

**ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИЙ СКАТА
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ
И ЭФФЕКТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ В БЫСТРОМ
ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТОКЕ ЧАСТИЦ**

А. Н. Куди, М. А. Туев, В. Н. Долгунин

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; mtuev92@mail.ru*

Ключевые слова: вибрация; гравитационный поток; зернистый материал; миграция; сегрегация.

Аннотация: Проведены экспериментальное и аналитическое исследования влияния высоко- и низкочастотных колебаний на профили порозности и распределений неоднородных частиц в быстром гравитационном потоке зернистых материалов. Исследование выполнено с использованием бинарных смесей частиц, различающихся по размеру, плотности и шероховатости. Установлено, что высокочастотные колебания ската способствуют образованию плато с относительно высокой концентрацией твердой фазы в центральной части слоя с интенсификацией сегрегации частиц преимущественно по размеру. Низкочастотные колебания приводят к повышению структурной неоднородности потока при относительно высоких значениях порозности и обеспечивают условия для квазидиффузионного разделения частиц (миграции) по размеру, плотности и шероховатости без доминирования их различия по размеру.

Обозначения

A – амплитуда виброколебаний, м;	V' – скорость флуктуаций частиц, м·с ⁻¹ ;
a_v – вибрационное ускорение, м·с ⁻² ;	y, x_1 – декартовы координаты;
$b = [\pi / (6(1 - \varepsilon))]^{0.33}$ – геометрический параметр;	α, α_0 – углы наклона ската и естественного откоса материала соответственно, °;
d – средний диаметр частицы, м;	β – угол между направлением вибрации и нормалью к поверхности ската, °;
du/dy – скорость сдвига, с ⁻¹ ;	ε – порозность слоя, м ³ ·м ⁻³ ;
g – гравитационное ускорение, м·с ⁻² ;	$\bar{\varepsilon}(y)$ – дилатансия зернистой среды, м ³ ·м ⁻³ ;
h – толщина слоя, м;	ε_0 – порозность плотного слоя зернистой среды, м ³ ·м ⁻³ ;
k – коэффициент восстановления при столкновении частиц;	λ – экспериментальный коэффициент редукции касательной компоненты скорости при столкновении частиц;
$p(y)$ – аналог гидростатического давления, Н·м ⁻² ;	μ – коэффициент трения;
Q – кватитепловой поток, Вт·м ⁻² ;	θ – температура зернистой среды, Дж;
s – среднее расстояние между частицами, м;	ρ – плотность частицы, кг·м ⁻³ ;
T – период виброколебаний, с;	χ – коэффициент уравнения состояния зернистой среды;
t – время, с;	ω – частота вибрации, с ⁻¹ .
$u(y)$ – скорость частиц в направлении сдвига, м·с ⁻¹ ;	

Быстрые гравитационные течения являются одним из наиболее распространенных видов перемещений сыпучих материалов в технологических процессах и природных явлениях [1]. Чрезвычайно важным аспектом такого рода течений, который необходимо учитывать при прогнозировании параметров соответствующих потоков и кинетики технологических процессов, являются эффекты взаимодействия частиц. В быстрых гравитационных потоках частицы взаимодействуют в режиме интенсивного сдвига и наряду со скоростью относительного перемещения в направлении сдвига приобретают хаотически распределенную в пространстве скорость флуктуаций. Данная составляющая скорости играет определяющую роль в динамике взаимодействия частиц, в связи с чем зернистые среды в состоянии быстрого сдвига называют «газом твердых частиц» [2]. Взаимодействие частиц в таком состоянии сопровождается ярким проявлением эффектов разделения и перемешивания, механизмы которых во многом определяются наличием хаотических перемещений частиц. В связи с этим, квазидиффузионный механизм взаимодействия частиц является причиной не только их дисперсионного перемешивания, но и разделения, обусловленного различными величинами скоростей флуктуаций неоднородных частиц, названного миграцией [3]. К разделению неоднородных частиц приводит и их гидромеханическое взаимодействие в сдвиговом потоке, которое называют сегрегацией. Таким образом, основными эффектами взаимодействия частиц неоднородной зернистой среды, определяющими их распределение в быстром гравитационном потоке, являются квазидиффузионное перемешивание, сегрегация и миграция.

В технологическом аспекте чрезвычайно важно обратить внимание не только на различную физическую природу разделения частиц под действием сегрегации и миграции, но и различную степень влияния на кинетику названных эффектов одних и тех же свойств частиц. В соответствии с механизмом сдвигового поточного разделения движущей силой сегрегации является избыточный момент сил трения, тяжести и ударных импульсов (положительный или отрицательный), действующий на частицу контрольного компонента относительно некоторой мгновенной оси ее вращения в условно однородной среде [4]. Эффект сегрегации является следствием гравитационного воздействия на зернистую среду и протекает при доминирующем влиянии различия частиц по размеру. Миграция имеет качественно иную природу и является следствием взаимной квазидиффузии частиц, перемещающихся с различными скоростями флуктуаций в условиях неоднородной концентрации твердой фазы [3]. Миграция протекает без доминирующего влияния размера частиц, когда их различие по плотности, шероховатости и упругости существенно влияет на кинетику разделения. Движущей силой миграции является темп изменения среднего расстояния между частицами, который не обязательно связан с гравитационным воздействием гравитации на сдвиговый поток зернистой среды [3].

Вследствие различной физической природы эффектов сегрегации и миграции условия взаимодействия частиц, которые благоприятны для их интенсивного протекания, также существенно различаются. В результате, в одних условиях доминирует сегрегация, в других – миграция. Интенсивное протекание сегрегации обеспечивается в условиях высоких скоростей сдвига зернистой среды при высокой концентрации твердой фазы. Напротив, миграция доминирует при низких концентрациях твердой фазы и высоких ее градиентов, когда частицы теряют склонность к формированию агрегатов. Указанные особенности эффектов сегрегации и миграции и возможность достижения с их использованием различных технологических эффектов указывают на целесообразность поиска способов управления структурными и кинематическими характеристиками гравитационных потоков зернистых материалов.

Одним из эффективных способов управления структурными и кинематическими параметрами потоков зернистых сред может быть вибрационное воздействие [5]. Однако большинство исследований вибрационных воздействий на зернистые среды выполнено в условиях вертикальных виброколебаний слоев частиц на горизонтальном основании [6], при этом исследователи сталкиваются с явлениями, которые не находят однозначного объяснения. Среди такого рода эффектов наиболее часто упоминаются «проблема бразильского ореха» (**BNP**) и «обратная проблема бразильского ореха» (**RBNP**), которые сводятся соответственно к вопросам: почему бразильские орехи на поверхности вибрирующего слоя; почему не все бразильские орехи на поверхности вибрирующего слоя? [7, 8].

Анализ результатов исследований [9] показывает, что в подавляющем большинстве эффекты взаимодействия частиц в условиях виброколебаний зернистых сред изучаются без учета их микроструктурных характеристик. В то же время, в ряде работ, например [3], сделан вывод о необходимости учета микроструктурных параметров потока и характера их пространственного изменения при исследовании динамики взаимодействий частиц, сопровождающихся эффектами разделения и перемешивания, в условиях сдвиговых течений и виброколебаний.

Определение микроструктурных и кинематических параметров зернистых сред в условиях вибрации представляет весьма сложную проблему вследствие переменного и неоднородного характера их проявления. Экспериментально данная задача решается путем использования различного рода проникающих излучений: магниторезонансной томографии, рентгенографии, электроимпедансной томографии и других методов. Однако при необходимости определения локальных характеристик зернистых сред с использованием такого рода методов сталкиваются с трудностями, связанными в том числе с влиянием граничных эффектов.

С учетом формальной аналогии между разреженной зернистой средой, частицы которой находятся в состоянии хаотических перемещений, и плотным газом многие авторы, например [2, 3], используют хорошо разработанную молекулярно-кинетическую теорию газов для описания структурных и кинематических параметров зернистых сред в условиях быстрого сдвигового течения. В рамках настоящего исследования предполагается аналогия между динамикой зернистой среды при быстром сдвиге и молекулярной газовой динамикой. В соответствии с основными положениями газовой динамики устанавливается взаимосвязь между молярным объемом, давлением и температурой в форме известного закона состояния плотного газа [3]. Аналог соответствующего уравнения состояния, сформулированный для зернистой среды, используется в исследовании профилей порозности и распределений концентрации неоднородных частиц в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов на вибрирующем шероховатом скате. Указанные профили определяют с использованием экспериментально-аналитического метода [3, 4].

Экспериментальную информацию, необходимую для реализации метода, получают с использованием разработанной установки [9], представленной на рис. 1. Установка состоит из канала прямоугольного сечения, закрепленного на станине с помощью упругих элементов и возможностью регулирования угла наклона. Основание канала имеет шероховатость равную половине диаметра наиболее крупных частиц зернистого материала.

Канал связан с электрическим виброприводом, обеспечивающим вертикальные колебания с регулируемыми параметрами вибрации. Под сыпным порогом канала установлена кювета, разделенная поперечными перегородками на ячейки, предназначенная для приема сыпавшихся частиц. В верхней части канала смонтирована задвижка, выполняющая функцию гасителя скорости потока материала, подаваемого в канал с помощью дозатора, расположенного над ним.

Для определения профилей скорости, порозности и распределений неоднородных частиц в потоке на шероховатом скате необходима экспериментальная

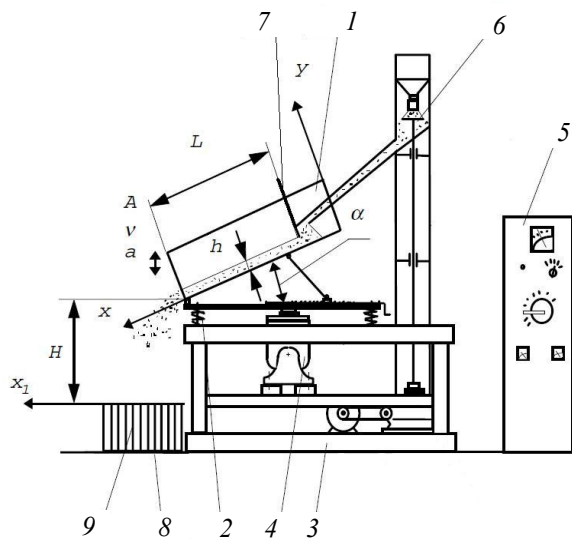


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – канал с шероховатым основанием; 2 – пружины; 3 – станина; 4 – вибраторный привод; 5 – шкаф управления параметрами вибрации; 6 – дозатор зернистого материала; 7 – задвижка; 8 – кювета; 9 – ячейки

информация, включающая распределение ссыпавшегося материала по горизонтальной координате x_1 и высоту слоя на пороге ссыпания. Данная информация анализируется с учетом взаимосвязи между микроструктурными и кинематическими параметрами зернистой среды, которая определяется уравнением состояния зернистой среды, являющегося аналогом уравнения динамики плотного газа.

Указанная аналогия формулируется как взаимосвязь между дилатансией $\bar{\varepsilon}$, нормальным давлением p и температурой зернистой среды θ [9]

$$p\bar{\varepsilon} = \chi\theta, \quad (1)$$

$$\text{где } p(y) = \int_{h-y}^h \rho(1 - \varepsilon(y))g \cos \alpha dy; \quad \bar{\varepsilon}(y) = \frac{\varepsilon(y) - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon(y)}.$$

Температура зернистой среды идентифицируется с кинетической энергией частиц, которую они имеют вследствие взаимных перемещений в потоке на вибрирующем скате. При определении суммарного значения данной энергии учтены ее составляющие, обусловленные действием гравитационного сдвига θ_g и вибрации θ_v

$$\theta(y) = \theta_v(y) + \theta_g(y). \quad (2)$$

Составляющая кинетической энергии взаимных перемещений частиц, являющихся следствием гравитационного воздействия, вычислена с учетом трех элементарных форм такого рода перемещений [9]

$$\theta_g = \theta_{sh} + \theta_{fl} + \theta_{tr}, \quad (3)$$

где θ_{sh} , θ_{fl} , θ_{tr} – составляющие кинетической энергии взаимных перемещений частиц вследствие наличия относительной скорости в направлении сдвига, хаотических перемещений и поперечного квазидиффузионного переноса соответственно.

Составляющая кинетической энергии частиц, обусловленная их поперечным квазидиффузионным массопереносом, определена с учетом пропорциональности квазидиффузионного потока коэффициенту квазидиффузии, а соответственно и скорости флуктуаций частиц [4]

$$\theta_{tr} = \frac{1}{4} msV' \frac{du}{dy}, \quad (4)$$

где $s = (b/b_0 - 1)d$; $b = [\pi/(6(1 - \varepsilon))]^{0.33}$; b_0 – значение геометрического параметра b для случая минимальной величины порозности регулярной укладки однородных частиц ($\varepsilon = 0,2595$); m – масса частицы, кг.

Компонента кинетической энергии частиц, которой они обладают вследствие хаотических взаимных перемещений, определяется как величина, пропорциональная квадрату средней скорости флуктуаций

$$\theta_{fl} = \frac{1}{2} m(V')^2. \quad (5)$$

Компонента кинетической энергии частиц, обусловленная наличием у них относительной скорости в направлении сдвига, вычислена путем определения среднего значения названной скорости [9]

$$\theta_{sh} = \frac{1}{2} m(bd)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2. \quad (6)$$

Температура зернистой среды, генерируемая вибрирующим скатом, определена на основе постулата, предполагающего, что квазитепловой поток вибрации $Q(y)$ пропорционален температуре зернистой среды $\theta(y)$, концентрации частиц на единицу поверхности $[b(y)d(y)]^{-2}$, перпендикулярной направлению квазитеплого потока и частоте столкновения частиц со скатом ω [10]. В результате, температура зернистой среды, обусловленная виброколебаниями ската, вычисляется следующим образом

$$\theta(y) = (Q(y)[b(y)d(y)]^2) / \omega. \quad (7)$$

Для вычисления квазитеплого потока вибрации внутри слоя зернистой среды на скате использована зависимость, полученная в работе [9]:

$$Q(y) = Q(0) \exp\left(-\int_0^y k_E [b(y)d(y)]^{-1} dy\right), \quad (8)$$

где k_E – доля кинетической энергии частиц, рассеиваемой при столкновении частиц, которая вычисляется на основе комбинированной гипотезы удара [1]; $Q(0)$ – квазитепловой поток, генерируемый вибрирующим основанием [1].

Профили скорости $u(y)$, порозности $\varepsilon(y)$ и распределений концентрации неоднородных частиц $c(y)$ в быстром гравитационном потоке зернистой среды получают с использованием итерационной процедуры, представленной в работах [4, 9]. Итерационная процедура заключается в решении численным методом системы уравнений, включающих экспериментальные данные, получаемые на экспериментальной установке (см. рис. 1), и результаты математического описания динамики взаимодействия частиц друг с другом и вибрирующим основанием (1) – (8).

В качестве модельных материалов в исследовании использованы смеси частиц (табл. 1), различающихся преимущественно по размеру (смесь 1), плотности (смесь 2) и шероховатости (смесь 3). Результаты исследования профилей порозности

Таблица 1

Характеристики смесей модельных зернистых материалов

Характеристика смесей	Смесь 1		Смесь 2		Смесь 3	
	бисер, стекло		бисер, стекло	силика-гель	семена моркови	семена повилики
Размер частиц, 10^{-3} , м	3,0...3,5		5...5,5		1,5...2,2	
Концентрация в смеси: кг·кг ⁻¹ шт·кг ⁻¹	0,8	0,2	0,95	0,05	–	
	–				$9,5 \cdot 10^5$	3700
Плотность частиц, кг·м ⁻³	2500			1015	1150	1165
Угол естественного откоса, °	26			31	41	31

и распределений концентраций частиц контрольных компонентов смесей $c(y)$, кг·кг⁻¹, и $c^*(y)$, шт./кг, в потоках на вибрирующем шероховатом скате для высоко- и низкочастотных колебаний представлены на рис. 2. Выбор параметров вибрации определялся исключительно техническими возможностями электрического вибрационного привода ВЭС-10.

Сравнение результатов свидетельствует о том, что высокочастотные колебания при $a_v = 2g$, $\omega = 50$ Гц (см. рис. 2, а, б) способствуют повышению структурной однородности потока с образованием обширного плато с максимальными значениями концентрации твердой фазы в его центральной части. Такие условия в центральной части слоя способствуют интенсификации сегрегации, которая протекает при доминирующем значении различия частиц по размеру. Действительно концентрация крупных частиц в области плато (кривая 1) интенсивно возрастает в направлении к открытой поверхности слоя. Наличие аналогичного потока сегрегации легких и гладких частиц наблюдается в этой области и для смесей 2 и 3. Однако величина потоков сегрегации в этих случаях менее интенсивна по сравнению с частицами, различающимися по размеру.

В случае низкочастотных колебаний при $a_v = 2g$, $\omega = 15$ Гц (см. рис. 2, в, г) для всех смесей наблюдается заметная формальная аналогия профилей распределений концентрации неоднородных частиц и порозности. Объяснением наблюдаемой аналогии могут быть доминирующие в потоке эффекты разделения неоднородных частиц, обусловленные их миграцией. Разделение частиц при миграции происходит в результате взаимной квазидиффузии частиц, имеющих различные скорости флуктуаций в условиях неоднородной концентрации твердой фазы. Вследствие миграции частицы, перемещающиеся с высокими скоростями флуктуаций (маленькие, легкие и гладкие) диффундируют в направлении градиента порозности, в то время как частицы, хаотические перемещения которых протекают при относительно малых скоростях флуктуаций (крупные, плотные и шероховатые), мигрируют в направлении градиента концентрации твердой фазы.

Отмечено, что во всех случаях, и при высоко- и низкочастотных колебаниях (см. рис. 2), частицы, различающиеся по размеру, плотности и шероховатости, могут перемещаться как в направлении градиента скорости сдвига, так и в противоположном направлении. Наблюдаемое явление противоречит результатам, прогнозируемым в соответствии с механизмом сегрегации, изложенным в работе [11].

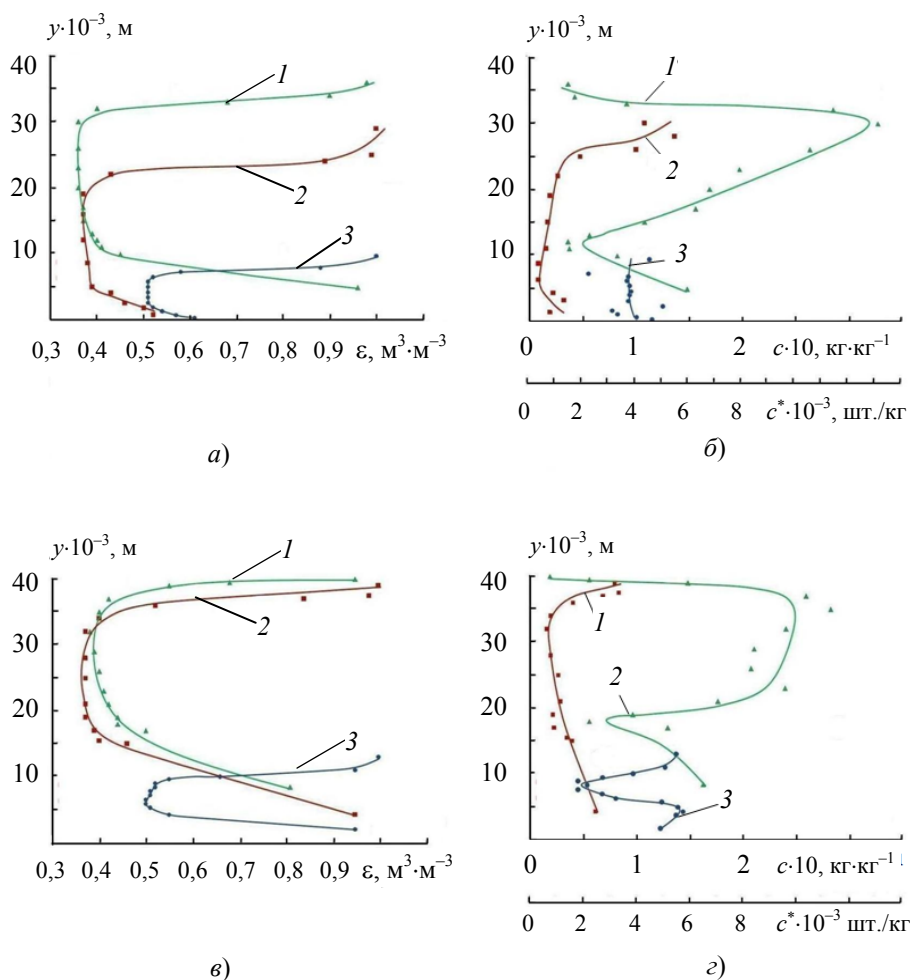


Рис. 2. Экспериментально-аналитические профили порозности $\varepsilon(y)$ (а, в) и распределений концентрации контрольных частиц $c(y)$ и $c^*(y)$ (б, з) в быстрых гравитационных потоках смесей частиц, различающихся по размеру 1 (крупные), плотности 2 (легкие) и шероховатости 3 (шероховатые)

Результаты исследования свидетельствуют о принципиально различном влиянии высоко- и низкочастотных виброколебаний на структурные характеристики и эффекты взаимодействия неоднородных частиц при быстром гравитационном течении зернистых материалов на шероховатом скате. Высокочастотные вибрации способствуют повышению однородности (концентрации твердой фазы и порозности) при относительно высоких значениях концентрации частиц, что создает условия для интенсификации сегрегации с разделением частиц преимущественно по размеру. Низкочастотные вибрации приводят к увеличению структурной неоднородности при относительно высоких значениях порозности слоя, что формирует условия для интенсификации квазидиффузионного разделения (миграции) частиц по комплексу физико-механических свойств (размеру, плотности, шероховатости, упругости) без доминирующего эффекта различия частиц по размеру.

Список литературы

1. Pudasaini, S. P. *Avalanche Dynamics: Dynamics of Rapid Flows of Dense Granular Avalanches* / S. P. Pudasaini, K. Hutter // Springer. – Berlin, NY, 2007. – 602 p.
2. Brennen, C. E. *Fundamentals of Multiphase Flows* / C. E. Brennen // Cambridge University Press. – 2005. – 410 p.
3. Dolgunin, V. N. Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute / V. N. Dolgunin, V. N. Kudy, A. A. Ukolov // *Powder Technology*. – 1998. – Vol. 56. – P. 211–218. doi:10.1016/S0032-5910(97)03376-7.
4. Dolgunin, V. N. Segregation Kinetics in the Rapid Gravity Flow of Granular Materials / V. N. Dolgunin, A. A. Ukolov, O. O. Ivanov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2006. – Vol. 40, No. 4. – P. 393–404. doi:10.1134/S0040579506040099.
5. Wortel, G. H. Anisotropy of Weakly Vibrated Granular Flow / G. H. Wortel, M. van Hecke // *Phys. Rev. E* 92, 040201(2015) arXiv:1410.4335 – 2015. doi:10.1103/PhysRevE.92.040201
6. Huerta, D. A. Vibration-Induced Granular Segregation: a Phenomenon Driven by Three Mechanisms / D. A. Huerta, J. C. Ruiz-Suarez // *Physical Review Letters*. – 2004. – Vol. 92, No. 11. – P. 1–4.
7. Metzger, M. J. All the Brazil Nut Are not on Top: Vibration Induced Granular Size Segregation on Binary, Ternary and Multi-Sized Mixtures / M. J. Metzger, B. Remy, B. J. Glasser // *Powder Technology*. – 2011. – Vol. 205, No. 1–3. – P. 42–51.
8. To Vibrorheological Effects Forecasting During Rapid Gravity Flow of Particulate Solids / V. N. Dolgunin [et al.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 570–576.
9. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles / V. N. Dolgunin [et al.] // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2017. – No. 122. – P. 22–32.
10. To Understanding Some Intriguing Segregation Phenomena in Rapid Gravity Flows of Particulate Solids on a Vibrated Rough Chute / V. N. Dolgunin [et al.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 793–799.
11. Hill, K. M. Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures / K. M. Hill, Y. Fan // *KONA Powder and Particle Journal*. – 2016. – Vol. 33. – P. 150–168. doi: <https://doi.org/10.14356/kona.2016022>.

The Influence of the Gravity Conveyor Frequency Vibrations on the Characteristics of the Structure and Separation Effects in Fast Gravitational Particle Flux

A. N. Kudi, M. A. Tuev, V. N. Dolgunin

*Department of Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries,
TSTU, Tambov, Russia; mtuev92@mail.ru*

Keywords: vibration; gravitational flow; granular material; migration; segregation.

Abstract: Experimental and analytical studies of the effect of high and low frequency oscillations on porosity profiles and distributions of inhomogeneous particles in a fast gravitational flow of granular materials are carried out. The study was performed using binary mixtures of particles that differ in size, density, and roughness. It is established that high-frequency oscillations of the gravity conveyor contribute

to the formation of a plateau with a relatively high concentration of solid phase in the central part of the layer with an intensification of segregation of particles, mainly in size. Low-frequency oscillations lead to an increase in the structural inhomogeneity of the flow at relatively high values of porosity and provide conditions for quasi-diffusion separation of particles (migration) in size, density and roughness without dominating their difference in size.

References

1. Pudasaini S.P., Hutter K. *Avalanche Dynamics: Dynamics of Rapid Flows of Dense Granular Avalanches*, Springer, Berlin, NY, 2007, 602 p.
2. Brennen C.E. *Fundamentals of Multiphase Flows*, Cambridge University Press, 2005, 410 p.
3. Dolgunin V.N., Kudy A.N., Ukolov A.A. Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute, *Powder Technology*, 1998, vol. 96, issue 3, pp. 211-218, doi:10.1016/S0032-5910(97)03376-7.
4. Dolgunin V.N., Ukolov A.A., Ivanov O.O. Segregation Kinetics in the Rapid Gravity Flow of Granular Materials, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2006, vol. 40, no. 4, pp. 393-404, doi: 10.1134/S0040579506040099.
5. Wortel G.H., Hecke M., Anisotropy of weakly vibrated granular flow. *Phys. Rev. E* 92, 040201(2015) arXiv:1410.4335, 2015, doi:10.1103/PhysRevE.92.040201.
6. Huerta D.A., Ruiz-Suarez J.C. Vibration-Induced Granular Segregation: a Phenomenon Driven by Three Mechanisms. *Physical Review Letters*, 2004, vol. 92, no. 11, pp. 1-4.
7. Metzger M., Remy B., Glasser B.J. All the Brazil Nuts are not on top: Vibration Induced Granular Size Segregation on Binary, Ternary and Multi-Sized Mixtures. *Powder Technology*, 2011, vol. 205, no. 1-3, pp. 42-51.
8. Dolgunin V.N., Kudy A.N., Voronov V.A., Ryabova E.A. To Vibrorheological Effects Forecasting During Rapid Gravity Flow of Particulate Solids. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 570-576. (In Eng., abstract in Russ.).
9. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Ukolov A.A., Tuev M.A. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, no. 122, pp. 22-32.
10. Dolgunin V.N., Kudy A.N., Ryabova E.A., Tuev M.A., Milovanov E.E. To understanding some intriguing segregation phenomena in rapid gravity flows of particulate solids on a vibrated rough chute, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 793-799. (In Eng., abstract in Russ.).
11. Hill K.M., Fan Y. Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures. *KONA Powder and Particle Journal*, 2016, vol. 33, pp. 150-168, doi: <https://doi.org/10.14356/kona.2016022>.

Einfluss der Frequenz des Abhangs auf die Struktureigenschaften und Separationseffekte im schnellen Gravitationsstrom von Partikeln

Zusammenfassung: Es sind experimentelle und analytische Studien über die Auswirkungen von hoch- und niederfrequenten Schwankungen auf die Profile der Porosität und Verteilung von heterogenen Partikeln in einem schnellen Gravitationsstrom von körnigen Materialien durchgeführt. Die Studie ist mit Verwendung der binären Partikelmischungen erfüllt, die sich in Größe, Dichte und Rauheit unterscheiden. Es wurde festgestellt, dass hochfrequente Schwankungen des

Abhangs zur Bildung eines Plateaus mit einer relativ hohen Konzentration der festen Phase im zentralen Teil der Schicht mit der Intensivierung der Segregation der Teilchen in erster Linie in der Größe beitragen. Niedrige Frequenzschwankungen führen zu einer Erhöhung der strukturellen Heterogenität der Strömung bei relativ hohen Werten der Porosität und stellen Bedingungen für die Quasidiffusionstrennung von Partikeln (Migration) nach Größe, Dichte und Rauheit ohne Dominanz ihrer Größenunterschiede bereit.

Influence de la fréquence des vibrations de la descente sur les caractéristiques de la structure et les effets de la séparation des particules dans le flux de gravité rapide

Résumé: Sont réalisées les études expérimentales et analytiques de l'influence des oscillations à haute et basse fréquence sur les profils de porosité et les distributions de particules hétérogènes dans le flux rapide de gravité des matériaux poreux. L'étude est réalisée avec l'utilisation des mélanges binaires de particules qui varient en taille, densité et rugosité. Est constaté que les oscillations à haute fréquence de la descente contribuaient à la formation d'un plateau avec une concentration relativement élevée de la phase solide dans la couche centrale avec une intensification de la ségrégation des particules principalement par la taille. Les oscillations à basse fréquence augmentent l'hétérogénéité structurelle du flux lors de la porosité relativement élevée et offrent des conditions pour la séparation à quasidiffusion des particules (migration) par la taille, la densité et la rugosité sans domination de leur différence par la taille.

Авторы: *Куди Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Тувев Максим Алексеевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Долгуни Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.