

621.867.522

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ИЗ БУНКЕРА

Д-р.техн.наук, проф. С.Ф Яцун, канд.техн.наук, доц. О.Г. Локтионова асп. Галицына Т.В

В различных производствах распространены операции погрузки-разгрузки сыпучих материалов в технологические и транспортирующие устройства. Неотъемлемой частью оборудования для таких операций являются различного рода бункеры и желоба, устанавливаемые в местах сопряжения основного, транспортирующего и вспомогательного оборудования. Кроме этого бункеры применяются для хранения различных материалов, а также для их объемного и весового дискретного дозирования.

Сыпучие материалы весьма разнообразны по своему гранулометрическому составу, плотности, влажности, слеживаемости и другим физико-механическим свойствам, а, следовательно, и по способности истечения из бункеров. При с влажными, липкими, слёживающимися материалами весьма часты случаи нарушения работы бункеров, заключающиеся в образовании сводов над выпускным отверстием бункера, в результате чего истечение материала частично или полностью прекращается. Другой причиной нарушения нормальной работы бункеров является образование пассивных зон, когда истечение материала происходит только из зоны, расположенной над выпускным отверстием (трубообразование), что существенно уменьшает производительность и полезную емкость бункера. Поэтому повышение эффективности и обеспечение бесперебойной работы бункеров является важной задачей.

Для решения этой проблемы наиболее перспективным методом является вибрационный. Принцип вибрационной интенсификации истечения основан на ослаблении структурных связей между частицами сыпучего материала, на увеличении их относительной подвижности, на силовом разрушении свода, образующегося над выпускным отверстием.

Расчет и проектирование вибрационного оборудования, обеспечивающего высокую производительность, требуют углубленного изучения физических закономерностей воздействия вибрации на ход технологического процесса.

Остановимся на грубодисперсных сыпучих средах, представляющих собой совокупность отдельных твердых частиц, движение которых определяется сцеплением, трением и столкновением между ними. Для получения дифференциальных уравнений течения такого материала в [1, 2, 3] предложено использовать гипотезу сплошности, что позволяет применять методы механики сплошной среды и записать систему уравнений в виде законов сохранения массы и импульса и реологическое уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \operatorname{div}(\bar{V}) &= \frac{1}{\rho} (\nabla \bar{P} + \bar{F}), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla(v \bar{V}) &= 0, \\ P &= P(v; D), \end{aligned} \quad (1)$$

где \bar{V} – вектор относительной скорости материала; P – тензор напряжений; D – тензор скоростей деформаций; \bar{F} – вектор объемных сил; $v = \rho / \rho_0$ – объемная концентрация; ρ – плотность сыпучего материала; ρ_0 – плотность материала гранул.

При построения реологического уравнения воспользуемся подходом, предложенным в [4, 5], и будем считать, что тензор напряжений P зависит только от объемной концентрации v и тензора скоростей деформации D . То есть

$$P = P(v, D), \quad (2)$$

$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{vmatrix}; \quad D = \begin{vmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{vmatrix}.$$

Разложив (2) в ряд с удержанием только линейных слагаемых, получим:

$$P = A_0(D_I, D_{II}, D_{III})I + A_1(D_I, D_{II}, D_{III})D, \quad (3)$$

здесь D_I, D_{II}, D_{III} – инварианты тензора D ; I – единичная матрица.

Аппроксимируем A_0 и A_1 , линейными функциями инвариантов, тогда

$$\begin{aligned} A_0 &= \alpha_0(v)I + \alpha_0'(v)D_I + \alpha_0''(v)D_{II} + \alpha_0'''(v)D_{III}; \\ A_1 &= \alpha_1(v)I + \alpha_1'(v)D_I + \alpha_1''(v)D_{II} + \alpha_1'''(v)D_{III}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha_0, \alpha_0', \alpha_0'', \alpha_1, \alpha_1', \alpha_1'''$ – диссипативные коэффициенты, определяемые на основе экспериментальных данных.

Для адекватного описания двух качественно разных состояний сыпучей среды: бесструктурного и структурированного, качественно отличающихся друг от друга, будем рассмат-

ривать эти коэффициенты в виде кусочно-постоянных функций объемной концентрации твердой фазы, изменяющих свое значение при $v = v_d$; v_d - дилатантная объемная концентрация.

Подставляя (4) в (3) получим:

$$P = (\alpha_0 + \alpha_0' D_I + \alpha_0'' D_{II} + \alpha_0''' D_{III}) I + (\alpha_1 + \alpha_1' D_I + \alpha_1'' D_{II} + \alpha_1''' D_{III}) D. \quad (5)$$

Представим (5) в виде суммы двух напряжений равновесного, зависящего только от объемной концентрации и диссипативного, зависящего от объемной концентрации и скорости деформации.

$$P = \alpha_0 + P^*(v, D);$$

где α_0 - равновесное напряжение, $P^*(v, D)$ - диссипативное напряжение.

Экспериментально установлено, что

$$\alpha_0 = -a_0 \frac{v - v_0}{v_\infty - v},$$

где v_0 - объемная минимальная концентрация, v_∞ - объемная предельная концентрация; a_0 - коэффициент.

Рассмотрим задачу истечения материала из бункера, совершающего вертикальные гармонические колебания по закону $\xi = \xi_0 \sin(\omega t)$, ω , ξ_0 - частота и амплитуда колебаний (рис.1). Систему отсчета (Ox_1x_2) свяжем с подвижным рабочим органом, тогда система уравнений (1) будет иметь вид:

$$\frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} = \frac{1}{v \rho_0} \left(\frac{\partial P_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial P_{12}}{\partial x_2} \right) - g + \ddot{\xi} - \frac{1}{v \rho_0} R_1;$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} = \frac{1}{v \rho_0} \left(\frac{\partial P_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial P_{22}}{\partial x_2} \right) - \frac{1}{v \rho_0} R_2;$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (v V_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial (v V_2)}{\partial x_2} = 0,$$

$$P_{11} = -a_0 \frac{v - v_0}{v_\infty - v} + \alpha_0' (D_{11} + D_{22}) + \alpha_0'' (D_{11} D_{22} - D_{12}^2) + \alpha_1 D_{11} + \alpha_1' (D_{11}^2 + D_{22} D_{11}) + \alpha_1'' (D_{11}^2 D_{22} - D_{11} D_{12}^2);$$

$$P_{12} = \alpha_1 D_{12} + \alpha_1' (D_{11} + D_{22}) D_{12} + \alpha_1'' (D_{11} D_{22} - D_{12}^2) D_{12};$$

$$P_{22} = -a_0 \frac{v - v_0}{v_\infty - v} + \alpha_0' (D_{11} + D_{22}) + \alpha_0'' (D_{11} D_{22} - D_{12}^2) + \alpha_1 D_{22} + \alpha_1' (D_{11} D_{22} + D_{22}^2) + \alpha_1'' (D_{11} D_{22}^2 - D_{22} D_{12}^2).$$

где V_1 и V_2 – проекции вектора скорости на оси Ox_1 и Ox_2 соответственно; g – ускорение свободного падения; $\ddot{\xi}$ – вибрационное ускорение; R_1 и R_2 – проекции аэродинамических сил.

Полученная система уравнений приводится к безразмерному виду и ее решение производится методом крупных частиц [10]. Он реализуется с помощью трехэтапного алгоритма, по которому на первом этапе система уравнений сначала интегрируется без учета конвективных слагаемых на Лагранжевой сетке. На втором этапе определяется количество перенесенного из ячейки в ячейку материала, а на третьем пересчитывается скорость в ячейках с учетом массопереноса.

Расчеты выполнялись на плоской расчетной сетке с размерами $\Delta x_1 \times \Delta x_2$, связанной с вибрирующим сосудом. На всех границах сосуда, кроме нижней (KL), задаются условия непротекания и неприлипания. В начальный момент времени материал расположен в верхней части сосуда ($ABCD$) и его объемная концентрация равна 0.51 (рис. 2).

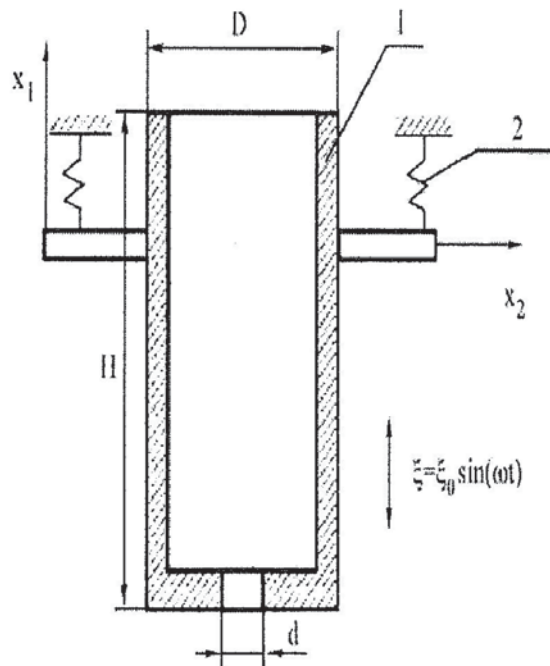


Рис.1. Вибробункер: 1-бункер; 2-упругие элементы

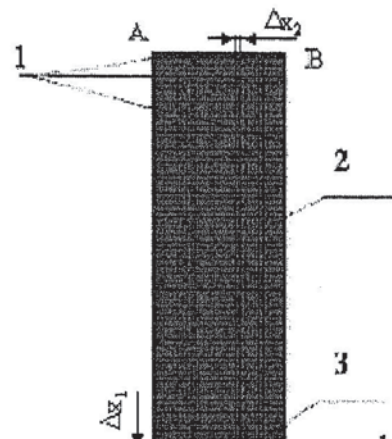


Рис.2. Расчетная схема: 1- внешние непротекающие границы; 2 –сыпучая среда; 3- внутренние непротекающие границы

Численное исследование процесса истечения сыпучего материала (кварцевого песка) из бункера размерами $H=0,8$ м на $D=0,3$ м, с выпускным отверстием в центре шириной $d=0,01$ м показали, что при гравитационном течении можно выделить: зону разрыхления материала, в которой наблюдаются медленное течение среды и постепенное нарастание скоростей; застойную зону, в которой материал неподвижен и зону активного течения, представляющую собой канал,

в котором истечение материала происходит из зоны, расположенной над выпускным отверстием. В этом канале наблюдаются максимальные значения скоростей (рис.3).

Для количественной оценки процесса истечения введем коэффициент заполнения материалом сосуда, который определялся по следующей формуле: $K_m = \frac{m}{m_0}$, где m – текущее значение массы материала в сосуде; m_0 – начальное значение массы материала в сосуде, и проведем сравнительный анализ гравитационного и вибрационного течения сыпучей.

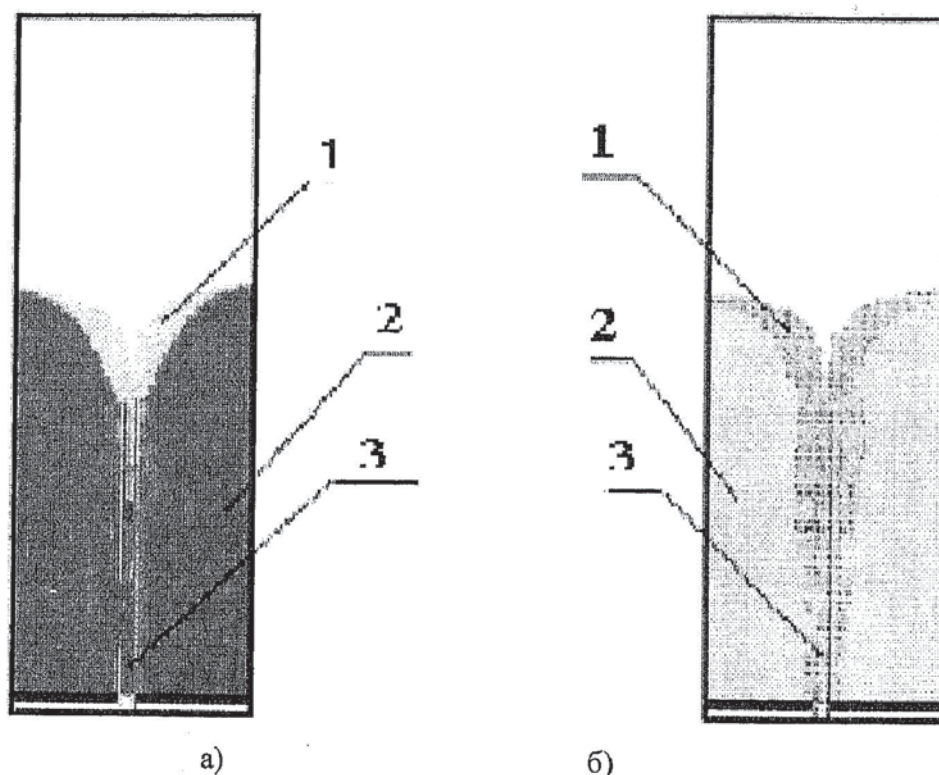


Рис. 3. Картины распределения значений скорости и плотности при гравитационном течении в момент времени $\tau = \omega t / 2\pi = 10$: а - плотность материала; б - скорость материала (1- зона разрыхления, 2 – застойная зона, 3 – зона активного течения)

Результаты расчетов, показывают, что при частотах $\omega = 250-314 \text{ с}^{-1}$ скорость истечения материала при вибрации больше, чем из неподвижного бункера. Однако с уменьшением частоты и ростом амплитуды колебаний график изменения коэффициента заполнения во времени приобретает ступенчатый характер. Объясняется это переходом материала в состояние вибрирующего слоя, при котором он начинает периодически отрываться от дна сосуда. В это время истечение материала не происходит, следовательно и коэффициент K_m не изменяется, а его график имеет ступенчатый вид (рис.3.). Наличие таких режимов позволяет осуществлять дискретную подачу материала из вибробункера с размером порции ΔK_m .

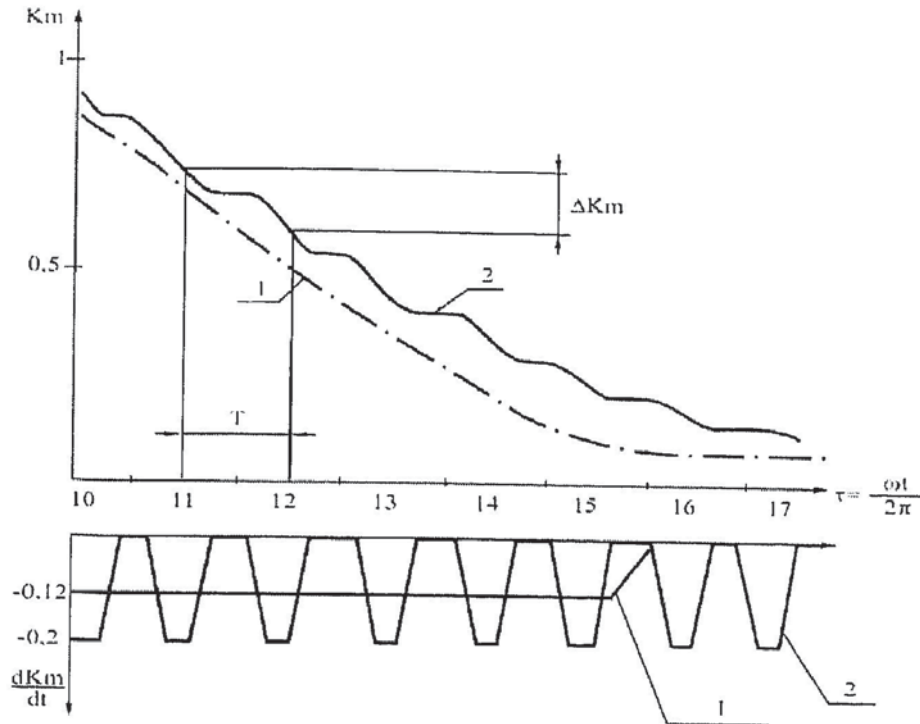


Рис. 3. Влияние параметров вибрации на коэффициент заполнения бункера (1 – гравитационное течение; 2 – дискретное вибрационное течение с отрывом от рабочего органа при $\omega = 125 \text{ с}^{-1}$, $\xi_0 = 0.0125 \text{ м}$, T – период колебаний, τ – безразмерное время)

ВЫВОДЫ

:

1. Предложена модель сыпучего материала в условиях вибрационного воздействия, построенная с использованием гипотезы сплошности и уравнений механики сплошной среды, позволяющая исследовать процессы течения при различных законах вибрации, определять мгновенные значения плотности, скорости и напряжения в каждой точке расчетной области.

2. Установлено, что в процессе гравитационного истечения сыпучей среды из бункера формируются три зоны: зона разрыхления, застойная зона, зона активного течения.

3. Выявлено, что производительность вибробункера нелинейно зависит от частоты и уровня виброускорения, при определенных значениях которых можно осуществлять дискретную подачу сыпучего материала с высокой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жермен П. Механика сплошной среды // П. Жермен, М.: Мир, 1981. - 399 с.
2. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. - М.: изд-во МГУ, 1978. - 287 с.

3. Механика гранулированных сред. Теория быстрых движений // Сб. статей. – М.: Мир, 1985. – 280 с.
4. Сафаров Д.И., Яцун С. Ф. Вибрационные технологические процессы очистки сточных вод – Баку: ЭЛМ, 2004.- 358с.
5. Локтионова, О.Г. Синтез оптимальных параметров вибрационного транспортирующего устройства сыпучих материалов//Известия вузов. Машиностроение. 2006.- № 9.- С.46-50.
6. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент.- М.: Наука, 1982.- 392 с.