

К расчету характеристик виброоживленного слоя сыпучего материала¹

И.А. Балагуров¹, М.А. Гриценко², В.Е. Мизонов¹, В.А. Огурцов²

¹ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

² ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: mizonov46@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При расчете и проектировании оборудования для вибрационной переработки сыпучих материалов, например грохотов для сортировки угля на электростанциях, смесителей для подготовки смесей при производстве композиционных материалов для энергетического машиностроения, важно знать состояние слоя материала при наложении вибрационного воздействия. Большинство моделей этого процесса оперирует движением одиночной частицы над колеблющейся поверхностью, что не вполне адекватно отражает все его особенности. В связи с этим актуальной является разработка моделей таких процессов, построенных на описании движения ансамбля частиц и учитывающих взаимодействие частиц друг с другом.

Материалы и методы: Для построения математического описания процесса применена одномерная версия метода дискретных элементов. Она базируется на динамическом описании движения каждой частицы ансамбля и изменении скоростей частиц при ударе друг о друга.

Результаты: Предлагается математическое описание простейшей одномерной версии метода дискретных элементов (DEM simulation). Приведены результаты численных экспериментов с соответствующей ей моделью. Выявлено влияние параметров колебания поверхности, коэффициента восстановления скорости при ударе и числа частиц по высоте слоя на локальную и среднюю порозность материала в слое.

Выводы: Уменьшение коэффициента восстановления и увеличение числа частиц в слое ведет к снижению его средней порозности, а увеличение числа Фруда – к ее увеличению. Количественные данные о средней порозности слоя позволяют более адекватно моделировать и рассчитывать процессы вибрационной сепарации и смешивания.

Ключевые слова: ансамбль частиц, вибрационное воздействие, число Фруда, метод дискретных элементов, порозность, численный эксперимент.

On calculation of characteristics of vibro-fluidized bed of granular material

I.A. Balagurov¹, M.A. Gritzenko², V.E. Mizonov¹, V.A. Ogurtsov²

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

² Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: mizonov46@mail.ru

Abstract

Background: The methods of calculation and design of equipment for vibration treatment of granular materials (for instance, screens for coal separation at thermal power plants, mixers for obtaining mixtures for production of composite material for energy machine building) require reliable knowledge on the state of material bed under application of vibration. The most of models of the process are based on the single particle motion above the vibrating surface that does not take into account all specific features of the process. This is why elaboration of models of such processes based on description of particle ensemble and taking into account particle-particle interaction is an actual problem.

Materials and methods: In order to build a mathematical description of the process a one-dimensional version of the discrete elements method is used. It is based on the dynamic description of each particle of ensemble and variation of particle velocity after particle-particle impact.

Results: The paper contains a mathematical description of the simplest one-dimensional version of discrete elements method (SEM simulation) and results of numerical experiments using a model corresponding to such method. Influence of the surface oscillation parameters, the restitution coefficient and the number of particles along the bed height on the local and average bed porosity is found.

Conclusions: Decrease of the restitution coefficient and increase of the number of particles lead to decrease of the average bed porosity while increase of the Froude number leads to its increase. The quantitative data on the average bed porosity allow more adequate modeling and calculation of the processes of vibration separation and mixing.

Key words: ensemble of particles, vibration action, Froude number, discrete elements method, porosity, numerical experiment.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.055-058

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №15-08-01684.

Объектом предлагаемого исследования является поведение ансамбля частиц над вибрирующей поверхностью. Решение этой задачи имеет важное значение для прогнозирования кинетики вибрационной переработки дисперсных материалов, например кинетики грохочения угля на электростанциях, кинетики формирования смесей разнородных порошков при производстве композиционных материалов в металлургии и других процессов.

В [1, 2] описаны модели взаимодействия одиночных частиц с вибрирующей поверхностью. Несмотря на определенную ценность полученных в них результатов, модель одиночной частицы является весьма приближенной. Она, в принципе, не позволяет учесть влияние на расширение слоя взаимодействия частиц друг с другом при их столкновениях, а следовательно, и рассчитать порозность слоя, которая оказывает ключевое влияние на кинетику протекающих в нем процессов. Для получения более глубокой информации о движении частиц в виброоживленном слое необходимо рассматривать поведение не отдельной частицы, а ансамбля частиц над вибрирующей поверхностью.

В последнее время все большее внимание в моделировании движения ансамбля частиц уделяется методу дискретных элементов (DEM simulation) [3–8]. Он основан на непосредственном численном интегрировании динамических уравнений движения каждой входящей в ансамбль частицы с учетом их взаимных столкновений. В зависимости от вычислительных возможностей применяемых средств вычислительной техники, модельному наблюдению могут подвергаться 10^5 и более частиц. Однако продолжительность расчета только одного режима виброоживления может занимать до нескольких дней, вследствие чего анализ чувствительности результатов к параметрам вибровоздействия и свойствам частиц на основе полной трехмерной версии этого метода становится проблематичным.

На наш взгляд, качественная оценка влияния параметров процесса на состояние слоя может быть выполнена на основе простейшей одномерной версии этого метода, требующей минимальных затрат машинного времени. Ниже приведено математическое описание этой версии и результаты численных экспериментов с соответствующей ей моделью.

Расчетная схема процесса показана на рис. 1. Твердая поверхность совершает гармонические колебания по закону

$$x_0(t) = A \sin \omega t, \quad (1)$$

где A и ω – амплитуда и частота колебаний.

В рассматриваемой задаче комплексной характеристикой интенсивности колебаний может служить число Фруда $Fr = A\omega^2/g$, где g – ускорение свободного падения.

Над поверхностью с возможностью свободного движения в вертикальном направлении движутся m шарообразных частиц радиуса r с координатами центров $y_j(t)$.

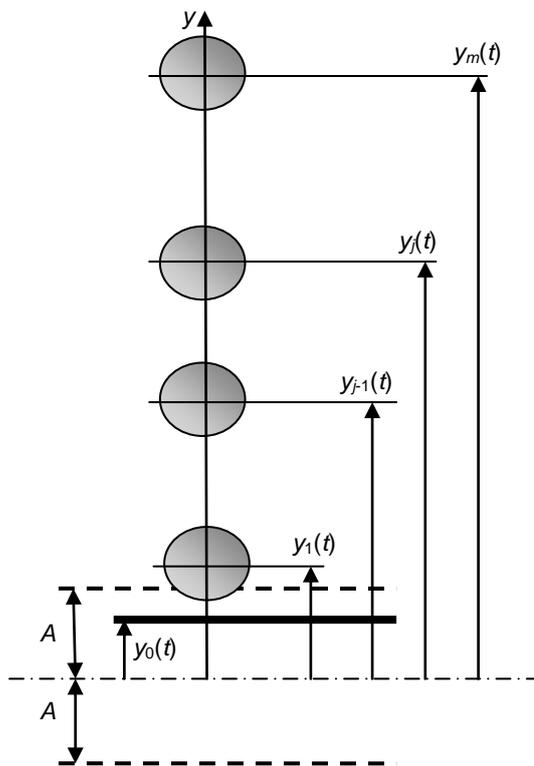


Рис. 1. Расчетная схема движения ансамбля частиц над вибрирующей поверхностью

Считается, что в промежутках времени между столкновениями частицы движутся по закону свободного падения в среде с сопротивлением. Простейшая разностная схема расчета этого движения имеет следующий вид:

$$v_j^{i+1} = v_j^i + (-g - \alpha(v_j^i)v_j^i)\Delta t; \quad (2)$$

$$y_j^{i+1} = y_j^i + v_j^i \Delta t, \quad (3)$$

где v – скорость частицы; $\alpha(v)$ – приведенный к единице массы частицы коэффициент аэродинамического сопротивления; Δt – шаг интегрирования по времени; i – номер шага.

На каждом временном шаге положения частиц проверяются на наличие или отсутствие удара. Соотношения удара рассчитываются различно для нижней частицы ($j = 1$) и остальных ($j = 2, \dots, m$) частиц.

Для $j = 1$:

если $y_1^{i+1} < y_0^{i+1} + r$, то

$$y_1^{i+1} := y_0^{i+1} + r, \quad (4)$$

$$v_1^{i+1} := -(v_1^{i+1} - v_0^{i+1})k_1 + v_0^{i+1}, \quad (5)$$

где k_1 – коэффициент восстановления скорости при ударе частицы о поверхность, $:=$ – оператор присваивания.

Для $j = 2, \dots, m$:

если $y_j^{k+1} < y_{j-1}^{k+1} + 2r$, то

$$y_j^{k+1} < y_{j-1}^{k+1} + 2r, \quad (6)$$

$$v_{j-1}^{i+1} := \frac{1-k}{2} v_{j-1}^{i+1} + \frac{1+k}{2} v_j^{i+1}, \quad (7)$$

$$v_j^{i+1} := \frac{1+k}{2} v_{j-1}^{i+1} + \frac{1-k}{2} v_j^{i+1}, \quad (8)$$

где k – коэффициент восстановления скорости при ударе частиц. Заметим, что формулы (7) и (8) справедливы только при одинаковой массе частиц.

Равенства (1)–(8) полностью описывают движение ансамбля частиц при принятых допущениях. В дальнейших численных экспериментах считается, что аэродинамическое сопротивление частиц оказывает малое влияние на их движение и в расчетах не учитывается.

На рис. 2 в качестве примера приведен график колебаний верхней границы слоя из пяти частиц. Ее положение оказывается случайным процессом, статистические характеристики которого выглядят довольно стабильными.

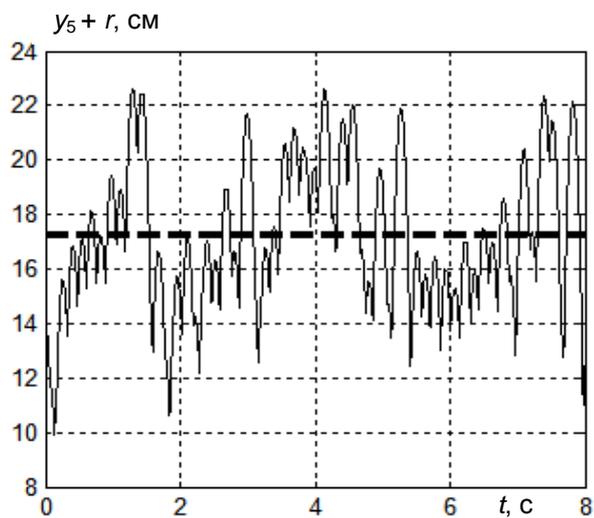


Рис. 2. Пульсации верхней границы ансамбля из 5-ти частиц ($k = 0,7$; $Fr = 2$; $A = 1$ см; ----- – средний уровень границы)

При расчете связанных с виброожидением процессов важной характеристикой слоя является величина его средней по высоте порозности – доли свободного пространства между частицами в объеме, ограниченном параллелепипедом с квадратным основанием размера $2r$. В рассматриваемой задаче она может быть рассчитана по формуле

$$\varepsilon^i = 1 - \frac{m\pi r}{3(y_m^i - y_1^i + 2r)}. \quad (9)$$

При плотном контакте частиц величина порозности не зависит от числа частиц и составляет $1 - \pi/6 \approx 0,477$. Естественно, что мгновенная порозность меняется вслед за колебаниями высоты слоя, но ее среднее значение ε_m за

достаточно большой промежуток времени остается постоянным.

На рис. 3 показано влияние коэффициента восстановления скорости на величину средней по времени порозности при различных значениях числа Фруда для слоя из шести частиц.

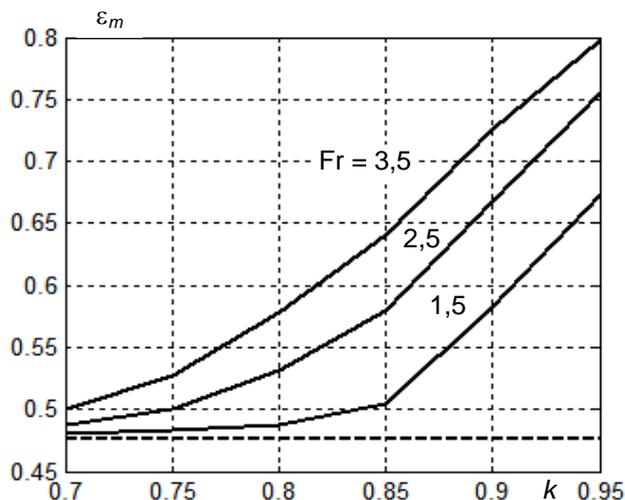


Рис. 3. Влияние коэффициента восстановления скорости на среднюю порозность слоя при различных значениях числа Фруда ($m = 6$; $A = 1$ см; ----- – порозность при плотном контакте)

При коэффициенте восстановления, приближающемся к 0,7, порозность слоя мало отличается от таковой при плотном контакте частиц при всех значениях числа Фруда. Это происходит потому, что энергия, передаваемая колеблющейся поверхностью нижней частице, при низком коэффициенте восстановления рассеивается при взаимных ударах частиц, высота слоя становится меньше, как и его порозность. С ростом интенсивности колебаний и коэффициента восстановления порозность увеличивается, но становится весьма чувствительной к этим параметрам.

По этой же причине рассеяние энергии должно увеличиваться с увеличением числа частиц в слое, т. е. его начальной высоты. На рис. 4 показано, как меняется порозность с увеличением числа частиц в слое при двух значениях числа Фруда. При $Fr = 2$ и $m = 8$ порозность фактически достигает предельной и все частицы колеблются как одно целое. Если необходимо увеличить порозность, то придется увеличивать число Фруда, т. е. интенсивность вибровоздействия.

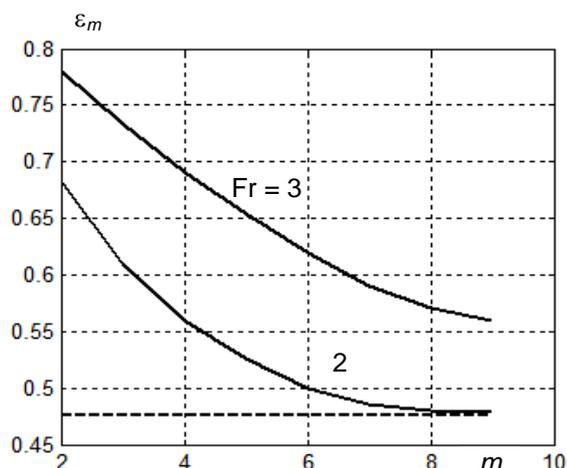


Рис. 4. Влияние числа частиц в слое на среднюю порозность при различных значениях числа Фруда ($k = 0,7$; $A = 1$ см; ---- – порозность при плотном контакте)

Представленная модель не претендует на точное количественное описание состояния виброоживленного слоя, но позволяет выявить тенденции его изменения при изменении параметров вибровоздействия и числа и свойств частиц.

Список литературы

1. Огурцов В.А., Мизонов В.Е., Федосов С.В. Расчетное исследование движения частиц по поверхности виброгрохота // Строительные материалы. – 2008. – № 6. – С. 74–75.
2. Огурцов В.А., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Моделирование движения частицы по продольно колеблющейся поверхности грохота // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 2. – С. 23–24.
3. Paulick, M., Morgeneyer, M., Kwade, A. Review on the influence of elastic particle properties on DEM simulation results // Powder Technology. – 2015. – Vol. 283. – P. 66–76.
4. Jahani M, Farzanegan A., Noaparast M. Investigation of screening performance of banana screens using

LIGGGHTS DEM solver // Powder Technology. – 2015. – Vol. 283. – P. 32–47.

5. Chen Y., Tong X. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM3D simulation // Mining Science and Technology. – 2010. – Vol. 20, issue 4. – P. 615–620.

6. Zhao L., Zhao Y., Liu C., Li J., Dong H. Simulation of screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM // Mining Science and Technology. – 2011. – Vol. 21, issue 5. – P. 677–680.

7. Chen Y., Tong X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation // Mining Science and Technology. – 2009. – Vol. 19, issue 4. – P. 493–497.

8. Webb J., Li C., Pandiella S.S., Campbell G.M. Discrete particle motion on sieves – a numerical study using the DEM simulation // Powder Technology. – 2003. – Vol. 133, issues 1–3. – P. 190–202.

References

1. Ogurtsov, V.A., Mizonov, V.E., Fedosov, S.V. Raschetnoe issledovanie dvizhenie chastits po poverkhnosti vibrogrokhota [Computational investigation of particles motion on a vibro-screen surface]. *Stroitel'nye materialy*, 2008, no. 6, pp. 74–75.

2. Ogurtsov, V.A., Fedosov, S.V., Mizonov, V.E. Modelirovanie dvizheniya chastitsy po prodol'no koleblyushchey-sya poverkhnosti grokhota [Modeling of particle motion on a longwise oscillating surface of a screen]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2009, no. 2, pp. 23–24.

3. Paulick, M., Morgeneyer, M., Kwade, A. Review on the influence of elastic particle properties on DEM simulation results. *Powder Technology*, 2015, vol. 283, pp. 66–76.

4. Jahani, M., Farzanegan, A., Noaparast, M. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver. *Powder Technology*, 2015, vol. 283, pp. 32–47.

5. Chen, Y., Tong, X. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM3D simulation. *Mining Science and Technology*, 2010, vol. 20, issue 4, pp. 615–620.

6. Zhao, L., Zhao, Y., Liu, C., Li, J., Dong, H. Simulation of screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM. *Mining Science and Technology*, 2011, vol. 21, issue 5, pp. 677–680.

7. Chen, Y., Tong, X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. *Mining Science and Technology*, 2009, vol. 19, issue 4, pp. 493–497.

8. Webb, J., Li, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M. Discrete particle motion on sieves – a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technology*, 2003, vol. 133, issues 1–3, pp. 190–202.

Балагуров Иван Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры прикладной математики, e-mail: knight_90@bk.ru

Гриценко Михаил Алексеевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет», аспирант кафедры технологии строительного производства, e-mail: assasin-sunn@mail.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, e-mail: mizonov46@mail.ru

Огурцов Валерий Альбертович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии строительного производства, e-mail: ogurtzovvawork@mail.ru