

УДК 532.545

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОТОКА ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ШЕРОХОВАТОМ СКАТЕ

© В.Я. Борщев, В.Н. Долгунин, П.А. Иванов

Borshchev V.Y., Dolgunin V.N., Ivanov P.A. The research on structural and kinematic characteristics of rapid gravity flows of particulate solids on a rough chute. The behaviour of rapid gravity flows of particulate solids was investigated by means of X-Ray photography and the experimental and analytical method. It was found out that the profiles of solid phase concentration have maximum values in the central part of the bed.

Быстрые гравитационные потоки зернистых материалов являются широко распространенным типом быстрых сдвиговых потоков, имеющих место как в природных явлениях, так и в технологических процессах. Данные течения являются чрезвычайно сложными объектами для изучения, что обусловлено, в первую очередь, отсутствием достаточно надежных методов экспериментального исследования. Наибольшей надежностью среди известных методов экспериментального исследования быстрых гравитационных течений на шероховатом скате характеризуются, так называемые, бесконтактные методы, основывающиеся на использовании различных видов проникающих излучений.

Ранее [1] разработан метод бесконтактного измерения концентрации твердой фазы по высоте потока зернистой среды, базирующийся на применении проникающего рентгеновского излучения и фиксации его на рентгеновской пленке. Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей быстрого гравитационного течения зернистого материала с использованием указанного метода. Объектами исследования являются быстрые гравитационные течения несвязных зернистых материалов, состоящих из частиц, близких по форме к сферическим.

В качестве модельного материала использованы керамические частицы, являющиеся предпочтительными для исследования в связи со стабильностью их свойств во времени и высокой однородностью по размеру, плотности и форме, близкой к сферической. Такие свойства модельного материала позволяют практически исключить влияние эффектов сегрегации на динамику гравитационного потока. Кроме того, относительно высокая проникаемость материала для рентгеновских лучей делает возможным проведение рентгеновского исследования потоков в желобе достаточно большой ширины, при которой краевые эффекты на боковых стенках становятся пренебрежимо малыми.

Исследования проведены на экспериментальной установке [1] в диапазоне углов ската, при которых имеют место быстрые установившиеся гравитационные течения материала в толщинах слоя, равных  $4 \div 6$  диаметрам частиц. В каждом опыте профиль порозности

строился с использованием двух методов его определения:

- 1) рентгеновского исследования [1];
- 2) экспериментально-аналитического исследования [2].

Метод экспериментального измерения концентрации твердой фазы в гравитационном потоке зернистой среды, основанный на применении проникающего рентгеновского излучения, состоит из нескольких этапов. Основными из этих этапов являются [1]: получение рентгенограммы, общей для потока и контрольных образцов; оцифровка полученной рентгенограммы сканированием; получение тарировочной зависимости для порозности, как функции световой плотности рентгенограммы с использованием ПЭВМ и определение значений порозности на различных высотах слоя.

Экспериментально-аналитический метод [2] 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 часть метода [2] заключается в ссыпании зернистого материала в режиме установившегося гравитационного течения по наклонному каналу и сборе материала в кювете с ячейками. Содержимое ячеек взвешивается, и по результатам взвешивания определяется функция распределения массы материала  $G(x_1)$  в направлении оси  $0x_1$ . Кроме того, в соответствии с этим методом определяются следующие экспериментальные данные: высота слоя  $h$  на пороге ссыпания, время ссыпания  $t$ , расстояние  $H$  между порогом ссыпания и кюветой и угол наклона канала  $\alpha$ .

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 распределением 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 [2] следующим образом:

$$|\bar{u}| = \frac{x_1 - y \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha \sqrt{(H + y \cdot \cos \alpha - (x_1 - y \cdot \sin \alpha) \tan \alpha)^2 / g}}, \quad (1)$$

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

Используя гипотезу [2] об аналогии между параметрами зернистого материала при быстром сдвиге и соответствующими параметрами плотного газа, получено [3] следующее уравнение состояния зернистой среды:

$$p(y) \cdot \bar{\varepsilon}(y) = \chi \left( \frac{du}{dy} \right)^2, \quad (3)$$

где  $p(y) = \int_{h-y}^h \rho^*(y) g \cos \alpha dy$  – аналог гидростатического давления;

$\bar{\varepsilon}(y) = \frac{\varepsilon(y) - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon(y)}$  – дилатансия слоя.

Уравнения (1)–(3) образуют замкнутую систему относительно функций  $u(y)$ ,  $y(x_1)$ ,  $\varepsilon(y)$  и  $p(y)$ . В результате решения этой системы уравнений методом последовательных приближений получают профили скорости  $u(y)$  и порозности  $\varepsilon(y)$ .

На рисунках 1–4 представлены результаты экспериментального исследования, которые позволяют оценить прогностические свойства экспериментально-аналитического метода и сделать выводы об его адекватности. Анализ приведенных результатов показывает, что при всех углах наклона ската профили порозности имеют S-образную форму с максимальной концентрацией твердой фазы в центральной части слоя.

В соответствии с полученными рентгенограммами профиль порозности в центральной наиболее плотной части имеет зигзагообразный характер. При этом расстояние между выступами и впадинами зигзагов может быть определено в виде функции порозности  $\varepsilon$  и диаметра частиц  $d$ , как  $bd = \sqrt[3]{\pi / (6 \cdot (1 - \varepsilon))} \cdot d$ . Это может служить дополнительным подтверждением того, что частицы движутся в этой части потока преимущественно в режиме сдвига по элементарным слоям.

Судя по полученным результатам, такой режим течения зернистой среды наблюдается в областях потока с пониженными значениями порозности, меньшими ~0,75, что находится в соответствии с теоретическими прогнозами, сделанными ранее в работе [4]. Кроме того, приведенные результаты позволяют сделать предположение о том, что с увеличением угла ската регулярная структура расположения частиц в гравитационном потоке сменяется хаотической, что должно сопровождаться усилением эффектов перемешивания. На это указывает тот факт, что с увеличения угла на-

клона ската зигзаги на профилях порозности значительно уменьшаются. При увеличении же градиентов концентрации твердой фазы такие изменения в структуре потока должны приводить к возрастанию эффекта миграции неоднородных частиц.

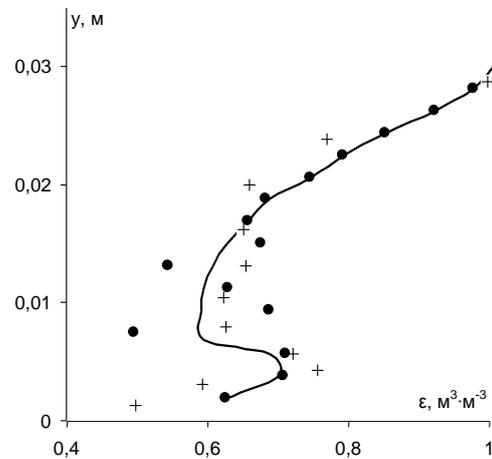


Рис. 1. Профили порозности для потока керамических частиц на шероховатом скате при  $h = 32$  мм,  $\alpha = 34^\circ$ , полученных: ● – рентгенографическим методом; + – экспериментально-аналитическим методом

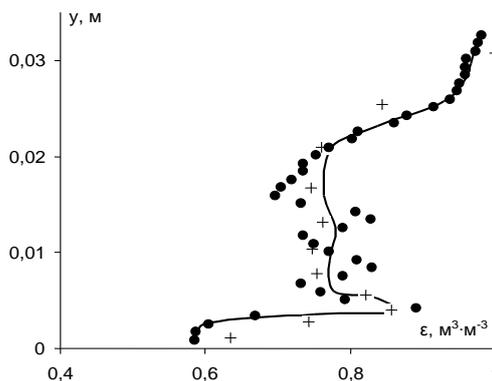


Рис. 2. Профили порозности для потока керамических частиц на шероховатом скате при  $h = 34$  мм,  $\alpha = 35^\circ$ , полученных: ● – рентгенографическим методом; + – экспериментально-аналитическим методом

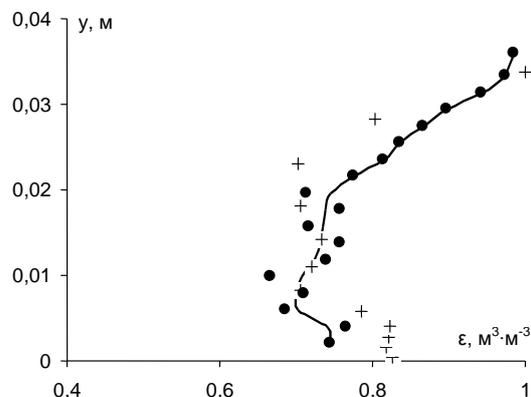
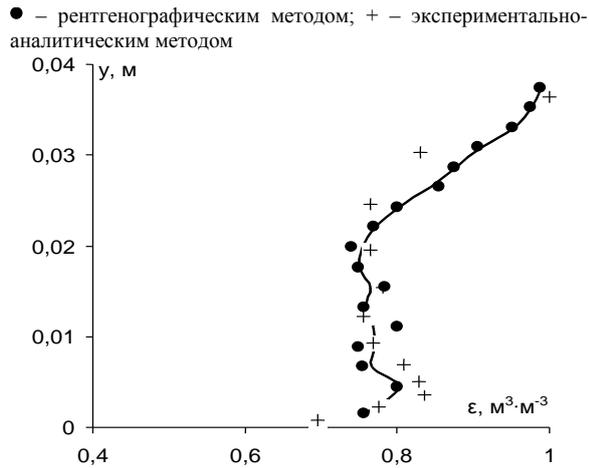


Рис. 3. Профили порозности для потока керамических частиц на шероховатом скате при  $h = 39$  мм,  $\alpha = 38^\circ$ , полученных:



**Рис. 4.** Профили порозности для потока керамических частиц на шероховатом скате при  $h = 41$  мм,  $\alpha = 41^\circ$ , полученных: ● – рентгенографическим методом; + – экспериментально-аналитическим методом

Адекватность экспериментально-аналитического метода проверена путем статистической оценки степени расхождения результатов определения профилей порозности, полученных с его использованием, и аналогичных результатов, выявленных рентгенографическим методом.

В результате статистической обработки результатов исследований, представленных на рисунках 1–4, установлено, что экспериментально-аналитический метод обеспечивает возможность достаточно адекватного определения профилей порозности в быстром гравитационном потоке зернистого материала на шероховатом скате. Относительная среднеквадратичная погрешность определения порозности с использованием экспериментально-аналитического метода не превышала 5 процентов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борцев В.Я., Долгунин В.Н., Иванов П.А. Разработка метода бесконтактного измерения концентрации твердой фазы в быстром сдвиговом потоке зернистой среды // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. Тамбов, 2001. Т. 6. Вып. 4. С. 428-430.
2. Dolgunin V.N. and Ukolov A.A. // Powder Technology. 1995. V. 83. P. 95.
3. Dolgunin V.N., Borschov V.J., Ivanov P.A. / H. Kalman, A. Levy and M. Hubert (eds.) // The 3rd Israel Conference for conveying and handling of particulate solids. 2000. V. 2. The Dead Sea, Israel. P. 11.33-11.37.
4. Долгунин В.Н., Уколов А.А., Класен П.В. Модель механизма сегрегации при быстром гравитационном течении частиц // ТОХТ. 1992. Т. 26. № 25. С. 707-716.

Поступила в редакцию 15 апреля 2004 г.