

*М.Ю. Илясова, А.С. Кузнецов, М.С. Горшкова,
Л.А. Воробьева**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАСКАДНОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ранее была предложена технология каскадной гравитационной классификации, основывающаяся на принципе многократного повторения процесса разделения на каскаде последовательно уставленных сепарирующих элементов с организацией многоступенчатого противоточного перемещения неоднородных частиц в направлении, поперечном к направлению основного потока [1].

Для технологического расчета каскадного гравитационного классификатора необходимо располагать возможностью прогнозирования динамики распределения концентрации частиц целевого компонента $c(x, y, t)$ на ступенях каскада. С целью разработки уравнения динамики проанализируем отдельные фазы движения зернистого материала на ступенях каскада.

При движении частиц зернистого материала в каскадном гравитационном классификаторе можно выделить следующие основные стадии, многократно повторяющиеся на ступенях каскада сепарации: 1) падение из бункера (промежуточных приемников) на наклонную плоскость; 2) перемещение по рабочей поверхности наклонной плоскости; 3) движение по одному из двух рядов промежуточных приемников.

В соответствии с этой схемой движения зернистой среды уравнение динамики распределения частиц целевого компонента в каскадном гравитационном классификаторе сформулировано исходя из условия, что распределение компонентов в гравитационном потоке неоднородной зернистой среды на шероховатом скате происходит вследствие проявления различных физических эффектов [2]. При этом кроме конвекционного переноса компонентов учтено взаимное перемещение частиц, обусловленное проявлением эффектов перемешивания, сегрегации и миграции при их взаимодействии. Действие отклоняющих элементов промежуточных приемников фракций материала смоделировано путем введения соответствующих функций, учитывающих разделение сегрегированных потоков, их противоточное транспортирование и смещение, с оценкой времени протекания названных процессов.

С учетом указанных потоков дифференциальное уравнение, описывающее динамику распределения частиц целевого компонента на рабочей поверхности j -й ступени сепарации гравитационного классификатора, можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial c_{j,i} \rho_B}{\partial t} = -\frac{\partial (uc_{j,i} \rho_B)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho_B \left(D_{\text{диф}} \frac{\partial c_{j,i}}{\partial y} - D_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} c_{j,i} - K_s \Delta M c_{j,i} \right) \right], \quad (1)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ – номер ячейки сепарации; $j=1, 2, \dots, m$ – номер ступени каскада сепарации; $c_{j,i} = c_{j,i}(x, y, t)$ – концентрация целевого компонента в i -й ячейке сепарации на j -й ступени каскада; t – время; u – средняя скорость в направлении потока x ; $D_{\text{диф}}$, D_m , K_s – коэффициенты квазидиффузионного перемешивания, миграции и сдвиговой поточной сегрегации, соответственно.

Параметр неоднородности ΔM определяется в виде избыточной суммы моментов сил трения, тяжести и ударных импульсов как функция свойств частиц и параметров потока [3].

Значения коэффициента сегрегации K_s , необходимые для моделирования процесса, определяются путем экспериментального исследования интенсивности разделения частиц на шероховатой наклонной плоскости по методике, описанной в [2].

Граничные условия для уравнения (1) сформулированы из условия отсутствия поперечных материальных потоков на верхней и нижней границах движущегося слоя частиц и стабильной концентрации частиц контрольного компонента в потоке на входе в классификатор (первой ступени каскада):

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. В.Н. Долгунина и д-ра техн. наук, доц. В.Я. Борщева.

$$D_{\text{диф}} \frac{\partial c_{j,i}}{\partial y} = D_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} = K_S \Delta M \Big|_{y=0,h} = 0; \quad (2)$$

$$c_{j,i}(t, 0, y) = c_0 \quad \text{при } j=1. \quad (3)$$

Начальное распределение целевого компонента принимается равномерным по объему материала на всех ступенях каскада:

$$c_j(0, x, y) = c_0 = \text{const}. \quad (4)$$

Основным функциональным узлом классификатора является блок промежуточных приемников (отклоняющих элементов), который выполняет две главные функции: 1) делит поток частиц после сегрегации на наклонной плоскости на две части, одна из которых вследствие сегрегации обогащена, а другая обеднена целевым компонентом; 2) направляет одну часть потока к одному торцу ската, а другую – к противоположному его торцу на соседние ячейки сепарации.

Вследствие перераспределения сегрегированных частей потока материала по ячейкам сепарации после каждой из ступеней каскада, концентрация частиц целевого компонента на входе каждой ступени сепарации будет изменяться в пределах каждой ячейки в зависимости от величины эффекта сегрегации, достигаемого на соседних ячейках предыдущей ступени каскада. В связи с этим при допущении полного перемешивания сегрегированных частей потока в пределах одной ячейки сепарации граничные условия на второй и последующих ступенях каскада будут определяться следующим образом:

– при $j > 1, 1 < i < n$

$$c_{j,i}(t + \Delta t, 0, y) = 0,5 [c_{j-1,i-1}''(t, x=L) + 2\bar{c}_{j-1,i+1}(t, x=L) - c_{j-1,i+1}''(t, x=L)]; \quad (5)$$

– при $j > 1, i=1$

$$c_{j,i}(t + \Delta t, 0, y) = 0,5 [2\bar{c}_{j-1,i}(t, x=L) - c_{j-1,i}''(t, x=L) + 2\bar{c}_{j-1,i+1}(t, x=L) - c_{j-1,i+1}''(t, x=L)]; \quad (6)$$

– при $j > 1, i=n$

$$c_{j,i}(t + \Delta t, 0, y) = 0,5 [c_{j-1,i-1}''(t, x=L) + 2\bar{c}_{j-1,i}(t, x=L) - c_{j-1,i}''(t, x=L)], \quad (7)$$

где L – длина ската рабочей поверхности.

Средняя концентрация целевого компонента на сыпном пороге ($x = L$) i -й ячейки сепарации j -й ступени каскада определяется как среднеинтегральная величина:

$$\bar{c}_{j,i}(t, x=L) = \frac{1}{G_{\text{уд}}} \int_0^h u(y) \rho_b c_{j,i}(t, x=L, y) dy, \quad (8)$$

где h – высота слоя материала на скате; $G_{\text{уд}}$ – удельная производительность каскадного классификатора.

Средняя концентрация целевого компонента в сегрегированной части потока на сыпном пороге i -й ячейки сепарации j -й ступени каскада определяется как среднеинтегральная величина в соответствии со следующим выражением:

$$c_{j,i}''(t, x=L) = \frac{2}{G_{\text{уд}}} \int_H^h u(y) \rho_b c_{j,i}(t, x=L, y) dy, \quad (9)$$

где h' определяется из условия

$$\int_0^{h'} u(y) \rho_b dy = 0,5 G_{\text{уд}}.$$

Время «запаздывания» потока Δt при перетекании с одной ступени каскада на другую определяется как

$$\Delta t = \sqrt{2H/g},$$

где H – высота размещения порога ссыпания над поверхностью ската последующей ступени.

С учетом изложенной схемы наложения сегрегированных потоков на каждой из ступеней каскада концентрация целевого компонента в приемниках фракций материала (по ячейкам сепарации) будет определяться по аналогии с выражениями (5) – (7):

– при $1 < i < n$

$$c_i(t + \Delta t) = 0,5 [c_{m,i-1}''(t, x=L) + 2\bar{c}_{m,i+1}(t, x=L) - c_{m,i+1}''(t, x=L)]; \quad (10)$$

– при $i=1$

$$c_i(t + \Delta t) = 0,5 [2\bar{c}_{m,i}(t, x=L) - c_{m,i}''(t, x=L) + 2\bar{c}_{m,i+1}(t, x=L) - c_{m,i+1}''(t, x=L)]; \quad (11)$$

– при $i=n$

$$c_i(t + \Delta t) = 0,5 [c_{m,i-1}''(t, x=L) + 2\bar{c}_{m,i}(t, x=L) - c_{m,i}''(t, x=L)]. \quad (12)$$

С целью апробации разработанной модели процесса гравитационной классификации зернистых материалов проведено моделирование динамики распределения частиц целевого компонента по ступеням классификации с использованием коэффициента разделения, величина которого определена по методике, описанной в [4]. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными свидетельствует об их адекватности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борщев, В.Я. Технология поточной многокаскадной гравитационной сепарации зернистых материалов / В.Я. Борщев, В.Н. Долгуни, М.Ю. Дронова // XXIV Российская школа по проблемам науки и технологий : тез. докл. – Миасс, 2004. – С. 117.
2. Dolgunin, V.N. Research on particle segregation during rapid gravity flow / V.N. Dolgunin, A.A. Ukolov, O.O. Ivanov ; In Kalman H., Le-vy A. and Hubert M. // eds. The Forum for Bulk Solids Handling, Proceedings. – The Dead Sea, Israel, 2000. – Vol. 1. – P. 11.33 – 11.37.
3. Долгуни, В.Н. Модель механизма сегрегации при быстром гравитационном течении частиц / В.Н. Долгуни, А.А. Уколов, П.В. Классен // ТОХТ. – 1992. – Т. 26, № 5. – С. 707 – 716.
4. Борщев, В.Я. Исследование процесса сепарации зерновой смеси в быстром гравитационном потоке / В.Я. Борщев, М.Ю. Дронова, А.Н. Куди // Труды ТГТУ. – Тамбов, 2006. – Вып. 19. – С. 7 – 11.

*Кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
«Технологическое оборудование и пищевые технологии»*