующее. При использовании магнитов с индуктивностью 0.2 Тл содержание  $^{13}\text{C}$  в газовой фазе продуктов реакции может достигать 1.41%. Использование магнитов с индуктивностью 1.2 Тл содержание  $^{13}\text{C}$  в газовых продуктах реакции достигает 1.78%. Однократный коэффициент разделения в этом случае равен 1.63 [1]. Без магнитного поля содержание  $^{13}\text{C}$  не отличается от природного. Результаты исследований магнитных изотопных эффектов в газовой фазе, кроме работы [1], практически не известны.

Получаемые величины коэффициентов разделения весьма малы для высоких затрат энергии плазмохимической технологии. На изотопный эффект при спиновой сепарации изотопов влияют многие факторы, например, частота столкновений, состав плазмообразующей смеси, электрофизические характеристики плазмы, термодинамика и теплообмен. Теплообмен между разными областями плазмы зависит, в том числе, от режима течения газового потока.

Для увеличения коэффициента разделения изотопов необходимо оптимизировать параметры, оказывающие влияние на сепарацию изотопов. Недостаточная эффективность сепарации изотопов на выходе из реактора может быть связана с длительным контактом продуктов и исходных веществ плазменных процессов. Поэтому исследования, связанные с изучением влияния газовых потоков на процесс спиновой сепарации изотопов в магнитном поле в низкотемпературной плазме, являются актуальными.

Задача исследований – анализ структуры газового потока и её влияния на коэффициент разделения, при неполном плазменном окислении изотопов углерода в магнитном поле.

**Моделирование газовых потоков в плазмохимическом реакторе.** Путем расчета при помощи программы ТЕРРА определен равновесный состав частиц в системе  $Ar+O_2+C$ . Анализ возможных реакций показывает, что некоторые из них могут формировать изотопный состав углерода в продуктах плазменных процессов [2]. Результаты термодинамического моделирования показывают, что для осуществления селективного по изотопам окисления углерода приемлема плазменная система, включающая плазмообразующий газ ( $Ar/He$ ), а также  $C:O_2 < 1:1$ . Значительное уменьшение количества кислорода относительно углерода приводит к снижению эффективности сепарации изотопов из-за уменьшения количества образующейся газовой фазы.

Моделирование газового потока проводили для плазмохимического реактора в виде кварцевой трубы внутренним диаметром 42 мм и длиной 1000 мм. Считали, что:

- Плазмообразующий газ ( $Ar/He$ ) подается при температуре 300 К через два патрубка, установленных тангенциально навстречу друг другу.
- Расстояние между осями патрубков и плазмохимического реактора составляет 15 мм.
- Диаметр патрубков равен 6 мм.
- Объемный расход плазмообразующего газа: 5,0; 8,33; 15,0; 30,0 л/мин.

Поскольку число Рейнольдса установившегося потока не превышало 1300, решали уравнение Навье-Стокса для ламинарного течения газа [3]:

$$\begin{cases} \rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = \nabla[-pI + \vec{\tau}] + \vec{F} \\ \nabla(\rho \cdot \vec{u}) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газовой смеси,  $p$  – давление,  $\vec{I}$  – единичный тензор,  $\vec{u}$  – вектор скорости,  $\vec{F}$  – векторное поле массовых сил,  $\nabla$  – оператор набла,  $\vec{\tau}$  – тензор вязких напряжений:

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

где  $\mu$  – динамическая вязкость газа,  $T$  – символ транспонирования.

Динамическую вязкость для смеси плазмообразующих газов определяли по соотношению Чемпена-Энскога [4]:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \left[ x_i \mu_i / \sum_j x_j \Phi_{ij} \right], \quad (3)$$

где  $x$  – молярная доля газа,  $\Phi_{ij}$  – коэффициент, определяемый по методу Херринга-Ципперера:

$$\Phi_{ij} = \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0.5}. \quad (4)$$

Для смеси плазмообразующих газов ( $Ar : He = 1 : 1$ ), используемой при моделировании, динамическая вязкость газов составляла 21,2539 мкПа·с.

Граничные условия для используемой геометрии плазмохимического реактора:

1. Высокотемпературный газовый поток возле стенки плазмохимического реактора неподвижен, т.е. имеют место эффекты вязкости:

$$\vec{u} = 0;$$

(5)

2. давление на выходной плоскости плазмохимического реактор постоянно:

$$\begin{cases} p_2 = p_0 = const \\ [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla \vec{u})\vec{I})\vec{n}] = 0 \end{cases} \quad (6)$$

где  $\vec{n}$  – вектор нормали.

При моделировании распределения вектора скорости газового предполагалось, что газовая температура плазмообразующего газа в канале разряда не превышает 3500 К, а его длина составляет не более 550 мм [5].

На рисунке 1 представлены графики распределения по радиусу реактора осевой проекции скорости газа в сечениях, расположенных на разных расстояниях от электрода. Сечения выбраны по всей длине плазмохимического реактора. На рисунке 2 приведены графики распределения осевой проекции скорости газового потока вдоль плазмохимического реактора для разных расстояний от его оси.

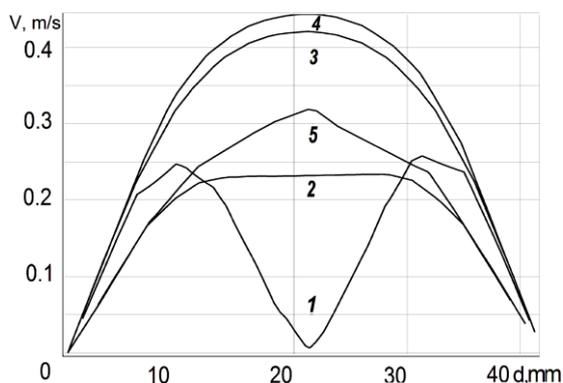


Рис. 1. Радиальное распределение осевой проекции скорости газового потока по сечениям вдоль потока: 1 – 0 мм; 2 – 55 мм; 3 – 215 мм; 4 – 375 мм; 5 – 540 мм.

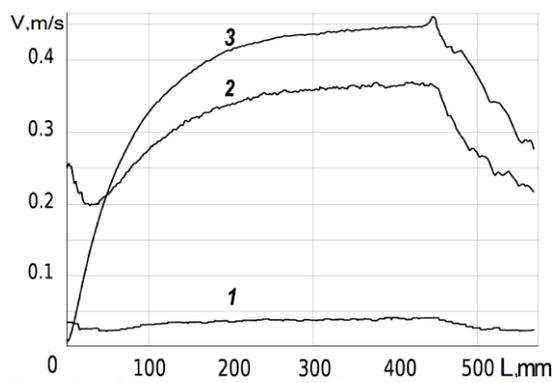


Рис. 2. Зависимость осевой проекции скорости потока вдоль реактора от расстояния до его центра: 1 – 20 мм; 2 – 10 мм; 3 – 0 мм.

Графики на рис. 1 и 2 показывают, что скорость газа в центральной области плазмохимического реактора наибольшая и уменьшается к периферии (пристеночная область). По оси реактора наблюдается резкое возрастание скорости потока в области высоковольтного электрода. Наличие минимума в графике распределения скорости газа вдоль реактора на расстоянии 10 мм от оси связано с переходом энергии тангенциального движения в поток в осевом направлении. Вдоль плазменного канала осевая скорость потока постепенно возрастает по всем сечениям.

На рисунке 3 приведены графики зависимости осевой проекции скорости газового потока по центру реактора от расхода плазмообразующего газа. Из-за быстрого охлаждения газа за пределами реактора химические реакции практически

прекращаются. Поэтому скорость газового потока во многом определяет время протекания реакции и время контакта исходных веществ и продуктов. Эти величины могут оказывать значительное влияние на процесс химической сепарации изотопов в магнитном поле.

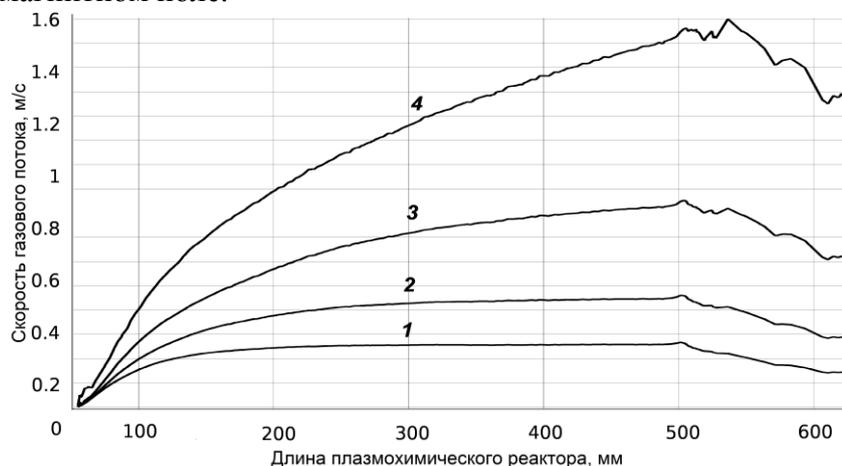


Рис. 3. Зависимость осевой проекции скорости газового потока от расхода плазмообразующего газа. 1 – 5.0 л/мин; 2 – 8.3 л/мин; 3 – 15.0 л/мин; 4 – 30.0 л/мин.

Из результатов расчета видно, что скорость газа вдоль оси плазмохимического реактора возрастает с ростом расхода плазмообразующего газа. С ростом скорости плазмообразующего газа уменьшается время, необходимое для выдувания продуктов плазмохимической реакции из реактора. Следует учитывать также, что при увеличении скорости газа возможно уменьшение коэффициента разделения изотопов из-за более высокой скорости окисления обедненной по изотопу сажи, образующейся на стенках реактора.

Из распределения скоростей газовых потоков на рис. 1 и 2 видно, что графики имеют излом на расстоянии 450 мм от электрода и наблюдается начало снижения скорости. Причина излома графиков скоростей, скорее всего, обрыв канала высокочастотного разрядного на указанном расстоянии. Плазменный поток начинает остывать из-за отсутствия выделения тепла, что аналогично закалке плазменного потока. Аналогичный характер уменьшения температуры плазмы экспериментально показан в работе [5]. Скорость закалки продуктов плазменных процессов пропорциональна расходу плазмообразующего газа.

Приведенные в работе [1] коэффициенты разделения изотопов получены при расходе плазмообразующего газа 8.3 л/мин. При этом обеспечивается до 4 раз меньшая скорость закалки, чем при расходе 30.0 л/мин. Следует помнить, что при высокой скорости расхода плазмообразующего газа возможно гашение плазменного потока. Поэтому результаты по сепарации изотопов, приведенные в работе [1], можно улучшить путем оптимизации газодинамического режима в плазмохимическом реакторе.

**Заключение.** Путем моделирования газовых потоков при плазменном окислении изотопов углерода во внешнем магнитном поле показано, что тангенциальная подача газа в плазмохимический реактор способствует его поджатию в осевой области и стабилизации газового потока. При этом скорость газа увеличивается вдоль канала разряда. В плоскости обрыва канала разряда начинается охлаждение плазменного потока. При увеличении расхода плазмообразующего газа

возрастает скорость закалки продуктов плазменных процессов для цилиндрического реактора постоянного размера.

**Список литературы:**

1. Myshkin V.F., Khan V.A., Plekhanov V.G., Izhoikin D.A., Bespala E.V., Spin isotope separation under incomplete carbon oxidation in a low-temperature plasma in an external magnetic field // Russian Phys. J., – 2015. – 57/10. – PP.1442-1448.
2. Myshkin V.F., Izhoikin D.A., Ushakov I.A., Shvetsov V.F., Physical and Chemical Processes Research of Isotope Separation in Plasma under Magnetic Field // Adv. Mater. Res., – 2014. – №880. – PP.128-133.
3. Ладыженская О.А., Исследование уравнения Навье-Стокса в случае стационарного движения несжимаемой жидкости // Успехи математических наук. – 1959. – Т. XIV. – Вып. 3. – С. 75-97.
4. Глумов Д.Н., Стрекалов А.М., Способ расчета динамической вязкости газов в широком диапазоне давлений // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – №1. – С. 194-209.
5. Myshkin V.F., Izhoikin D.A., Bespala E.V., Ushakov I.A., Carbon and Oxygen Atoms Distribution along Low-temperature Plasma Torch in the Magnetic Field // Adv. Mater. Res. – 2015. – №1084. – PP. 93-96.

**ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И ПОЛИЛАКТИДА В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

*О.А. Лапуть, студент гр. 4Б22*

*И.А. Курзина, д.ф.-м.н., доцент*

*Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,*

*тел. (952)-899-25-96*

*E-mail: smile\_olesia@mail.ru*

Электронно-лучевая обработка является одним из эффективных методов модификации приповерхностных свойств материалов. В работе исследовано влияние облучения электронным пучком на структуру полимерных материалов из поливинилового спирта и полилактида. Обработку электронным пучком проводили при ускоряющем напряжении 8 кВ, давлении  $3 \cdot 10^{-2}$  Торр, токе разряда от 50 до 60 А, времени обработки от 150 до 300 мкс и количестве импульсов от 1 до 10. Исследованы элементный состав и структурное состояние поверхности полимерных материалов, подвергнутых облучению. Установлено протекание химических процессов в условиях электронного облучения и изменение физико-химических свойств.

В настоящее время все большее внимание уделяется полимерным материалам, что обусловлено их широким применением в мировом промышленном производстве от медицины до аэрокосмической отрасли. Наиболее перспективными являются полимерные материалы биомедицинского назначения. Обработка различных материалов ионными пучками, а также потоками плазмы и электронов приводит к