УДК 532.545

РАЗРАБОТКА МЕТОДА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ В БЫСТРОМ СДВИГОВОМ ПОТОКЕ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ

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

Borshchov V.Y., Dolgunin V.N., Ivanov P.A. The development of an experimental method of non-contact measurement of solid phase concentration in rapid gravity flow of grainy medium. The article proposes an experimental method of non-contact measurement of concentration profiles during rapid gravity flow of grainy medium. The solid phase concentration is determined by means of X-ray photography. In order to increase its accuracy the method provides simultaneous X-ray examination of both particulate solids distribution in the flow and control samples fixing the concentration of particles by means common X-ray radiogram. This approach allows obtaining a correct correlation function between the solid phase concentration and the light permeability of the radiogram.

Быстрые гравитационные течения зернистых материалов являются чрезвычайно сложными объектами для изучения, что связано, в первую очередь, с отсутствием достаточно надежных методов экспериментального исследования. Известные методы исследования динамики быстрых гравитационных течений зернистых материалов можно разделить условно на две группы: с применением зондов и беззондовые методы [1]. Вследствие того, что гравитационный поток зернистого материала характеризуется активной реакцией на малейшее внешнее возмущение, использование зондовых методов приводит к существенному искажению результатов. Это связано с тем, что контакт зондов или пробоотборников, даже с отдельными частицами потока, вызывает значительные нарушения его структуры по аналогии с механизмом цепной реакции. Особенно это касается тонких слоев, толщиной в 5–15 диаметров частиц.

Беззондовые методы, в основном, заключаются в наблюдении сдвигового потока через прозрачные боковые стенки канала. При этом регистрацию результатов наблюдений осуществляют либо визуально, либо с помощью скоростной киносъемки, либо с помощью волоконно-оптической техники [1]. Эти методы позволяют получить информацию о структуре потока зернистого материала в непосредственной близости к боковым стенкам канала. Очевидно, что полученные в результате данные по структурным и кинематическим характеристикам зернистой среды нельзя считать справедливыми для потока в целом. Это объясняется нарушением структуры потока у боковых стенок каналов вследствие проявления в этой области пристенных эффектов. В связи с этим традиционные беззондовые методы не позволяют получить достаточно адекватную информацию о параметрах потока зернистой среды.

Среди методов исследования динамики быстрых сдвиговых потоков достойное место занимают методы, основанные на анализе фазы свободного падения частиц. Данные методы отличаются простотой эксперимента и достаточно высокой точностью определения параметров структуры потока зернистой среды. Комплексную информацию о динамике течения зернистой среды позволяет получить относящийся к этой группе экспериментально-аналитический метод [2]. Однако такого рода методы предполагают использование постулатов, касающихся взаимосвязи структурных и кинематических параметров сдвигового потока. При этом, очевидно, остается необходимость прямой экспериментальной проверки адекватности принятых в постулате допущений.

В последнее время предпринимаются попытки разработки методов прямого измерения параметров сдвигового потока зернистой среды с использованием различных видов излучений. В литературе приводятся данные по использованию для этих целей ультразвукового луча [3], гамма-лучевой томографии [4] и СВЧ–излучения [5]. Однако до настоящего времени ни один из предложенных методов не позволяет получить надежных и достоверных данных о параметрах потока зернистой среды.

Настоящая работа посвящена разработке метода бесконтактного исследования распределения частиц твердой фазы в быстром сдвиговом потоке зернистой среды и экспериментальному исследованию концентрационных профилей распределения частиц зернистого материала при его гравитационном течении по шероховатому скату.

Предложенный метод прямого бесконтактного измерения концентрации твердой фазы по высоте потока зернистой среды основывается на применении проницающего рентгеновского излучения и фиксировании его на рентгеновской пленке. Отличительной особенностью метода является использование единой рентгенограммы для оценки рентгеновской проницаемости потока зернистой среды и ее контрольных образцов. Такой подход позволяет существенно повысить точность рентгеновского анализа, вследствие снижения случайных погрешностей, которые имеют место по причине различных свойств пленки, времени экспонирования и условий проявки.

Предложенный метод реализован на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из наклонного канала прямоугольного сечения 1 и бункера для зернистого материала 2, выходное отверстие которого закрывает шибер 3. На дне канала закреплена скатная доска 4. В стенках канала в непосредственной близости от порога ссыпания имеются окна 5, закрытые органическим стеклом – материалом, являющимся практически абсолютно прозрачным для рентгеновского излучения.

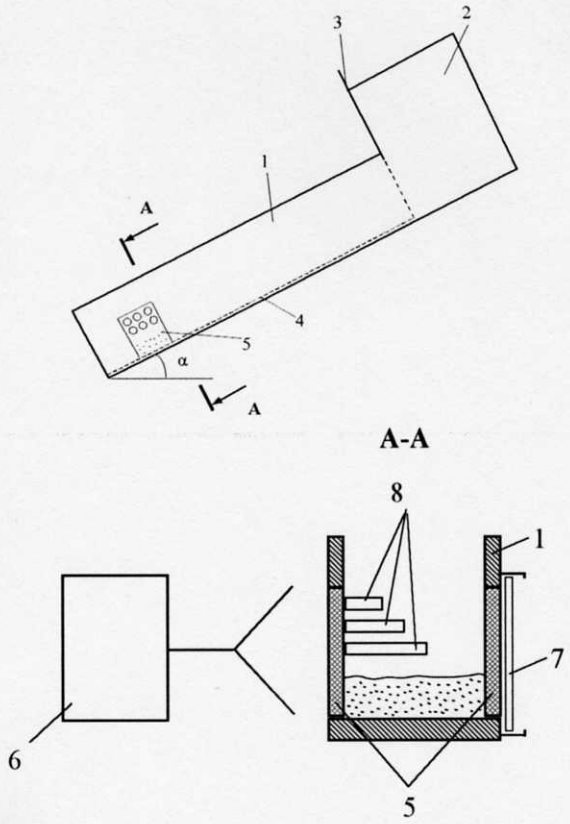


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Со стороны одного из окон установлен источник рентгеновского излучения 6 (в нашем случае – рентгеновский импульсный аппарат МИРА – 2Д), а напротив другого окна – кассета 7 с рентгеновской пленкой.

Метод экспериментального измерения концентрации твердой фазы в быстром сдвиговом потоке зернистой среды состоит из нескольких этапов. Первоначально проводится настройка экспериментальной установки с целью определения времени достижения стационарного режима течения зернистой среды на пороге ссыпания от момента начала дозирования исследуемого материала в канале. После этого осуществляется подготовка рентгеновской установки к работе, заключающаяся в определении оптимального времени экспонирования с целью получения контрастного снимка потока зернистой среды.

Затем выполняется основной этап экспериментальных исследований – рентгеноскопический анализ потока зернистого материала и контрольных образцов с фиксированной концентрацией твердой фазы.

Измерения концентрации твердой фазы в быстром сдвиговом потоке зернистой среды проводятся следующим образом.

Канал 1 устанавливается под углом к горизонту, близким к углу естественного откоса зернистого материала (для установившегося развитого гравитационного течения). Внутри канала на стекле со стороны источника рентгеновского излучения 6 помещают образцы исследуемого материала 8 (см. рис. 1), имеющие фиксированную концентрацию твердой фазы. В бункер 2 в необходимом количестве засыпают исследуемый зернистый материал. Затем шибер, закрывающий вы ходное отверстие бункера, автоматически открывается,

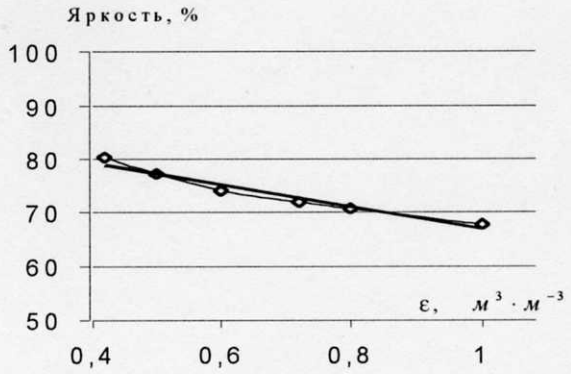


Рис. 2. Тарировочная кривая

и исследуемый материал в необходимом количестве поступает в канал. Спустя определенное время, необходимое для достижения стационарного режима течения зернистой среды, включается на 1–2 с источник рентгеновского излучения. Проницающее излучение, проходящее сквозь поток зернистого материала, фиксируют на рентгеновской пленке. Затем рентгеновскую пленку проявляют, полученную рентгенограмму сканируют и переводят имеющуюся на ней световую информацию в цифровую.

Сначала обрабатывается рентгенограмма контрольных образцов с фиксированной концентрацией твердой фазы. По результатом ее обработки строится тарировочная кривая в виде корреляционной зависимости между световой плотностью снимка и либо объемной концентрацией твердой фазы, либо порозностью (ε, $м^3 \cdot м^{-3}$) (рис. 2).

Далее в результате обработки рентгенограммы потока зернистой среды определяется функция изменения световой плотности снимка по высоте движущегося слоя. С помощью тарировочной кривой на основе полученной функции определяется изменение локальных значений порозности (концентрации) по высоте потока зернистого материала.

При реализации метода обнаружилась проблема изготовления достаточно однородных контрольных образцов с фиксированной концентрацией твердой фазы.

В связи с этим при изготовлении образцов было сделано допущение, что интенсивность проницающего рентгеновского излучения одинакова для случаев рентгеноскопии слоя зернистого материала и монолитного образца соответствующей толщины, изготовленного из того же материала. В соответствии с этим толщина монолитного образца определена, исходя из условия, что твердая фаза занимает часть слоя зернистого материала, равную объемной концентрации твердой фазы.

Правомерность сделанного допущения проверена экспериментальным путем. Для этого на одной и той же рентгеновской пленке получены рентгенограммы неподвижного слоя и монолитного образца, имеющие одинаковую концентрацию твердой фазы (в нашем случае 0,58 $м^3/м^3$). В результате обработки рентгенограмм слоя и образца установлено, что их световую плотность можно считать одинаковой с погрешностью ±3 %.

Разработанный метод измерения концентрации в потоке зернистой среды использован для тестирования прогностических свойств экспериментально-аналити-ческого метода исследования параметров гравитационного течения зернистого материала на шероховатом скате.

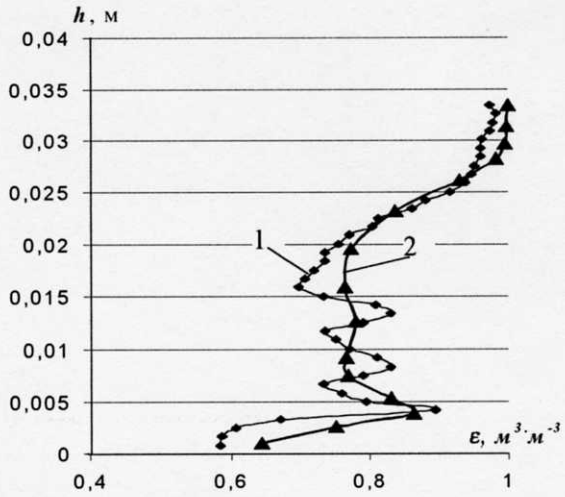


Рис. 3. Профили локальных концентраций твердой фазы по высоте потока зернистого материала

В качестве модельного материала использованы керамические сферические частицы диаметром $6{,}6 \cdot 10^{-3}$ м. В результате проведенного исследования с использованием предложенного метода получены профили порозности для режима установившегося развитого гравитационного течения зернистой среды (кривая 1, рис. 3). Сравнение полученных профилей с результатами, прогнозируемыми экспериментально-аналитическим методом [2] (кривая 2, рис. 3), свидетельствует об удовлетворительной их адекватности.

Кроме того, результаты измерения, полученные с использованием предложенного способа, можно рассматривать как достаточно убедительное экспериментальное подтверждение неординарного свойства гравитационного потока, состоящего в наличии разреженной зоны вблизи нижней границы слоя. Существование такой зоны в гравитационном потоке подтверждалось, в основном, косвенными методами.

Таким образом, разработан метод прямого бесконтактного измерения локальных значений концентраций твердой фазы в быстром сдвиговом потоке зернистой среды, позволяющий получить соответствующие профили распределения частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Механика гранулированных сред. Теория быстрых движений: Сб. статей. Пер. с англ. / Сост. И.В. Ширко. М.: Мир, 1985. 289 с.
2. *Dolgunin V.N., Ukolov A.A.* Segregation modeling of particle rapid gravity flow // Powder technology. 1995. V. 83. P. 95-103.
3. On-line measurement of pulverised coal mass flow using an ultrasonic technique // M.J. Millen, B.D. Sowerby, D.A. Abemethy, R. Kingsiey and C. Grima / Powder technology, 1997.
4. *Langston P.A., Nikitidis M.S., Tüzün U. & Heyes D.M.*. Tomographic measurement and distinct element simulations of binary granular flow voidage // World Congress on Particle Technology 3. Brighton, UK. 1998.
5. *Иванов П.А., Борщев В.Я., Малков Н.А., Нечаев В.М.*. К исследованию динамики быстрых гравитационных течений зернистых сред: Труды ТГТУ. Тамбов: ТГТУ, 1999. С. 14-17.

Поступила в редакцию 25 октября 2001 г.