

УДК 621.928

МЕХАНИКА СЕПАРАЦИИ ЧАСТИЦ ИЗ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВЗВЕСИ ПРИ НЕОДНОРОДНОЙ МАССОВОЙ СИЛЕ

Ю.Б. КАЗАКОВ, В.Е. МИЗОНОВ, Е.А. БАРАНЦЕВА, доктора техн. наук, В.А. ФИЛИППОВ, инж.

Предложена ячеечная модель для описания кинетики сепарации частиц при их высокой концентрации и неоднородной массовой силе, базирующаяся на теории цепей Маркова с матрицей переходных вероятностей, зависящей от векторов состояния. Описан процесс блокировки движения частиц при локальной концентрации, близкой к предельной. Приведено сравнение скоростей сепарации при различных распределениях массовой силы.

Ключевые слова: сепарация, распределение массовой силы, цепь Маркова, вектор состояния, матрица переходных вероятностей, скорость сепарации.

MECHANICS OF PARTICLE SEPARATION FROM CONCENTRATED SUSPENSION UNDER NONHOMOGENEOUS MASS FORCE

Yu.B. KAZAKOV, V.E. MIZONOV, E.A. BARANTSEVA, Doctor of Engineering, V.A. PHILIPPOV, Engineer

The article considers a cell model for describing particle separation kinetics at high particle concentration under nonhomogeneous mass force. The model is based on the theory of Markov's chains with the state dependent matrix of transition probabilities. The process of particle motion blockage at their local concentration close to the limit one is described. The comparison of separation rates for some mass force distributions is presented.

Keywords: separation, mass force distribution, Markov chain, state vector, matrix of transition probabilities, separation rate.

Процессы сепарации мелкодисперсных частиц из газа или жидкости широко распространены в различных отраслях промышленности. Существует большое число конструкций сепараторов разного принципа действия. Наиболее простым принципом сепарации частиц из вязкой жидкости является их осаждение под действием силы веса. Однако для мелких частиц, имеющих низкую скорость витания, производительность такого процесса очень мала именно из-за низкой скорости витания. Увеличение плотности (ускорения) определяющей сепарацию массовой силы может быть обеспечено при центрифугировании, когда роль этой силы играет центробежная сила, ускорение которой может в десятки раз превосходить ускорение силы тяжести. Однако распределение силы по определяющей координате процесса становится уже неравномерным, что затрудняет моделирование и расчет процесса, а также выбор его рациональных параметров. С аналогичной ситуацией сталкиваются при магнитной сепарации, когда распределение массовой силы в зоне сепарации тоже трудно обеспечить равномерным. Построение модели и метода расчета процесса еще более усложняется при высокой концентрации частиц в жидкости, когда предположение о независимом друг от друга их движении становится неприемлемым. Поэтому в качестве объекта моделирования нами выбран процесс осаждения частиц твердой фазы в концентрированной суспензии в поле неоднородной массовой силы, формируемой, например, магнитным полем. Теоретические основы процесса сепарации в вязкой жидкости описаны в работе

[1]. Однако развиваемый в ней подход основан на дифференциальных уравнениях процесса, аналитическое решение которых возможно только при линейной постановке задачи и других, далеко идущих упрощениях. Одной из новых стратегий моделирования процессов переноса является использование теории цепей Маркова. Основные принципы построения таких моделей изложены в работе [2], и именно они положены в основу нашего исследования.

Расчетная схема процесса и ее ячеечное представление показаны на рис. 1.

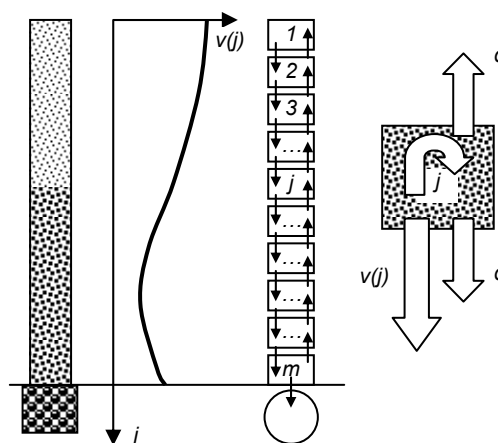


Рис. 1. Расчетная схема ячеечной модели процесса

Основной физической величиной, определяющей кинетику процесса сепарации, является скорость осаждения, которая в концентрированной суспензии зависит от локальной концентра-

ции частиц, т. е. модель оказывается нелинейной. Для построения модели процесс представлен цепью Маркова, в которой пространство состояний соотносено с рабочим объемом сепарационной камеры (рис. 1).

Возможные переходы из одного состояния в другое разделены на симметричные составляющие, характеризующие чисто стохастическое движение частиц (d), и несимметричную составляющую (v), характеризующую скорость осаждения. Последняя ячейка цепи – поглощающее состояние, в которое уходят сепарированные частицы. Кинетика процесса описывается рекуррентным матричным равенством

$$c^{k+1} = P(c^k)c^k, \quad (1)$$

где k – номер временного перехода (дискретный аналог времени); c – вектор концентраций частиц в ячейках; P – матрица переходных вероятностей, имеющая следующий вид

$$P = \begin{bmatrix} 1-d-v_1(c_1) & d & 0 & \dots \\ d+v_1(c_1) & 1-2d-v_2(c_2) & d & \dots \\ 0 & d+v_2(c_2) & 1-2d-v_3(c_3) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где стохастический параметр d принят постоянным.

Для того чтобы построить матрицу P, необходимо знать, как зависит локальная скорость осаждения V_j от локальной концентрации и от локальной массовой силы. Построим простую модель, связывающую эти величины, на основе показанной на рис. 2 расчетной схемы, где все присутствующие в ячейке частицы заменены телом эквивалентного объема.

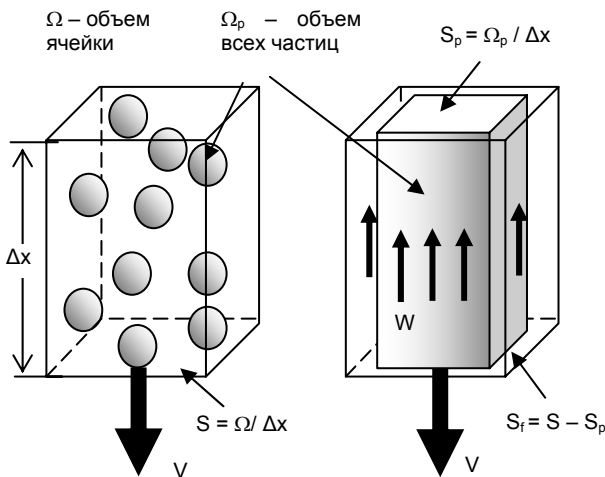


Рис. 2. Расчетная схема определения зависимости скорости осаждения от концентрации частиц

Чтобы жидкость в целом оставалась неподвижной, при движении эквивалентного цилиндра вниз со скоростью V она должна перетекать вверх со скоростью W, причем

$$VS = W(S - S_p) \rightarrow W = VS / (S - S_p) = V\Omega / (\Omega - \Omega_p) = V \frac{1}{1 - \frac{\Omega_p}{\Omega}} = V \frac{1}{1 - c}, \quad (3)$$

где c – объемная концентрация частиц в ячейке, предельное значение которой соответствует плотной упаковке частиц.

При квазистационарном движении $F_c = F_m$, где F_m – массовая сила (вес, магнитная, центробежная и т.д.); F_c – сила сопротивления. При медленном осаждении мелких частиц диаметром d_p в вязкой жидкости зависимость силы сопротивления от скорости может быть принята линейной. Тогда

$$F_c = c_r A \frac{\rho_l W^2}{2} = \frac{24}{Re} A \frac{\rho_l W^2}{2} = \frac{24\nu}{Wd_p} \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{\rho_l W^2}{2} = 3\pi\mu d_p W = 3\pi\mu d_p \frac{V}{(1-c)}. \quad (4)$$

Из (4) следует расчетное выражения для локальной скорости частицы:

$$V_j = \frac{F_{mj}(1-c_j)}{3\pi d_p \mu}. \quad (5)$$

Вероятность конвективного переноса связана с физической скоростью движения соотношением $v_j = V_j \Delta t / \Delta x$, где Δt – продолжительность перехода. Полученные зависимости позволяют рассчитывать матрицу P на каждом переходе и по соотношению (1) моделировать кинетику сепарации, которая характеризуется накоплением частиц в поглощающем состоянии $\varepsilon(k)$. Пример расчета кинетики сепарации при различных начальных равномерно распределенных концентрациях показан на рис. 3.

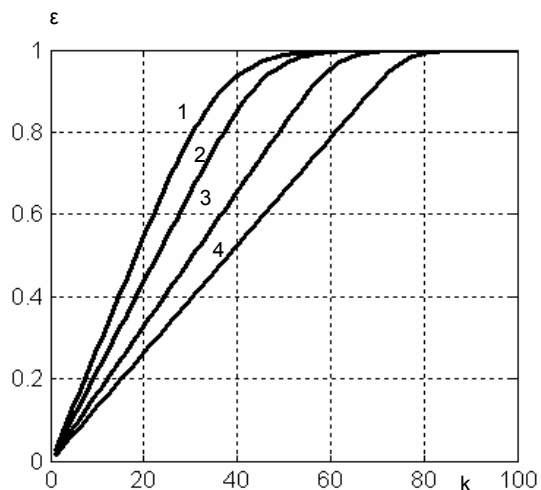


Рис. 3. Графики кинетики сепарации при различных концентрациях частиц: 1 – $c_0 \rightarrow 0$; 2 – $c_0 = 0,2$; 3 – $c_0 = 0,4$; 4 – $c_0 = c_{max}$; ($v_m = 0,3 = const$)

Анализ графиков (рис. 3) показывает, что расчет кинетики по линейной модели ($c_0 \rightarrow 0$, $P = const$) для реальных концентраций дает сильно завышенную скорость сепарации. Если кон-

центрация частиц близка к предельной концентрации c_{max} (частицы плотно упакованы в ячейке), то твердая фаза выходит из зоны сепарации в виде цилиндра с наименьшей возможной скоростью.

Возможное достижение в ячейках предельной концентрации является еще одним типом нелинейности в рассматриваемой задаче. При достижении предельной концентрации в зоне сепарации образуется пробка, вход в которую частицам запрещен, но которая может «рассасываться» благодаря постепенному выходу частиц из нее. Один из возможных подходов к учету этой нелинейности показан на рис. 4.

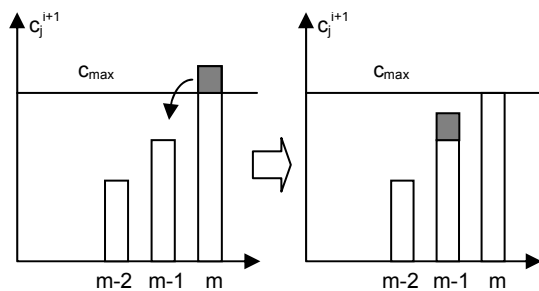


Рис. 4. Схема коррекции вектора состояния при достижении предельной концентрации в ячейке

Согласно схеме рис. 4, после каждого перехода вектор состояния проверяется и, если в какой-то ячейке содержание частиц превышает предельное, избыточные частицы отправляются в предыдущую ячейку. Такая ситуация может возникнуть, например, если выход из последней ячейки в поглощающее состояние затруднен, то есть вероятность выхода составляет не v_m , а αv_m , где α – коэффициент затрудненности. Пример эволюции содержания частиц в зоне сепарации в таком процессе показан на рис. 5.

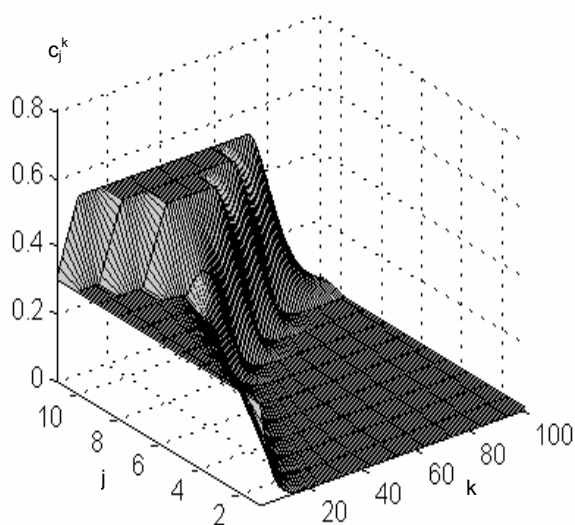


Рис. 5. Эволюция распределения концентрации частиц при $c_0 = 0,3$; $v_m = 0,3 = \text{const}$; $\alpha = 0,5$

Пробка у выхода появляется на 20-м переходе, распространяется на две ячейки вверх, а потом «рассасывается». Естественно, что появление пробок существенно снижает скорость сепарации.

На рис. 6 показаны примеры расчета кинетики процесса для трех случаев изменения по высоте массовой силы (постоянной, линейно убывающей и линейно возрастающей).

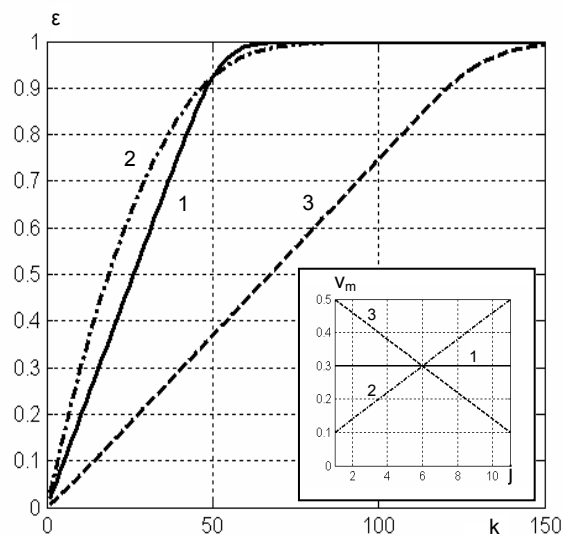


Рис. 6. Графики кинетики сепарации при различных профилях массовой силы ($c_0 = 0,3$; $\alpha = 1$)

При возрастающей к выходу массовой силе в начале процесса имеет место самое быстрое осаждение, так как велика скорость осаждения частиц, близких к поглощающему состоянию. Однако затем скорость замедляется, так как частицы из верхней части зоны сепарации медленно доходят до выхода из зоны. При убывающей вниз массовой силе происходит резкое снижение скорости сепарации. Быстро движущиеся верхние частицы нагоняют медленно движущиеся нижние и образуют пробку, которая нарастает снизу вверх и медленно рассасывается. Очевидно, что такой ситуации следует избегать при проектировании сепаратора. При равномерной и возрастающей массовой силе пробок в зоне сепарации не возникает. В реальном процессе может возникнуть (или быть запланирована) не только продольная, но и поперечная неоднородность массовой силы, которая также может влиять на скорость сепарации. Для моделирования такого процесса тоже естественно использовать ячеечную модель, но уже двумерную, построение которой выходит за рамки настоящей статьи.

Список литературы

1. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989. – 169 с.
2. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // Powder Technology. – 2005. – 157. – P. 128–137.

Казаков Юрий Борисович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-06.

Баранцева Елена Александровна,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45.

Филиппов Василий Александрович, -
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06.