

Данные сигналы позволяют вычислить энергию регистрируемого нейтрона по формулам (1)-(2).

Исходя из требований к максимальной скорости счета 10^5 нейтр/(с·см²), определяемой исследуемой динамикой протекающих в плазме процессов, необходимо использовать цифровые счетчики со скоростью счета не ниже 100кГц и АЦП с периодом оцифровки меньше 10мкс, входом разрешения преобразования (GATE) и входом внешней синхронизации. Для синхронизации работы подсистемы нейтронной диагностики с другими подсистемами автоматизированной системы управления термоядерной установки используется модуль локальной синхронизации (TMG), принимающий сигналы от центрального блока синхронизации и передающий синхроимпульсы в модули УСО.

Проведен анализ возможных принципов детектирования и методов измерения нейтронов на термоядерных установках типа токамак. С учетом имеющихся требований и ограничений определен тип детектора и методика проведения измерений. Разработана структура подсистемы сбора данных с нейтронной диагностики токамака. Проработаны вопросы интеграции подсистемы сбора данных в информационно-измерительную систему термоядерной установки и синхронизации ее работы с другими подсистемами.

Литература

1. Прайс В. Регистрация ядерного излучения. – М.: Энергоатомиздат, 1960.
2. Цитович А. П. Ядерная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

УДК 669.87/88.002.2-154

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЛЛИЯ С ЛИТИЕМ

И.А. Тихомиров, А.А. Орлов, Д.Г. Видяев

Томский политехнический университет

Разработана оригинальная физико-математическая модель процесса непрерывного капельного получения галламы лития. Рассчитаны основные параметры установки для получения галламы лития заданной концентрации $0,8 \div 1,0$ моль/л. Проведено сравнение результатов расчета с данными экспериментальных исследований.

Современные технологии требуют использования особо чистых материалов. Одной из наиболее сложных задач является получение чистых щелочных металлов (калия, натрия и др.). Для их разделения и очистки щелочных металлов нами разработан экологически безопасный и высокоэффективный галламно-обменный метод [1], в котором используется интерметаллическое соединение галлия с литием – галлама лития с концентрацией лития в галлии $0,8 \div 1,0$ моль/л. Данное соединение целесообразно получать путем прямого растворения лития в галлии (в расплавах металлов).

Нами разработана конструкция установки по непрерывному получению галламы лития капельным способом [1]. Она представляет собой вертикальный цилиндрический реактор, в верхней части которого с помощью перфорированной пластины формируется капельный режим истечения жидкого расплавленного галлия. Капли галлия под действием силы тяжести движутся сначала в атмосфере инертного газа (аргона), а затем в слое расплавленного лития, образуя галламу лития нужной концентрации.

Экспериментальная отработка подобных реакторов сопряжена с большими финансовыми и временными затратами. Поэтому, вполне оправдано применение математического моделирования для предварительной оценки параметров проектируемой установки.

В частности, был рассмотрен массообмен сферической капли галлия при её движении в жидком литии в предположении, что реализуется гидродинамический режим течения типа сферического вихря Хилла [2, 3]. Определяющими критериями задачи о конвективно-диффузионном процессе массообмена между каплей и окружающей её жидкой средой [2] являются: число Рейнольдса (Re); диффузионное число Пекле (Pe); отношение коэффициента диффузии лития в галлий к коэффициенту диффузии галлия в литий (D_2/D_1) и в случае нестационарной задачи число Фруда (Fr).

В нашем случае, как показали расчеты $Fr > 100$, следовательно, режим течения можно рассматривать как квазистационарный. При выполнении условия ($Re_2 \gg 1$) течение вне капли можно рассматривать как невязкое потенциальное. В этом случае скорость может быть найдена как градиент некоторой скалярной функции φ , являющейся решением уравнения Лапласа:

$$\vec{v} = \vec{\nabla} \varphi, \quad \Delta \varphi = 0.$$

Вид линий тока такого течения и профиль скорости для сечения $\theta = \pi/2$ приведены на рис. 1.

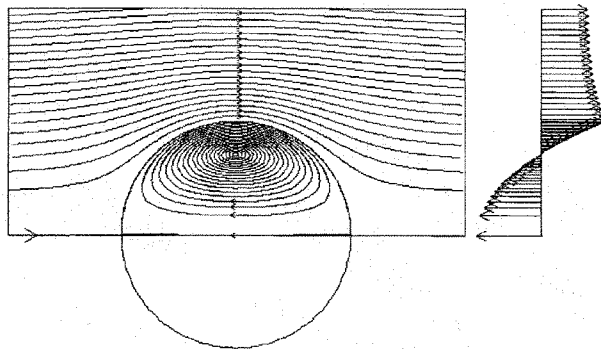


Рис. 1. Картина течения в капле для случая сферического вихря Хилла и профиль скоростей в центральном сечении

Основное сопротивление массообмену в данном случае сосредоточено в диффузионных пограничных слоях (с внутренней и внешней сторон поверхности капли галлия), в отличие от обычно рассматриваемого в задачах химической технологии случая, когда основное сопротивление массообмену сосредоточено во внешнем диффузионном пограничном слое. Это обстоятельство является особенностью рассматриваемой задачи и типично для систем металл – металл (так как отношение коэффициентов диффузии $D_2/D_1 \sim 1$) [2].

В основу модели положено совместное решение уравнения движения капли:

$$\frac{mdU}{dt} = mg - F - \Omega \rho_2 g,$$

уравнения диффузии вещества:

$$\frac{\partial c^{(i)}}{\partial t} + v_r^i \frac{\partial c^{(i)}}{\partial r} + \frac{v_\theta^i}{r} \frac{\partial c^{(i)}}{\partial \theta} =$$

$$= D_i \left[\frac{\partial^2 c^{(i)}}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c^{(i)}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 c^{(i)}}{\partial \theta^2} + \frac{v_\theta^i \cos \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial c^{(i)}}{\partial \theta} \right],$$

и уравнения движения несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial}{\partial t} (E^2 \phi) - \nu E^4 \phi + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \frac{\partial}{\partial \delta} - \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \frac{\partial}{\partial z} + \frac{2\delta}{1-\delta^2} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \delta} \right) E^2 \phi = 0.$$

Для этой системы уравнений нами сформулированы граничные условия: условие постоянства концентрации лития на бесконечности:

$$c_\infty = 1;$$

условия равенства концентрации и диффузионных потоков на границе капли:

$$c_{r_{1-0}} = c_{r_{1+0}}, \quad D_2 \left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r_{1-0}} = D_1 \left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r_{1+0}};$$

условие симметрии:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial \theta} \right|_{\theta=0, \pi} = 0;$$

условие ограниченности концентрации в центре капли:

$$c|_{r=0} < \infty;$$

условие однородности потока на бесконечности:

$$\phi^{(2)} \rightarrow \frac{1}{2} U r^2 \sin^2 \theta, \quad r \rightarrow \infty;$$

условие симметрии:

$$\phi^{(i)} = 0, \quad \theta = 0, \pi;$$

условие отсутствия нормальной скорости на межфазной границе:

$$\phi^{(1)} = \phi^{(2)} = 0, \quad r = r_1;$$

условие непрерывности тангенциальной составляющей на межфазной границе:

$$\left. \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial r} \right|_{r=r_1} = \left. \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial r} \right|_{r=r_1}.$$

Начальные условия:

$$U(t_0) = U_0, \quad c_i = c_{i0}.$$

Исходная концентрация лития в галлии полагалась равной нулю. Начальный размер капель определялся из решения задачи о формировании сферической капли при истечении жидкости из круглого отверстия [4]. Параметры капли галлия до входа ее в жидкий литий вычислялись при решении задачи о падении капли. Эффекты взаимодействия капли с поверхностью раздела фаз не учитывались. Эффективные значения коэффициентов диффузии вычислялись по формуле Стокса.

Уравнение движения капли представлено в виде уравнения

$$\frac{dU}{dt} = -aU + b,$$

$$a = \frac{9}{2} \frac{\mu_2}{r_1^2 \rho_1} \xi \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^2 \left(1 - \frac{0,64}{\sqrt{Re_2}} \right), \quad b = g \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \right),$$

и после его интегрирования получено решение на каждом временном слое

$$U(t) = \frac{b + (aU_0 - b) \exp(-a\Delta t)}{a},$$

$$\Delta S(t) = \frac{b}{a} \Delta t + \frac{b - U_0 a}{a^2} [1 - \exp(-a\Delta t)].$$

Далее, рассматривая гидродинамический аспект решения задачи, использовали решение сферического вихря Хилла, для которого функция тока имеет вид

$$\phi^{(1)} = Ar^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_1^2} \right) \sin^2 \theta .$$

И, наконец, была рассмотрена задача о массообмене сферической капли галлия при ее движении в жидком литии. Интегрально массообмен принято характеризовать через безразмерный критерий Шервуда. Для вычисления диффузионного потока использована зависимость, полученная Хаппелем и Бреннером [5] с учетом нестационарности задачи:

$$\begin{aligned} Sh &= Sh_s H, \\ H &= \begin{cases} 1, & \tau > 2.5, \\ \left(1 + \frac{5\tau^2}{72} - \frac{7\tau^4}{1920} \right) / \sqrt{\frac{2\tau}{3}}, & \tau \leq 2.5, \end{cases} \\ \tau &= U(t)\Delta t / r_1, \end{aligned}$$

Проинтегрировав уравнение диффузии вещества по поверхности капли, с учетом выражения для локального диффузионного потока

$$j = \left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r=r_1},$$

была получена зависимость для средней концентрации лития в капле галламы:

$$\bar{c}(t) = \bar{c}_o + \int_{t_0}^t I dt = \bar{c}_o + 4\pi \int_{t_0}^t Sh(t) dt .$$

Описанный алгоритм был реализован в виде программы на ПЭВМ, которая позволяет автоматически определять, какой гидродинамический режим реализуется для исходных данных (течение Адамара – Рыбчинского либо течение типа вихря Хилла).

Расчет параметров установки для получения галламы лития заданной концентрации проводился для различных значений высоты падения капли галлия в атмосфере аргона 0,1 ÷ 1,0 м с шагом 0,1 м, диаметра отверстий перфорированной пластины (0,5·10⁻³; 1,0·10⁻³; 2,0·10⁻³; 3,0·10⁻³; 4,0·10⁻³ м) в рабочем интервале температур 250 ÷ 280°С. Полученные данные были использованы при проектировании лабораторной установки для непрерывного получения галламы лития.

Проведенные испытания данной установки показали хорошую сходимость результатов расчета с данными экспериментальных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ – грант ТОО-7.4-897.

Литература

1. *Разработки по получению галламы лития прямым растворением лития в галлии*/ Орлов А.А., Видяев Д.Г., Иванов Д.А.; Томск. политехн. ун-т. Томск, 1997. 34 с.: ил. Библиогр.: 24 назв. Рус. Деп. в ВИНТИ 17.07.97, № 2451-В97.
2. *Протодьяконов И.О., Ульянов С.В.* Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость-жидкость. – Л.: Наука, 1986. 272 с.
3. *Гупало Ю.П., Полянин А.Д., Рязанцев Ю.С.* Массотеплообмен реагирующих частиц с потоком. – М.: Наука, 1985. 336 с.
4. *Кутателадзе С.С.* Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. 296 с.
5. *Хапель Дж., Бреннер Г.* Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. – М.: Мир, 1976. 630 с.

MATHEMATICAL MODELLING OF MOLECULAR PROCESS OF INTERPLAY OF GALLIUM WITH LITHIUM

I.A. Tikhomirov, A.A. Orlov, D.G. Vidyayev

Tomsk polytechnic university

The original physico-mathematical model of process of continuous dropwise obtaining of lithium gallium was designed. The main specifications of the installation for obtaining of lithium gallium of given concentration $0,8 \div 1,0$ mol/l are counted. Comparison outcomes of calculation with the data of experimental researches was conducted

УДК 669.871.5

ХИМОБМЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

И.А. Тихомиров, А.А. Орлов, Д.Г. Видяев

Томский политехнический университет

Определены значения коэффициента разделения (α) пар щелочных металлов Li-Na, Li-K, K-Na в галламно-обменных системах. Для систем LiGa-NaOH, LiGa-KOH изучена зависимость α от температуры и концентрации обменивающихся фаз. Определены кинетические параметры элементного обмена лития, натрия и калия в системах LiGa-NaOH, LiGa-KOH, KGa-NaOH. Проведено сравнение с характеристиками амальгамно-обменных систем.

В настоящее время промышленное разделение щелочных элементов осуществляют амальгамно-обменным методом [1, 2]. Основным его недостатком является использование в больших количествах высокотоксичной ртути, что приводит к загрязнению окружающей среды, усложнению средств и техники безопасности данного производства. В связи с этим приобрели актуальность работы направленные на создание эффективных и экологически безопасных методов разделения щелочных металлов.

Нами разработан экологически безопасный галламно-обменный способ разделения щелочных металлов [3]. В нем вместо амальгамы используется соединение галлия со щелочным металлом - галлама.

Данная работа была посвящена изучению обмена в системах LiGa – NaOH, LiGa – KOH, KGa – NaOH. Задачей проводимых исследований являлось определение значений коэффициента разделения указанных пар щелочных металлов и кинетических параметров элементного обмена.

Отдельными опытами было показано, что равновесное состояние в исследуемых системах наступает примерно через 15 минут.

Коэффициент разделения α вычислялся для всех систем по результатам опытов, проведенных при различных начальных условиях. Зависимость значения α от концентрации галламы, водного раствора гидроксида и температуры в системах LiGa – NaOH и LiGa – KOH представлена на рис. 1-3. Установлено, что с ростом температуры значение коэффициента разделения в исследованных системах уменьшается, а увеличение концентрации реагирующих фаз приводит к увеличению значения α .

Для системы KGa – NaOH опыты проводились только при следующих начальных условиях: концентрации галламы калия 0,92 г-экв/л, концентрации водного рас-