

дуг иметь более «искривленную» траекторию. Хотя полная длина этой траектории будет равна  $R_0$ , остановка таких частиц произойдет в области, размеры которой значительно больше по сравнению с беспористым случаем. Понятие «проективный пробег» при взаимодействии заряженных частиц с пористым материалом теряет физический смысл.

Отличия от случая беспористого материала очевидны. Первое из них – отсутствие брегговского пика в конце траектории протонов и «размытость» результирующего поля энерговыделения.

Для электронов последовательность вычислений остается прежней. Изменяется только функциональная зависимость вероятности отражения частиц от свободной поверхности поры от отношения углов отражения и падения. Для протонов использовалась «функция отражения», полученная О.Б. Фирсовым [3, 4]. Тенденция «размытия» результирующего поля энерговыделения в случае воздействия потока электронов становится еще отчетливее.

Расчёт дифференциальных и интегральных характеристик поля электромагнитного излучения за плоскими защитными экранами проводился на основе таковых для поля термализующихся в пористом вольфрам-борсодержащем материале электронов с использованием верифицированного пакета программ [1]. Анализ этих результатов свидетельствует о существенной деформации диаграммы направленности вторичного излучения в сторону, параллельную плоскости размещения экрана.

Таким образом, кроме увеличения эффективности защиты от первичного потока электронов, пористость СВС-материалов обеспечивает защиту от генерируемых при взаимодействии электронов с веществом  $\gamma$ -квантов.

### Заключение

Анализ результатов численных экспериментов по изучению защитных от ионизирующих излучений свойств композиционных материалов, полученных в режиме технологического горения, позволяет сформулировать следующие выводы:

- подтверждены выводы по результатам приборного эксперимента относительно преимуществ вольфрам-борсодержащих материалов и двухслойных защитных экранов графит-металлокерамика;
- пористость СВС-материалов, определяемая условиями синтеза, обеспечивает увеличение эффективности защитных конструкций как от первичного потока заряженных частиц, так и от генерируемых ими потоков  $\gamma$ -квантов: поле энерговыделения пучков заряженных частиц в СВС-материалах «размывается», что снижает термоударные нагрузки; понятие «проективный пробег» при взаимодействии заряженных частиц с пористым материалом теряет физический смысл; диаграмма направленности вторичного излучения значительно деформируется в направлении, параллельном поверхности защитного экрана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортов В.Е., Шаманин И.В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
2. Ершов Ю.И., Шихов С.Б. Математические основы теории переноса. Т. 1. Основы теории. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
3. Фирсов О.Б. Отражение быстрых ионов от плотной среды под скользящими углами // Доклады АН СССР. – 1966. – Т. 169. – № 6. – С. 1311–1313.
4. Калашников Н.П., Ремизович В.С., Рязанов М.И. Столкновения быстрых заряженных частиц в твердых телах. – М.: Атомиздат, 1980. – 272 с.

УДК 66.023.2

## АНАЛИЗ РАБОТЫ АМАЛЬГАМНО-ОБМЕННОЙ КОЛОННЫ С БОЛЬШИМ ОТБОРОМ

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

Томский политехнический университет  
E-mail: orlov@phtd.tpu.edu.ru

*Получены уравнения, описывающие процесс разделения изотопов в фазах при большом отборе. Каждое из этих уравнений при определённых условиях сводится к уравнению колонны при малых отборах. Показано, что число теоретических тарелок в фазе амальгамы тем меньше, чем больше отбор, а при работе колонны с большим отбором величина обменного потока одинакова для фазы амальгамы и фазы раствора.*

В ряде случаев приходится эксплуатировать колонны в режиме большого отбора, когда величина потока отбора  $q_k$  делается сравнимой с величиной фазовых потоков циркуляции [1].

Рассмотрим, как можно описать процесс изотопного разделения в этом случае.

Поскольку градиенты изотопных концентраций в обменных фазах различны:

$$\frac{dc_1}{dx} \neq \frac{dc_2}{dx}, \quad \text{т.к.} \quad \frac{dc_1}{dx} = \left(1 - \frac{q_k}{J}\right) \frac{dc_2}{dx}, \quad (1)$$

где  $q_k = J - J'$  – разность прямых и обратных потоков (отбор),  $c_1$  и  $c_2$  – изотопные концентрации в фазах [2].

Градиенты изотопных концентраций в обменных фазах запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dc_1}{dx} &= \frac{J_0}{J} [\varepsilon c_1 (1 - c_1) - (c_1 - c_2)], \\ \frac{dc_2}{dx} &= \frac{J_0}{J'} [\varepsilon c_2 (1 - c_2) - (c_1 - c_2)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $J_0$  – величина полного обменного потока между фазами;  $\varepsilon$  – коэффициент изотопного обогащения  $\varepsilon = \alpha - 1$ , где  $\alpha$  – коэффициент элементарного изотопного разделения.

Если воспользоваться соотношением (1) и уравнением переноса лёгкой компоненты вдоль по колонне [3]:

$$(Jc_1 - J'c_2) - \left(D_1 \frac{dc_1}{dx} + D_2 \frac{dc_2}{dx}\right) = q_k C_k,$$

то можно выразить разность  $(c_1 - c_2)$  как функцию только  $c_1$ :

$$c_1 - c_2 = \frac{q_k (c_k - c_1)}{J'} + \frac{1}{J'} (D_1 + \frac{J'}{J} D_2) \frac{dc_1}{dx}. \quad (3)$$

Выражение для  $(c_1 - c_2)$  через  $c_2$  получается аналогичного типа уравнения (3). Здесь  $D_1$  и  $D_2$  – коэффициенты диффузии в фазах;  $c_k$  – выходная (конечная) изотопная концентрация.

Подставляем теперь выражение  $(c_1 - c_2)$  в систему уравнений (2) и преобразуем их к следующему виду:

$$\begin{aligned} \left[\frac{J}{J_0} + \frac{1}{J'} (D_1 + \frac{J'}{J} D_2)\right] \frac{dc_1}{dx} &= \varepsilon c_1 (1 - c_1) - \frac{q_k (c_k - c_1)}{J'}, \\ \left[\frac{J'}{J_0} + \frac{1}{J} (D_1 + \frac{J'}{J} D_2)\right] \frac{dc_2}{dx} &= \varepsilon c_2 (1 - c_2) - \frac{q_k (c_k - c_2)}{J}. \end{aligned} \quad (4)$$

Обозначая выражения в скобках соответственно как  $D_9$  (т.к. они в силу близости потоков  $J$  и  $J'$  мало друг от друга отличаются), можем представить ур. (4) в виде:

$$\begin{aligned} \left(\frac{J}{J_0} + \frac{D_9}{J'}\right) \frac{dc_1}{dx} &= \varepsilon c_1 (1 - c_1) - \frac{q_k (c_k - c_1)}{J'}, \\ \left(\frac{J'}{J_0} + \frac{D_9}{J}\right) \frac{dc_2}{dx} &= \varepsilon c_2 (1 - c_2) - \frac{q_k (c_k - c_2)}{J}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, получаются уравнения, описывающие процессы разделения в фазах [4, 5]. Каждое из этих уравнений сводится к уравнению колонны при малых отборах с учётом того, что  $J \cong J'$ , а  $c_1 \cong c_2 \cong c$ .

Из уравнений (5) следует, что высота эквивалентной теоретической тарелки для амальгамы  $H_1$  и раствора  $H_2$  находится следующим образом:

$$H_1 = \frac{J}{J_0} + \frac{D_9}{J'}; \quad H_2 = \frac{J'}{J_0} + \frac{D_9}{J}. \quad (6)$$

С учётом того, что  $H_1 \frac{dc_1}{dx} = \frac{dc_1}{dn}$ , а  $H_2 \frac{dc_2}{dx} = \frac{dc_2}{dn}$ , система уравнений (5) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dc_1}{dn} &= \varepsilon c_1 (1 - c_1) - \frac{q_k (c_k - c_1)}{J'}, \\ \frac{dc_2}{dn} &= \varepsilon c_2 (1 - c_2) - \frac{q_k (c_k - c_2)}{J}. \end{aligned} \quad (7)$$

Каждое из уравнений системы (7) может быть решено по аналогии с решением уравнения для колонны, если принять  $J = J_{cp}$ , а  $J' = J_{cp} - q_k = J'_{cp}$ , где  $J_{cp}$  – усредненный поток вещества.

Теперь необходимо оценить соотношение между числом теоретических тарелок в фазе амальгамы и раствора. Из системы уравнений (6) следует:

$$H_1 J' - H_2 J = 0, \quad (8)$$

т.е.  $\frac{J}{J'} = \frac{H_1}{H_2}$ .

Известно, что  $L = H_1 N_1 = H_2 N_2$ , где  $L$  – длина колонны. С учётом этого, ур. (8) преобразуется к виду:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{J'}{J} \quad \text{или} \quad N_1 J = N_2 J', \quad (9)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – число теоретических тарелок в фазе амальгамы и раствора.

Из соотношений (9) видно, что при работе колонны в режиме с отбором  $N_1 < N_2$ , т.е. число теоретических тарелок в фазе амальгамы тем меньше, чем больше отбор.

В соответствии с (9) будет справедливо:

$$\frac{N_2 - N_1}{N_2} = \frac{J - J'}{J}.$$

А т.к.  $J - J' = q_k$ , то получаем:

$$\frac{N_2 - N_1}{N_2} = \frac{J - J'}{J} = \frac{q_k}{J}.$$

Вследствие того, что  $D_9$  много меньше  $J'$ ,  $J$  и  $J_0$ , можно для системы уравнений (6) положить  $D_9 \cong 0$ . Тогда будем иметь:

$$H_1 J_0 = J \quad \text{и} \quad H_2 J_0 = J'. \quad (10)$$

Воспользовавшись тем, что  $L = H_1 N_1 = H_2 N_2$ , из уравнений (10) следует:

$$(LJ_0)_{ам} = J N_1 \quad \text{и} \quad (LJ_0)_{р-р} = J' N_2.$$

Принимая во внимание, что  $J N_1 = J' N_2$ , получаем, что  $(J_0)_{ам} = (J_0)_{р-р}$ , т.е. при работе колонны с большим отбором величина обменного потока  $J_0$  будет одинаковой как для амальгамы, так и для раствора (что соответствует закону сохранения вещества).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розен А.М. Теория разделения изотопов в колоннах. – М.: Атомиздат, 1960. – 436 с.
2. Тихомиров И.А., Видяев Д.Г., Гринюк А.А. Уравнение переноса вещества и лёгкой компоненты вдоль по колонне без потерь // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 89–92.
3. Тихомиров И.А., Видяев Д.Г., Гринюк А.А. Уравнение амальгано-обменной колонны в стационарном режиме работы // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 95–96.
4. Рыскин Г.Я., Пташник В.Б. Кинетика изотопного обмена в системе амальгама лития – водный раствор LiCl // Электрохимия. – 1980. – Т. 16. – № 1. – С. 108–111.
5. Князев Д.А., Цивадзе А.Ю., Клинский Г.Д., Левкин А.В. Кинетика изотопного обмена лития в амальгамных системах // Известия ТСХА. – 1988. – № 2. – С. 166–168.

УДК 621.039.542.34

## О МОДЕЛИРОВАНИИ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.И. Локтев, К.Ю. Вергазов, В.А. Власов\*, И.А. Тихомиров\*

ОАО «НЗХК». г. Новосибирск

E-mail: loktev@nccp.ru

\*Томский политехнический университет

E-mail: vlasov@tpu.ru

*Рассматриваются модели технологического поведения порошковых материалов, связанных с вопросами их упаковки, смешения, влияния на однородность и прочность топливных таблеток.*

## Введение

Дисперсионные вещества часто проявляют свойства, характерные для разнородных материалов – твёрдых и жидких, сплошных и дискретных, аморфных и кристаллических, упругих и пластичных. В процессе технологической переработки происходит переход от одного доминирующего набора свойств к другому. Поэтому при разработке технологических схем изготовления промышленных изделий с использованием дисперсионных материалов, например, для производства топливных таблеток для энергетических реакторов, необходимо широко использовать различные приёмы моделирования. Более того, могут быть сформулированы общие приёмы моделирования технологического процесса, о них пойдёт речь в данной статье.

Авторами ранее уже затрагивались некоторые проблемы анализа и диагностики состояния дисперсных систем, а также моделирования технологических операций, при обработке порошковых материалов в том числе [1–5].

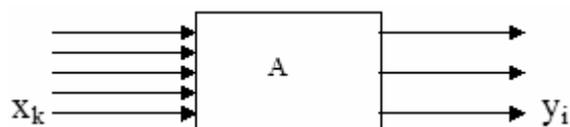
## 1. Общие вопросы моделирования технологического процесса

Технологический процесс промышленного изготовления каких-либо изделий характеризуется набором различного рода процессов, протекающих с продуктом, и их последовательностью. В общем виде можно дать следующую его характеристику [4]:

"Технологический процесс – это совокупность организованных с помощью определённых технических средств, взаимно согласованных потоков материальных, энергетических и информацион-

ных ресурсов, предназначенных для последовательного и направленного изменения свойств исходного продукта для получения конечного изделия с заданными потребительскими свойствами с приемлемо низкими издержками производства и минимальным риском для здоровья персонала и населения, для загрязнения окружающей среды".

Графически отдельную операцию и весь процесс изготовления продукции можно изобразить следующей схемой в виде чёрного ящика:



**Рис. 1.** Представление технологического процесса в виде чёрного ящика, где  $X$  и  $Y$  – множество существенных параметров начального состояния (характеристики качества) исходного материала и состояния готового продукта,  $A$  – оператор технологического воздействия, зависит от параметров, определяющих технологические режимы обработки изделий

Для каждого параметра качества готового изделия можно записать функциональное выражение в общем виде:

$$y_i = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n, a_1, a_2, \dots, a_k). \quad (1)$$

Вид функции  $F$  будет определять математическую модель исследуемого процесса.

Математическая модель технологической операции, состоящей из набора определённых действий над продуктом, это такое символическое выражение или система выражений, которая заменяет действия над продуктом определёнными мате-