

УДК 532.545

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
БЫСТРОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ**

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

Кафедра "Технологическое оборудование и прогрессивные технологии", ТГТУ

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: быстрое гравитационное течение; зернистая среда; концентрация твердой фазы; рентгенография; уравнение состояния.

Аннотация: Проведен экспериментальный анализ уравнения состояния зернистой среды, устанавливающего аналогию между зернистой средой при быстром сдвиге и плотным газом. Обнаружен универсальный характер этого уравнения. Разработан метод бесконтактного измерения концентрации твердой фазы в быстром сдвиговом потоке зернистой среды с использованием рентгеновского излучения. Проведена апробация метода в условиях быстрого гравитационного течения зернистой среды, которая позволила подтвердить неординарные свойства гравитационного потока на шероховатом скате, наличие которых доказывалась ранее только косвенными методами.

Технологические процессы в барабанных аппаратах, реакторах, адсорберах с движущимся слоем часто сопровождаются быстрыми гравитационными течениями зернистых сред. Динамика этих течений может существенно влиять на протекание технологических процессов. Данное влияние может выражаться в воздействии на интенсивность тепло- и массообменных процессов, а также в перераспределении частиц при их взаимодействии с образованием зон сегрегации. Очевидно, что адекватное описание кинетики технологических процессов и эффектов сегрегации в гравитационных потоках зернистых сред невозможно без умения прогнозировать профили скорости и концентрации твердой фазы в них. Однако до настоящего времени имеются серьезные проблемы аналитического и экспериментального характера, препятствующие адекватному моделированию динамики быстрых гравитационных течений. Трудности экспериментального исследования обусловлены, в первую очередь, высокой чувствительностью потока зернистого материала к внешним воздействиям. Адекватное аналитическое описание динамики быстрых гравитационных течений, в свою очередь, чрезвычайно затруднено вследствие проблем, связанных с формулировкой граничных условий.

Комплексную информацию о динамике течения зернистых сред позволяет получить экспериментально-аналитический метод [1]. Данный метод, характеризующийся простотой эксперимента и достаточно высокой точностью определения основных параметров структуры гравитационного потока зернистого материала, основывается на анализе фазы свободного падения частиц.

Метод реализуется на экспериментальной установке (рис. 1), состоящей из наклонного канала 1 прямоугольного сечения и кюветы 3, разделенной перегородками 4 на ячейки. Для регулирования толщины и длины скатывающегося слоя зернистого материала в канале 1 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.

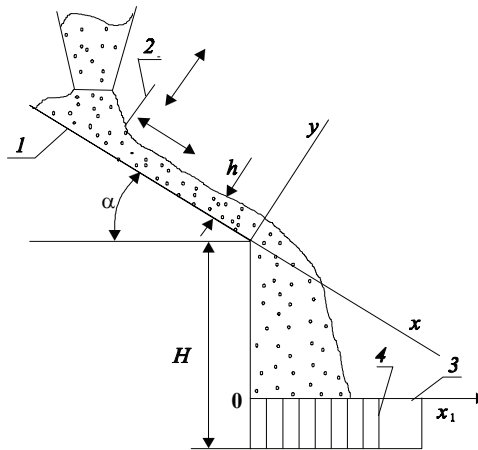


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

Экспериментальная часть метода выполняется в следующей последовательности. Первоначально устанавливают требуемые величины угла наклона α плоскости ската, толщины и длины скатывающегося слоя. Затем в необходимом количестве дозируют исследуемый материал непосредственно в канал. В течение некоторого времени (до наступления режима установившегося гравитационного течения) скатывающийся материал принимают в буферную емкость. При наступлении установившегося режима течения открывают доступ сыпавшегося из канала материала к ячейкам кюветы и в течение определенного времени заполняют их. Содержимое ячеек взвешивают и по результатам взвешивания определяют функцию распределения массы материала $G(x_1)$ в направлении оси $0x_1$ (рис. 1).

Аналитическая часть метода заключается в использовании взаимосвязи между локальными значениями порозности слоя $\varepsilon(y)$, скорости сдвига dU/dy , модуля скорости $U(y)$ и распределением частиц по горизонтальной координате $G(x_1)$ для определения структурных и кинематических характеристик потока. Для некоторой частицы, вылетающей из канала на высоте y от его дна и попадающей в ячейку с координатой x_1 , получено выражение для модуля скорости [1]:

$$|\vec{U}| = \frac{x_1 - y \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha \sqrt{(H + y \cos \alpha - (x_1 - y \sin \alpha) \operatorname{tg} \alpha) \cdot 2/g}}. \quad (1)$$

На основе балансового уравнения для потока вылетающих из канала частиц и массы материала, распределенного по ячейкам, получено

$$U(y, x_1) \cdot \rho^*(y) = G(x_1). \quad (2)$$

Чтобы решить уравнения (1) и (2) относительно скорости частиц скатывающегося слоя, необходимо знать вид функции $\rho^*(y)$. Для определения функции $\rho^*(y)$ распределения плотности сдвигового потока по толщине слоя использована гипотеза об аналогии между параметрами состояния зернистой среды при быстром сдвиге и соответствующими параметрами состояния плотного газа. В соответствии с этим уравнение состояния зернистой среды записано в следующем виде:

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

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

$\bar{\varepsilon} = (\varepsilon - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon)$ – удельное приращение свободного объема движущегося слоя,

происходящее вследствие дилатансии; $\frac{dU}{dy}$ – скорость сдвига; χ – коэффициент

уравнения состояния зернистой среды.

В результате решения системы уравнений (1)-(3) методом последовательных приближений получают профили скорости $U(y)$ и порозности $\varepsilon(y)$.

На рис. 2 приведены результаты экспериментально-аналитического исследования профиля скорости и порозности при гравитационном течении керамических гранул диаметром $6,6 \cdot 10^{-3}$ м по шероховатой наклонной плоскости. Из рисунка видно, что реализация изложенного метода исследования позволяет прогнозировать достаточно сложные неординарные профили концентрации твердой фазы в быстром гравитационном потоке зернистых материалов.

Анализ известных методов исследования динамики быстрых гравитационных течений зернистых материалов [2-4] свидетельствует о том, что они не позволяют получить подобную детальную информацию о структуре потока среды. Так называемые зондовые методы [2], заключающиеся в непосредственном вводе зондов в поток материала, приводят к существенному искажению локальных характеристик потока. Это связано с тем, что контакт пробоотборников и даже микрозонда с отдельной частицей потока вызывает значительные изменения структурно-кинематических характеристик частиц ближайшего окружения.

Сущность беззондовых методов заключается, в основном, в наблюдении гравитационного потока через прозрачные боковые стенки канала [3]. Эти методы не позволяют получить достоверную информацию о параметрах потока по причине специфических граничных условий на боковых стенках и, как следствие, нарушения структуры потока в этой части слоя. Очевидно, что полученные в результате данные по структурным и кинематическим характеристикам зернистой среды нельзя считать справедливыми для потока в целом.

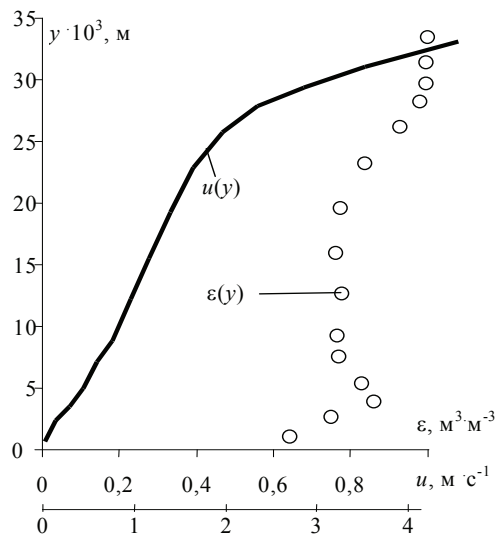


Рис. 2 Профили скорости $u(y)$ и порозности $\varepsilon(y)$ в гравитационном потоке керамических шаров ($d = 6,6 \cdot 10^{-3}$), полученные экспериментально-аналитическим путем

Анализ результатов исследования профилей скорости и порозности в быстрых сдвиговых потоках зернистых материалов [3] свидетельствует, что с их помощью не представляется возможным объяснить и прогнозировать неординарные распределения частиц зернистого материала, обусловленные эффектами их сегрегации и миграции. Так, например, экспериментальные профили, полученные традиционными методами, не позволяют объяснить поведение мелких частиц, перемещающихся в направлении от ядра гравитационного потока к его открытой поверхности, и плотных частиц, движущихся от основания слоя к его центральной части.

Для объяснения неординарных эффектов взаимодействия частиц и описания процесса сегрегации в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов весьма плодотвор-

ными оказались оригинальные прогностические свойства уравнения состояния зернистой среды в виде уравнения (3). Данное уравнение имеет феноменологический характер, в связи с чем вполне правомерен интерес к более глубокому исследованию его прогностических возможностей. Это связано с тем, что до настоящего времени имеются только косвенные подтверждения достоверности прогнозируемых экспериментально-аналитическим методом профилей.

В настоящей работе проведено исследование уравнения состояния зернистой среды путем анализа зависимостей коэффициента χ от технологических характеристик гравитационного потока (угол наклона, высота слоя) и физико-механических свойств дисперсных материалов (плотность, размер частиц, их шероховатость и упругость). Экспериментальные исследования проведены на установке, изображенной на рис. 1, с использованием зернистых материалов с различными физико-механическими свойствами (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов

Материал	Средний диаметр, мм	Плотность частиц, кг/м ³	Порозность неподвижного слоя, ϵ_0 , м ³ ·м ⁻³	Угол естественного откоса, α_0 , град
Керамика	6,6	2086	0,42	36
Стеклянный бисер	3,25÷3,5	2500	0,37	26
Аммофос	2,2÷2,5	1650	0,4	32
Силикагель	3,75÷4,0	1015	0,4	31,5

Исследование заключалось в определении величины коэффициента χ уравнения (3) при использовании его для описания динамики течения зернистых материалов по шероховатому скату в зависимости от высоты слоя материала h в канале и угла наклона ската α .

При этом с целью обобщения результатов исследования технологические характеристики потока приведены к безразмерному виду, т.е. использованы безразмерные значения угла наклона ската $\sin \alpha / \sin \alpha_0$ и высоты слоя h/d .

На рис. 3-5 представлены результаты исследования коэффициента χ уравнения состояния зернистой среды. Полученные результаты свидетельствуют о том, что коэффициент χ уравнения состояния зернистой среды является достаточно универсальной характеристикой зернистых материалов. Как видно из рис. 3-4, величина этого коэффициента практически не зависит от вида зернистого материала и углов наклона шероховатого ската. При этом угол наклона ската изменяли в пределах значений, соответствующих установившемуся развитому течению зернистых материалов. В то же время наблюдается существенная зависимость коэффициента χ от высоты слоя материала на шероховатом скате (рис. 5). Очевидно, что для объяснения наблюдаемых зависимостей необходима дополнительная информация.

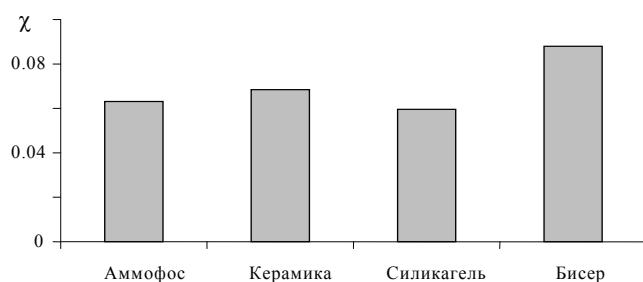


Рис. 3 Коэффициент уравнения состояния χ для различных материалов при $\sin(\alpha) / \sin(\alpha_0) = \text{const}$ и $h/d = \text{const}$

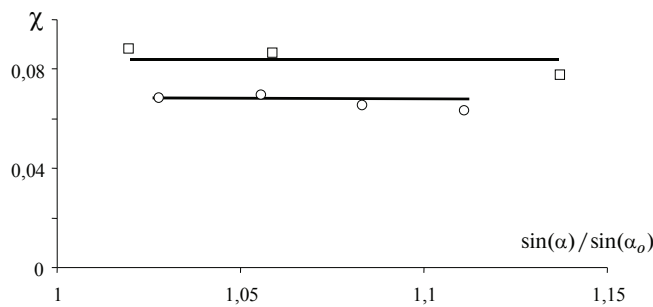


Рис. 4 Зависимость коэффициента уравнения состояния χ от относительного угла наклона ската для керамики и бисера при $h/d = \text{const}$: \circ – керамика, \square – бисер

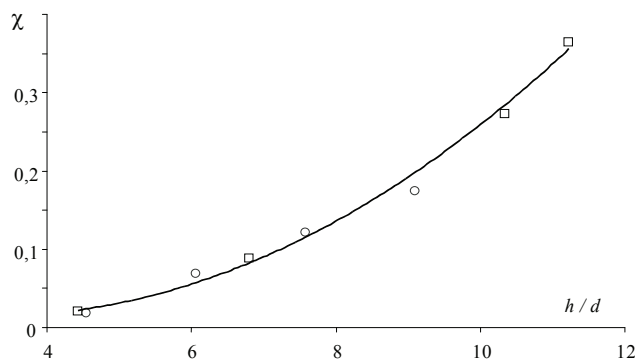


Рис. 5 Зависимость коэффициента уравнения состояния χ от относительной высоты слоя для керамики и бисера при $\sin(\alpha)/\sin(\alpha_0) = \text{const}$: \circ – керамика, \square – бисер

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что для установившегося развитого гравитационного течения вид уравнения состояния зернистой среды практически не зависит от физико-механических свойств несвязных материалов и угла наклона ската при одинаковых относительных высотах слоя материала на шероховатом скате.

Рассмотренный выше экспериментально-аналитический метод базируется на использовании постулата о взаимосвязи структурных и кинематических параметров сдвигового потока зернистой среды. Однако до настоящего времени не подтверждена правомерность принятого допущения. Вероятно, это является одной из причин того, что некоторые ученые подвергают сомнению прогнозируемые с помощью экспериментально-аналитического метода достаточно сложные профили порозности по высоте потока зернистого материала. В связи с этим весьма актуальной остается необходимость прямой экспериментальной проверки адекватности принятых в постулате допущений, физических представлений о закономерностях сегрегации в потоках зернистых сред.

В данной работе предлагается метод прямого бесконтактного измерения концентрации твердой фазы в быстром сдвиговом потоке зернистой среды. Предлагаемый метод основывается на применении проникающего рентгеновского излучения и фиксировании его на рентгеновской пленке. Отличительной особенностью метода является то, что оценка проникаемости потока зернистой среды и ее контрольных образцов проводится с использованием единой рентгенограммы. Вследствие этого существенно повышается точность рентгеновского анализа, так как исключаются случайные погрешности, вызванные различными свойствами пленки, условиями ее проявления и временем экспонирования.

Схема экспериментальной установки для определения концентрации твердой фазы в потоке зернистой среды с помощью рентгеновского излучения приведена на рис. 6. Установка состоит из наклонного канала прямоугольного сечения l 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, которое является практически абсолютно прозрачным для рентгеновского излучения. Со стороны одного из окон установлен источник рентгеновского излучения 6, 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, последовательность которых можно представить в виде блок-схемы (рис. 7)

С помощью разработанного метода измерения концентрации твердой фазы в потоке зернистой среды проведено тестирование прогностических свойств экспериментально-аналитического метода исследования параметров гравитационного течения зернистой среды на шероховатом скате.

В результате проведенного исследования с использованием предложенного метода получены профили порозности для режима установившегося гравитационного течения керамических сферических частиц диаметром $6,6 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 1, рис. 8). На том же рисунке представлен аналогичный профиль, полученный с использованием экспериментально-аналитического метода [1] (кривая 2). Сравнение полученных профилей свидетельствует об удовлетворительной их

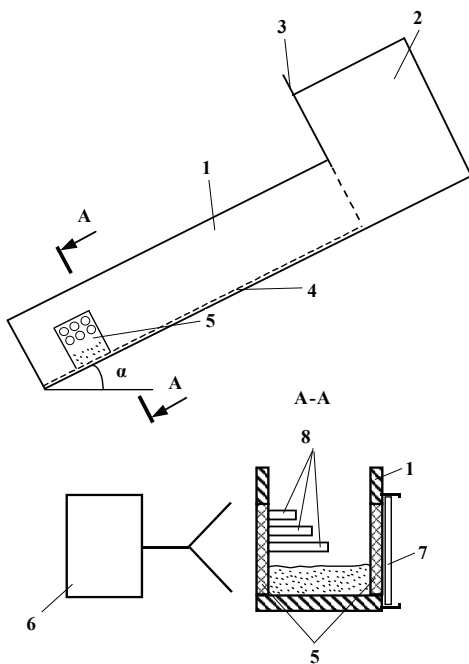


Рис. 6 Схема экспериментальной установки

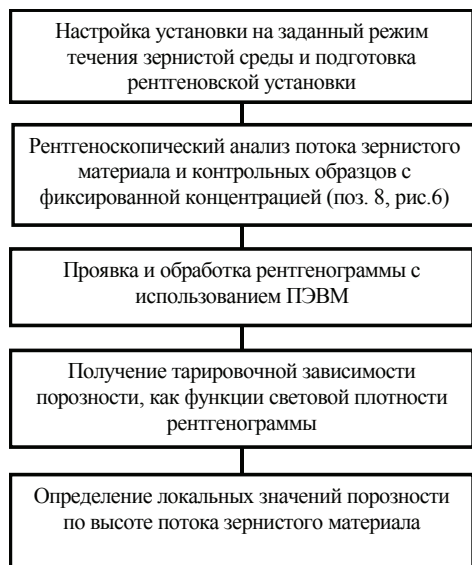


Рис. 7 Блок-схема метода определения локальной концентрации твердой фазы

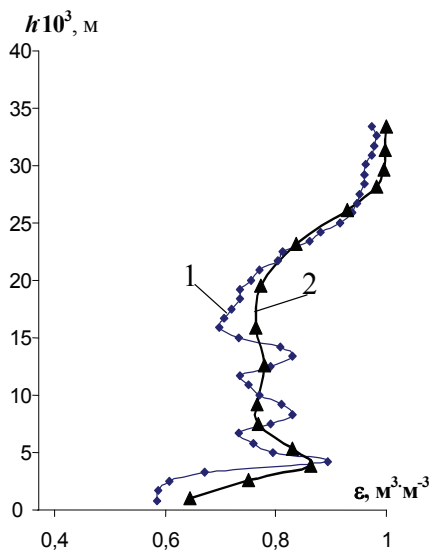


Рис. 8 Профили локальных концентраций твердой фазы по высоте потока зернистого материала

адекватности. Кроме того, полученный с помощью рентгеноскопии профиль порозности может служить прямым доказательством наличия специфических особенностей быстрого гравитационного течения зернистого материала, которые прежде [1] обнаруживались лишь косвенным путем. Среди таких особенностей обращает на себя внимание наличие зоны с наиболее высокой концентрацией частиц в центральной части слоя. Зигзагообразный характер изменения порозности в этой части слоя с периодом, соответствующим, примерно, диаметру частиц, свидетельствует о тенденции частиц организовывать послойную регулярную структуру потока. При этом области потока, расположенные на периферии слоя, вблизи его основания и открытой поверхности, характеризуются повышенными значениями порозности.

Дополнительно следует отметить, что факт наличия зоны с пониженной концентрацией твердой фазы у основания быстрого сдвигового гравитационного потока традиционно подвергался сомнению, и прежде существовали только косвенные доказательства его существования.

Список литературы

1. Dolgunin V.N., Ukolov A.A. Segregation modeling of particle rapid gravity flow // Powder technology.- 1995. – V.83. – Pp.95-103.
2. Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений: Сб. статей. Пер. с англ. /Сост. И.В. Ширко. –М.: Мир, 1985.-289 с.
3. Сэвидж С. Гравитационное течение несвязанных гранулированных материалов в лотках и каналах// Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений: Сб. статей. Пер. с англ. /Сост. И.В. Ширко. –М.: Мир, 1985.- С. 86-146.
4. M.J. Millen, B.D. Sowerby, D.A. Abemethy, R. Kingsiey and C. Grima. On-line measurement of pulverised coal mass flow using an ultrasonic technique. //Powder technology. – 1997.

Experimental and Analytical Research of Quick Gravitation Flow of Grain Media

V.Ya. Borschev, V.N. Dolgunin, P.A. Ivanov

Department "Technological Equipment and Advanced Technologies", TSTU

Key words and phrases: grain media; quick gravitation flow; condition equation; solid phase concentration; roentgenography.

Abstract: Experimental analysis of grain media condition equation, establishing the analogy between grain media and dense gas under quick shift is conducted. Universal character of this equation is found out. Method of non-contact measurement of solid phase concentration in quick shift flow of grain media using X-rays is developed. Approbation of the method in terms of quick gravitation flow of grain media proves unusual properties of gravitation flow on rough slope, which were proved before only by indirect methods.

Experimentelle und analytische Untersuchung des schnellen Gravitationsstromes des Körnigmediums

Zusammenfassung: Es ist die Experimentellanalyse der Gleichung des Zustandes des Körnigmediums angeführt. Sie stellt die Analogie zwischen dem Körnigmedium bei dem schnellen Verschieben und dem Dichtgas fest. Es ist den Universalcharakter dieser Gleichung entdeckt. Es ist die Methode der kontaktlosen Messung der Konzentration der Hartphase im schnellen Verschiebenstrom des Körnigmediums mit der Benutzung der Röntgenstrahlung erarbeitet. Es ist die Approbation der Methode in Bedingungen des

schnellen Gravitationsstromes des Körnigmediums durchgeführt. Sie erlaubte die unordinären Eigenschaften des Gravitationsstromes auf dem unebenen Abhang zu bestätigen.

Etude expérimentale et analytique du courant rapide gravitationnel du milieu granulé

Résumé: On a réalisé l'analyse expérimentale des équations de l'état du milieu granulé qui établit une analogie entre le milieu gravitationnel pendant le déplacement rapide et le gaz dense. On a établi la méthode de la mesure sans contact de la concentration de la phase solide dans le courant rapide du déplacement du milieu granulé avec l'utilisation de la radiation X. On a effectué l'approbation de la méthode dans les conditions du courant gravitationnel rapide du milieu granulé qui avait permis d'affirmer les propriétés particulières du courant gravitationnel sur la pente raboteuse, la présence desquelles avait été prouvée auparavant par les méthodes indirectes [1].
