

## О ГРАВИТАЦИОННОМ ТЕЧЕНИИ ЧАСТИЦ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ШЕРОХОВАТОМ СКАТЕ

В.Я. Борщев<sup>1</sup>, В.Н. Долгунин<sup>2</sup>, П.А. Иванов<sup>2</sup>

*Кафедры: «Машины и аппараты химических производств» (1),  
«Технологическое оборудование и пищевые технологии» (2), ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** быстрый гравитационный поток; зернистая среда; уравнение состояния.

**Аннотация:** Проведено исследование взаимосвязи структурных и кинематических параметров движения на шероховатом скате зернистых сред, имеющих частицы неправильной формы, склонных к проявлению эффектов связности. Установлен сложный характер влияния фактора формы частиц и их склонности к проявлению эффектов связности на взаимосвязь между порозностью, давлением и скоростью сдвига в быстром гравитационном потоке зернистого материала.

---

В режиме быстрого гравитационного течения протекают различные гидромеханические и теплообменные процессы переработки сыпучих материалов. Комплексную информацию о динамике подобного рода течений зернистых сред позволяет получить экспериментально-аналитический метод [1]. В соответствии с названным методом информацию о потоке получают в виде профилей скорости и порозности. Кроме того, метод позволяет установить взаимосвязь между дилатансией, нормальным давлением и скоростью сдвига зернистой среды. При этом скорость сдвига рассматривают как величину, пропорциональную энергии взаимных перемещений частиц, которую в механике быстрых сдвиговых течений называют «температурой» зернистой среды.

В работе [2] проведено исследование взаимосвязи названных параметров в потоке неэластичных частиц, близких по форме к сферическим в отсутствие заметных эффектов связности.

Целью данной работы является исследование взаимосвязи структурных и кинематических параметров движения на шероховатом скате зернистых сред, имеющих частицы неправильной формы, склонных к проявлению эффектов связности.

Известный экспериментально-аналитический метод [1] основывается на анализе фазы свободного падения частиц, покидающих порог ссыпания шероховатого ската, и состоит в организации установившегося гравитационного потока сыпучего материала на шероховатом скате и сборе частиц, покидающих скат, в ячейки горизонтальной кюветы, расположенной на некотором расстоянии от сыпного порога. Далее с использованием экспериментальных данных и допущений о формальной аналогии между параметрами зернистой среды при быстром сдвиге и плотным газом находят профили скорости и порозности в гравитационном потоке.

Использование гипотезы формальной аналогии между параметрами зернистого материала при быстром сдвиге и характеристиками плотного газа позволило получить [1] следующее уравнение состояния зернистой среды

$$p(y)\bar{\varepsilon} = \chi \left( \frac{du}{dy} \right)^2, \quad (1)$$

где  $p(y) = \int_{h-y}^h \rho^* g \cos \alpha dy$  – аналог гидростатического давления;  $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon - \varepsilon_0) / (1 - \varepsilon_0)$  –

дилатансия слоя;  $\varepsilon_0$  – порозность плотной упаковки;  $\chi$  – коэффициент уравнения состояния зернистой среды;  $du/dy$  – скорость сдвига;  $\alpha$  – угол наклона поверхности ската к горизонту;  $\rho^*$  – насыпная плотность частиц.

Анализ уравнения (1) показывает, что его левая часть тождественна удельному значению работы, затрачиваемой на дилатансию  $1 \text{ м}^3$  твердой фазы, а правая – кинетической энергии взаимного перемещения частиц, генерируемых сдвигом зернистой среды. При этом в быстром гравитационном потоке взаимное перемещение частиц происходит вследствие их поперечного массопереноса, наличия скорости флуктуации и относительного перемещения в направлении сдвига. Интенсивность взаимных перемещений частиц целесообразно оценить через кинетическую энергию соответствующих масс. В таком случае интенсивность взаимных перемещений частиц следует определять как сумму кинетических энергий для всех вышеназванных элементарных форм взаимных перемещений. В соответствии с этим уравнение состояния зернистой среды при быстром сдвиге может быть записано в виде [3]

$$p\bar{\varepsilon} = \chi \frac{1}{2} \rho \left[ (bd)^2 + \frac{1}{2} s \phi bd + \phi^2 (bd)^2 \right] \left( \frac{du}{dy} \right)^2, \quad (2)$$

где  $b = b(\varepsilon)$  – геометрический параметр;  $d$  – диаметр частиц;  $\rho$  – плотность частиц;  $s$  – среднее расстояние между частицами;  $\phi$  – комплекс, определяющий диссипативную составляющую энергии, вычисляемый в зависимости от условий течения и свойств частиц.

На первом этапе настоящей работы проведено исследование уравнения состояния зернистой среды (2) путем анализа зависимости коэффициента  $\chi$  от технологических характеристик гравитационного потока и физико-механических свойств дисперсных материалов (плотность, размер частиц, их шероховатость и упругость). Экспериментальные исследования проведены на установке [1], состоящей из наклонного канала прямоугольного сечения и кюветы, разделенной перегородками на ячейки. Кювета, предназначенная для сбора вылетающих из канала частиц, устанавливается на некотором расстоянии от порога ссыпания. На дне канала расположена шероховатая пластина, имеющая шероховатость, равную половине диаметра частиц исследуемого материала, для обеспечения условий прилипания.

Исследование заключалось в определении величины коэффициента уравнения состояния зернистой среды при использовании его для описания динамики течения зернистых материалов по шероховатому скату. В качестве модельных материалов были использованы зернистые материалы, характеризующиеся или связно-текучим состоянием или имеющие частицы неправильной формы. Так, гранулы полиэтилена (рис. 1) отличаются сложной формой частиц, представляющих собой цилиндрики с отношением длины к диаметру, равным 0,6...0,7, со сглаженными краями. Гранулы же аммофоса (рис. 2) не только не соответствуют



Рис. 1 Гранулы полиэтилена

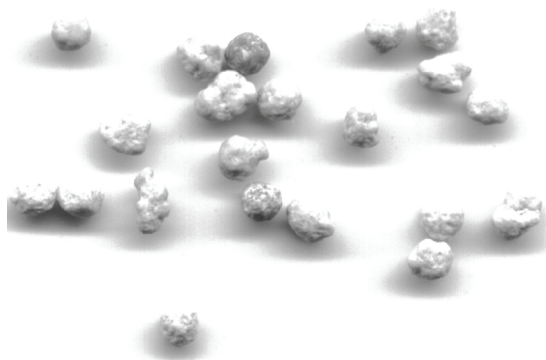


Рис. 2 Гранулы аммофоса

сферам вследствие наличия на их поверхности значительного числа острых и сглаженных кромок, но и отличаются ярким проявлением склонности к истиранию. Вследствие истирания частицы аммофоса заменялись на новые после выполнения каждой серии параллельных опытов.

Исследования коэффициента уравнения состояния зернистой среды проводились для данных материалов при условиях установившегося гравитационного течения [4].

На рис. 3 представлены результаты исследования коэффициента  $\chi$  уравнения состояния зернистой среды как функции относительной высоты слоя  $h/d$  на шероховатом скате для зернистых материалов. Из рис. 3 видно, что наблюдается существенная зависимость коэффициента взаимосвязи от величины потока несферических гранул полиэтилена, особенно в области малых толщин слоя материала на скате, что, по-видимому, указывает на сложный характер влияния фактора формы частиц на взаимосвязь между порозностью, давлением и скоростью сдвига в быстром гравитационном потоке зернистого материала.

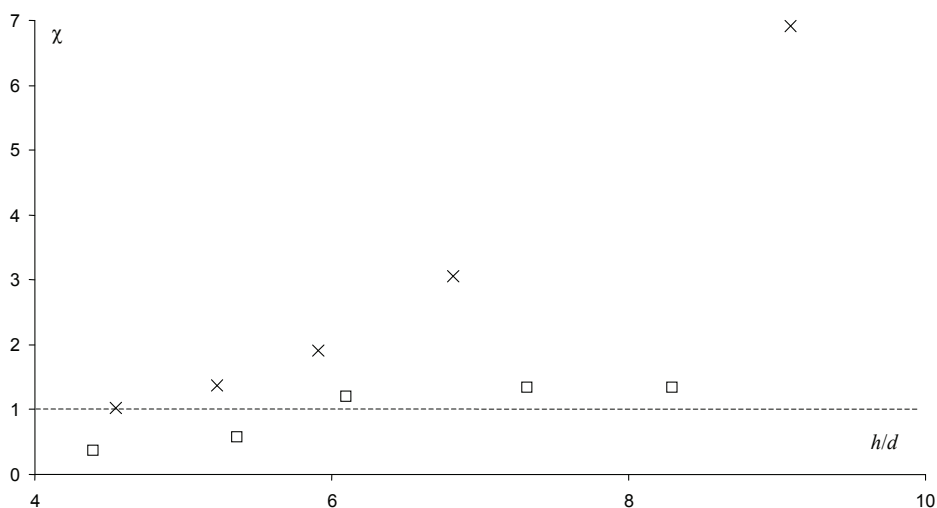


Рис. 3 Зависимость коэффициента  $\chi$  уравнения состояния зернистой среды от относительной высоты слоя  $h/d$  на шероховатом скате при  $\sin \alpha / \sin \alpha_0 = 1.1$  ( $\alpha_0$  – угол естественного откоса материала):  
□ – гранулы полиэтилена; × – гранулы аммофоса

Кроме того, особое внимание обращает на себя чрезвычайно большое возрастание коэффициента  $\chi$  с увеличением толщины слоя гранулированного аммофоса на скате. При увеличении относительной толщины слоя в два раза коэффициент  $\chi$  возрастает от 1 до 7. Такая динамика изменения коэффициента явно указывает на доминирующее возрастание дилатансии в потоке с увеличением толщины слоя материала на скате.

На следующем этапе работы, с целью объяснения наблюдаемого, на первый взгляд, парадоксального изменения характеристик потока гранулированного аммофоса проведен анализ профилей скорости сдвига и порозности при различных толщинах движущегося слоя. Соответствующие профили показаны на рис. 4 и 5. Анализ профилей позволяет обнаружить, что с увеличением толщины слоя наблюдается парадоксальное увеличение порозности в центральной части потока, сопровождающееся уменьшением скорости сдвига.

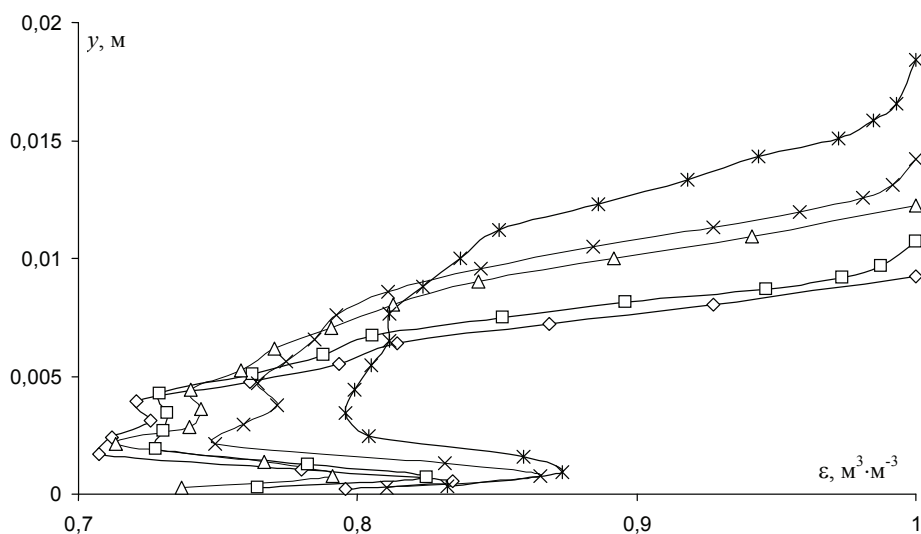


Рис. 4 Профили порозности для гранулированного аммофоса при толщинах слоя:

—◇—  $h = 10$  мм; —□—  $h = 11,5$  мм; —△—  $h = 13$  мм;  
—×—  $h = 15$  мм; —\*—  $h = 20$  мм

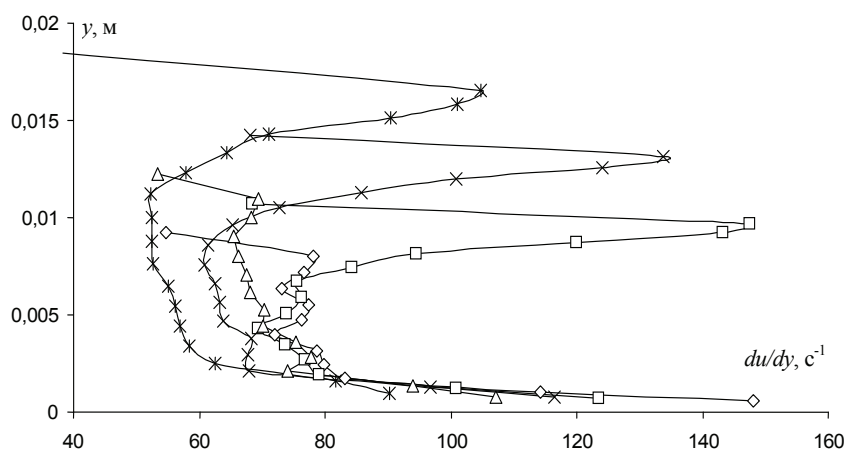
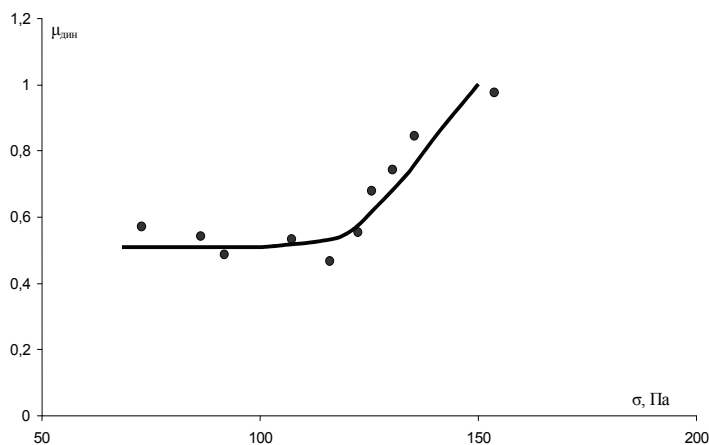


Рис. 5 Профили скорости сдвига для гранулированного аммофоса при толщинах слоя:

—◇—  $h = 10$  мм; —△—  $h = 11,5$  мм; —□—  $h = 13$  мм;  
—×—  $h = 15$  мм; —\*—  $h = 20$  мм



**Рис. 6** Динамический коэффициент трения как функция нормальных напряжений для гранулированного аммофоса

го изменения параметров потока предложена гипотеза увеличения «связности» частиц аммофоса с повышением давления, вследствие их сложной формы и склонности к истиранию.

С целью подтверждения этой гипотезы проведено исследование динамического коэффициента трения как функции нормального давления. Динамический коэффициент трения определяется как отношение сдвигового и нормального напряжений [4]. Исследование проведено с использованием простой сдвиговой ячейки по стандартной методике [5] в диапазоне изменения нормальных напряжений, имеющих место при различных толщинах слоя в гравитационном потоке аммофоса на скате.

Результаты исследования, приведенные на рис. 6, свидетельствуют о значительном возрастании динамического коэффициента трения с увеличением нормального давления (толщины слоя). Этот результат можно рассматривать как следствие повышения связности частиц аммофоса с повышением нормального напряжения. Это, очевидно, связано с тем, что увеличение силы прижатия друг к другу шероховатых частиц неправильной формы, склонных к истиранию, приводит к увеличению числа точек контакта между ними. Вследствие этого появляется некоторая эффективная связность частиц, которая при сдвиге среды становится причиной образования связных структур, пустот, мостиков, способствующих повышению порозности в потоке.

В результате такого парадоксального увеличения связности и порозности наблюдается кажущееся повышение дилатансии среды, сопровождаемое снижением скорости сдвига – «температуры» зернистой среды. Такое изменение соотношения между дилатансией и «температурой» становится причиной появления аномально больших значений коэффициента  $\chi$  уравнения состояния среды при увеличении толщины слоя гранул аммофоса на скате.

#### *Список литературы*

1. Dolgunin V.N. // Powder Technology / V.N. Dolgunin and A.A. Ukolov. – 1995. V. 83. – P. 95.
2. Dolgunin V.N. // in H. Kalman, A. Levy and M. Hubert (eds.). The 3rd Israel Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids / V.N. Dolgunin, V.J. Borschov, P.A. Ivanov. – Israel. 2000. V. 2. – P. 11.33 – 11.37.

3. Иванов П.А. Течение зернистых материалов в гравитационных сепараторах и смесителях: закономерности, техника измерения, метод прогнозирования: Автореф. дис. на ... канд. тех. наук. / П.А. Иванов. – Тамбов, 2003. – 16 с.

4. Savage S.B // Interparticle Percolation and Segregation in Granular Materials: A review // in A.P.S. Selvaduraj (ed.) Development in Engineering Mechanisms, Elsevier Science Publishers B.V. / S.B. Savage. – Amsterdam, 1987. – Pp. 347 – 363.

5. Stephens D.J. // The Mixing and Segregation Cohesionless Particulate Materials: Part I. Failure Zone Formation; Part II. Microscopic Mechanisms for Particles Differing in Size / D.J. Stephens, J. Bridgwater. – Powder Technology. – 1978. V. 21. – Pp. 17 – 44.

---

## **Rapid Gravity Flow of Nonspherical Particles on a Rough Chute**

V.Ya. Borshchov<sup>1</sup>, V.N. Dolgunin<sup>2</sup>, P.A. Ivanov<sup>2</sup>

*Departments: «Technological Equipment and Food Technology» (1),  
«Machine and Apparatus of Chemical Production» (2), TSTU*

**Key words and phrases:** rapid gravity flows; particulate solids; equation of the granular medium state.

**Abstract:** The research on structural and kinematical parameters of rapid gravity flows of particulate solids, consisting of nonspherical cohesion particles was carried out. The complex influence of shape and cohesion properties of particles on the interrelationship between dilatation, normal stresses, and shear rate during rapid gravity flow was found out.

---

## **Über den Gravitationsablauf der Teilchen der falschen Form auf dem unebenen Abhang**

**Zusammenfassung:** In der Arbeit ist die Forschung der Wechselbeziehung der strukturellen und kinematischen Parameter der Bewegung auf dem unebenen Abhang der Körnigmedien, die die zur Konnexitätseffekte geneigten Teilchen der falschen Form haben, durchgeführt. Es ist der komplizierte Charakter des Einflusses des Faktors der Form der Teilchen und ihrer Neigung zur Äußerung der Konnexitätseffekte auf die Wechselbeziehung zwischen dem Leerraumanteil, dem Druck und der Geschwindigkeit des Versetzung im schnellen Gravitationsfluß des körnigen Materials festgesetzt.

---

## **Sur le courant gravitationnel des particules ayant la forme irrégulière sur une pente raboteuse**

**Résumé:** Dans cet ouvrage on fait l'étude de l'interrelation entre les paramètres structurels et les paramètres cinématiques du mouvement sur une pente raboteuse des milieux granulés ayant les particules de forme irrégulière qui peuvent produire l'effet de la cohérence. On établit le caractère complexe de l'influence du facteur de la forme des particules et de leur capacité de produire l'effet de la cohérence sur l'interrelation entre la porosité, la tension et la vitesse du décalage dans le courant gravitationnel rapide du matériau granulé.

---