

К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСИ ТРУДНОСМЕШИВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Процесс смешения неоднородных сыпучих материалов широко используется во многих отраслях промышленности, таких, как химическая, энергетическая, пищевая, микробиологическая и многих других. Одной из перспективных базовых конструкций оборудования являются барабанные смесители. К основным достоинствам этого типа смесителей относятся многообразие функциональных возможностей, в том числе и для организации совмещенных процессов, невысокая потребляемая энергия и ярко выраженная сглаживающая функция. Но их применение в промышленности сдерживается вследствие недостаточно высокого качества получаемой смеси при смешивании компонентов, склонных к сегрегации.

Сущность проблемы заключается в том, что при перемешивании смеси такого рода компонентов внутри барабана происходит процесс их спонтанного разделения в поперечном сечении, доминирующий над процессом продольного перемешивания. Вследствие этого стремятся к использованию различного рода внутренних устройств, интенсифицирующих перемешивание. Однако при вращении барабана в нем образуются циркуляционные контуры, в которых под действием сегрегации происходит разделение материала по плотности и размеру частиц, что является причиной неравнозначного воздействия на них элементов конструкции внутренних устройств и как следствие различного времени пребывания компонентов в барабане, слабого и неоднородного их продольного перемешивания и низкого качества смеси.

Для решения этой проблемы предложен принцип смешения материалов, склонных к сегрегации, путем управления сегрегированными потоками компонентов смеси. Разработана конструкция насадки, пригодная для традиционных конструкций аппаратов, состоящая из горизонтального вращающегося барабана с периферийными подъемными лопастями.

Устройство с управляемыми сегрегированными потоками обеспечивает возможность изменять их мощность и направление вдоль и поперек оси барабана. Оснащение традиционных аппаратов предлагаемой насадкой позволяет регулировать время пребывания частиц, отличающихся по размеру или плотности.

При проектировании такого рода оборудования первостепенное значение приобретает проблема масштабного перехода, в связи с чем в настоящей работе обсуждается метод математического моделирования процесса.

В схеме движения зернистого материала в поперечном сечении аппарата можно выявить следующие многократно повторяющиеся основные стадии движения частиц: 1) перемещение в скатывающемся слое засыпки; 2) заполнение лопастей барабана; 3) перемещение в неподвижном относительно барабана слое засыпки материала; 4) падение с лопастей барабана на рабочую поверхность отклоняющих элементов; 5) перемещение по поверхности отклоняющих элементов; 6) падение материала с отклоняющих элементов в засыпку.

Продольное движение материала происходит на пятой стадии в связи с тем, что в аппарате организовано уравновешенное встречное движение сегрегированных потоков, соответствующие результирующие потоки равны нулю. На всех стадиях, за исключением третьей, происходит продольное перемешивание зернистой среды, которое достаточно хорошо описывается диффузионной моделью [1]. Для описания перемешивания принята более простая однопараметрическая модель с постоянным по всей длине аппарата коэффициентом продольного перемешивания, применимость которой для инженерной практики подтверждена экспериментальными результатами [2].

Дифференциальное уравнение, описывающее динамику распределения частиц целевого компонента в барабане, записано в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{\text{пр}} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + I_v^+ + I_v^-, \quad 0 \leq z \leq L, \quad (1)$$

где $D_{\text{пр}}$ – определяется расчетным путем по [2].

Граничные условия у торцов барабана отражают отсутствие диффузионного потока через торцевые стенки:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=L} = 0. \quad (2)$$

Для численного решения уравнение динамики процесса (1) с граничными условиями (2) приведено к алгебраическим уравнениям с использованием разностной схемы Кранка – Николсона, являющейся схемой второго порядка аппроксимации [3]. Шаг переменной z выбран при этом кратным длине ячейки и рабочей длине барабана.

При использовании общепринятого обозначения произвольной функции f в точке (t_j, z_i) в виде f_i^j записаны следующие разностные аналоги для каждого члена уравнения (1).

$$\frac{\partial c}{\partial t} \cong \frac{c_i^{j+1} - c_i^j}{\Delta t};$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \cong c_{i-1}^{j+1/2} - 2c_i^{j+1/2} + c_{i+1}^{j+1/2};$$

$$I_v^- = \gamma c_i^{j+1/2};$$

$$I_v^+ = \frac{l}{2} \gamma \sum_{s=1}^k \left[\frac{1}{2} g_s^1(z_i) \left(\frac{f_1(c_s^{j-k}) + f_1(c_{s+1}^{j-k})}{2} \right) + g_s^2(z_i) \left(\frac{f_2(c_s^{j-k}) + f_2(c_{s+1}^{j-k})}{2} \right) \right],$$

где $f(c)$ – определяется экспериментально через коэффициент разделения, определяемый на плоской модели аппарата [4].

Граничные условия (2) в разностной форме записаны в виде:

$$C_{-1}^{j+1/2} = C_1^{j+1/2}, \quad C_{n-1}^{j+1/2} = C_{n+1}^{j+1/2} \quad (4)$$

После подстановки разностных аналогов (3) в уравнение (1) с учетом граничных условий (4) и многоступенчатой сепарации уравнение динамики распределения целевого компонента в аппарате для многоступенчатой сепарации сводится к системе $n + 1$ линейных уравнений с $n + 1$ неизвестными:

$$-a_i c_{i-1}^{j+1} + P_i c_i^{j+1} - q_i c_{i+1}^{j+1} = f_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

где $a_0 = 0, q_n = 0$.

Решение системы (5) найдено с использованием метода факторизации [3].

Проведено экспериментальное исследование эффективности и динамических характеристик периодически действующего смесителя предложенной конструкции с барабаном, имеющим отношение диаметра к длине, равное 1 : 4. Исследование проведено с использованием смеси модельных материалов: стеклянного бисера, диаметром 3,25...3,5 мм, и полиэтиленом гранулированным, диаметром 4...4,5 мм. Выбор модельных материалов обусловлен большим их различием по плотности (стеклянный бисер – 2537 кг · м⁻³, полиэтилен гранулированный – 917 кг · м⁻³), а также и по размеру, что обуславливает большую склонность их к сегрегации.

Анализ результатов, приведенных на рис. 1 и 2, позволяет сделать вывод о том, что предложенная конструкция смесителя, позволяющая управлять сегрегированными потоками, эффективна при приготовлении смеси из трудносмешиваемых материалов.

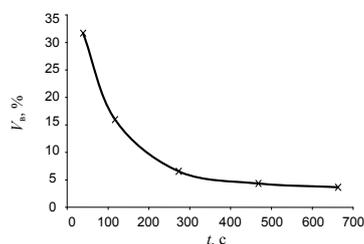
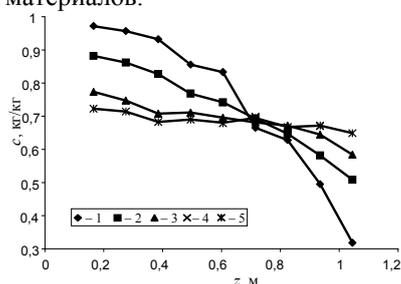


Рис. 1. Динамика распределения целевого компонента по длине барабана (эксперимент):

1 – 39 с.; 2 – 117 с.; 3 – 273 с.;
4 – 468 с.; 5 – 663 с.

Рис. 2. Изменение коэффициента вариации в процессе смешивания (эксперимент)

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

c – концентрация контрольного компонента, кг/кг; t – время, с; z – декартовы координаты, м; L – длина барабана, м; $D_{пр}$ – коэффициент продольного перемешивания, м²/с; I_v^+ , I_v^- – функции источников (стоков) целевого компонента, м²/с; γ – отношение производительности подъемно-лопастной насадки к массе засыпки материала в барабане; $g_i(z)$ – функция плотности распределения потока частиц вдоль барабана после i -й ячейки; $f_1(c_S^{j-k})$ – функция концентрации в зонах подъема и опускания лопастей; V_c – коэффициент вариации, %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борщев, В.Я. Модель продольного перемешивания твердой фазы в насадочном барабане / В.Я. Борщев, В.Н. Долгунин, А.А. Уколов ; Тамб. ин-т хим. машиностроения. – Тамбов, 1984. – 6 с. – Деп. в ОНИИТЭХИМ г. Черкассы, № 580ХП84.
2. Вершинина, Н.П. Исследование влияния продольного перемешивания материала на длительность сушки его в барабанной сушилке : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.П. Вершинина. – Харьков, 1975. – 16 с.
3. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – М. : Наука, 1977. – 456 с.
4. Оценка гидромеханики движения материалов в барабанном грануляторе-сушилке и совершенствование его конструкции / В.Н. Долгунин, А.А. Уколов и др. // Химическая промышленность. – 1986. – № 7. – С. 422 – 425.

Кафедра «Технологическое оборудование и пищевые технологии»