

Р.С. Козлов, П.А. Иванов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ БЫСТРОМ СДВИГЕ

Быстрые гравитационные потоки зернистых материалов являются широко распространенным типом быстрых сдвиговых потоков, имеющих место во множестве природных явлений и технологических процессах. Однако до настоящего времени адекватное описание параметров быстрых гравитационных потоков затруднено по причине множества экспериментальных и аналитических проблем.

Исследование быстрых сдвиговых потоков относится к области механики сыпучих сред. Быстрые сдвиговые течения часто называют инерционными, поскольку их закономерности определяются, в основном, инерцией и взаимными соударениями частиц.

Комплексную информацию о динамике течения зернистых сред позволяет получить экспериментально-аналитический метод [1, 3].

Данный метод основывается на анализе фазы свободного падения частиц, покидающих порог ссыпания шероховатого ската, и характеризуется простотой эксперимента и достаточно высокой точностью определения исходных данных для аналитического расчета параметров структуры гравитационного потока зернистого материала.

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой наклонный шероховатый скат 1 прямоугольного сечения и кювету 3, разделенную перегородками 4 на ячейки.

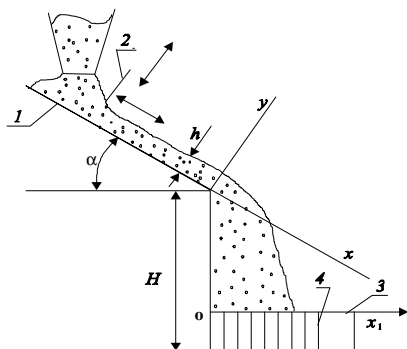


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Кювета, предназначенная для сбора вылетающих из канала частиц, устанавливается по отвесу на некотором расстоянии от порога ссыпания. Для регулирования толщины и длины скатывающегося слоя зернистого материала в канале закреплена с возможностью перемещения ограничительная планка 2. На дне канала расположена шероховатая пластина, имеющая шероховатость, равную половине диаметра частиц исследуемого материала, для обеспечения условия прилипания частиц [2].

Аналитическая часть метода заключается в определении профилей скорости $u(y)$ и порозности $\varepsilon(y)$ в слое частиц с учетом взаимосвязи между локальными значениями порозности слоя $\varepsilon(y)$, скорости сдвига du/dy , модуля скорости $u(y)$ и распределения частиц по горизонтальной координате $G(x_1)$. Уравнения, связывающие модуль скорости $u(y)$ и порозность слоя $\varepsilon(y)$ в быстром гравитационном потоке зернистого материала на шероховатом скате, формулируются следующим образом:

$$|\bar{u}| = \frac{x_1 - y \sin \alpha}{\cos \alpha \sqrt{(H + y \cos \alpha - (x_1 - y \sin \alpha) \operatorname{tg} \alpha) 2 / g}}; \quad (1)$$

$$u(y, x_1) \rho (1 - \varepsilon(y)) = G(x_1). \quad (2)$$

Используя гипотезу об аналогии между параметрами зернистого материала при быстром сдвиге и соответствующими параметрами плотного газа получают следующее уравнение состояния зернистой среды:

$$p \bar{\varepsilon} = \chi \frac{1}{2} \rho \left[(bd)^2 + \frac{1}{2} s \mu b d + \mu^2 (bd)^2 \right] \left(\frac{du}{dy} \right)^2 (1 - e_c), \quad (3)$$

где d – диаметр частиц; $p(y)$ – аналог гидростатического давления; $\bar{\epsilon}(y)$ – дилатансия слоя; χ – коэффициент уравнения состояния зернистой среды; ρ – плотность частиц; b – геометрический параметр; s – среднее расстояние между частицами; du/dy – скорость сдвига; e_c – доля кинетической энергии, диссипируемой при столкновении частиц. Доля энергии диссипируемой при столкновении частиц [1], определяется как функция физико-механических свойств материала с использованием следующей зависимости:

$$e_c \approx (1-k)^2 + \frac{2}{\pi} \mu(1+k) + 0,5\lambda - 0,125\mu^2(1+k)^2 - \frac{2}{3}\lambda\mu(k+1) - 0,125\lambda^2, \quad (4)$$

где k – коэффициент восстановления; λ – коэффициент редукии касательной составляющей ударного импульса; μ – коэффициент трения.

Одним из важнейших параметров, позволяющих оценить структуру потока, является коэффициент уравнения состояния зернистой среды при быстром сдвиге χ . Он показывает зависимость между работой на дилатансию и «температурой» зернистой среды. В случае, если все составляющие уравнения учтены правильно, коэффициент $\chi = 1$. Были проведены исследования зависимости коэффициента χ от технологических характеристик гравитационного потока (угол наклона α , высота слоя h) экспериментально-аналитическим методом. В качестве модельного материала были выбраны керамические шары (табл. 1). В качестве подложки наклонного ската использовалась деревянная шероховатая подложка с шероховатостью, равной половине диаметра частицы. При этом варьировались такие параметры, как угол наклонного ската α и высота слоя материала на пороге ссыпания h .

На рисунке 2 приведены результаты исследования коэффициента χ как функции относительной высоты слоя h/d на шероховатом скате в режиме установившегося развитого гравитационного течения для различных углов наклона.

1. Характеристики модельного материала

Материал	Диаметр частиц d , 10^{-3} м	Угол откоса α_0 , град	Плотность материала ρ , кг/см ³	Порозность ϵ_0 , м ³ /м ³	Коэффициенты		
					трения μ	редукции скорости λ	восстановления k
Керамические шары	6,6	36	2086	0,41	0,44	0,57	0,67

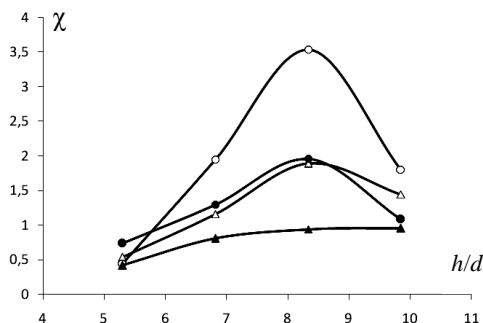


Рис. 2. График зависимости коэффициента χ от высоты слоя h/d :
 —○— $\alpha = 36^\circ$; —●— $\alpha = 37^\circ$; —△— $\alpha = 38^\circ$; —▲— $\alpha = 40^\circ$

Характер кривых достаточно сложен и требует дополнительного анализа. Обращает на себя внимание тот факт, что на тонких слоях ($h/d \approx 5$) значения коэффициента сопоставимы для различных углов наклона ската, что может свидетельствовать о том, что при данных относительных толщинах слоя частицы имеют сходную высокую интенсивность взаимного перемещения друг относительно друга. При увеличении относительной толщины слоя при большем угле наблюдается большое хаотическое взаимное перемещение частиц, что приводит к приближению значения коэффициента к единице. При относительной толщине слоя ($h/d \approx 10$) начинается режим проскальзывания, в результате резко меняется структура потока, что приводит к резкому изменению значения коэффициента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгунин, В.Н. Феноменологический анализ взаимодействия неэластичных не связанных частиц в быстром гравитационном потоке / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – Т. 42, № 3. – С. 343 – 347.
2. Долгунин, В.Н. Взаимодействие неэластичных несвязных частиц сферической формы в быстром сдвиговом потоке зернистой среды / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности : сб. трудов первой международной науч.-практ. конф. – СПб., 2005. – Т. 1. – С. 104–105.
3. Долгунин, В.Н. Экспериментальные и аналитические исследования быстрых гравитационных потоков зернистых материалов / В.Н. Долгунин, В.Я. Борщев, А.М. Климов // 4-th World Congress of Particle Technology, Full text of paper in CD-Rom, Sydney, Australia, 2002.

Кафедра «Технологии продуктов питания» ГОУ ВПО ТГТУ