

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННОГО ПОТОКА ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТЫ СЕПАРАЦИИ ПО РАЗМЕРУ И ПЛОТНОСТИ

О. О. Иванов¹, А. Г. Тараканов², К. А. Куди³, В. Н. Долгунин²

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» (2),
dolgunin-vn@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
КБ «Ренессанс Кредит» (ООО) (3), Тамбов, Россия*

Ключевые слова: гравитационное течение; зернистый материал; математическое моделирование; сепарация по размеру и плотности.

Аннотация: Математическая модель динамики сепарации частиц по размеру и плотности в быстром гравитационном потоке использована для исследования влияния его структурных и кинематических характеристик на эффективность процесса. Установлено, что эффективность сепарации примеси крупных частиц возрастает с увеличением скорости сдвига, достигая предельных значений при скорости сдвиговой деформации $(80 \pm 5) \text{ с}^{-1}$. Это объясняется доминированием сегрегации при высоких значениях скорости сдвига и концентрации твердой фазы, которое постепенно переходит к квазидиффузионным эффектам сепарации и перемешивания с возрастанием объемной доли пустот в потоке. Исследовано влияние неоднородности распределения концентрации твердой фазы для различных вариантов формы профилей распределений в сдвиговом потоке на интенсивность сепарации по плотности. Установлено, что наиболее высокая эффективность сепарации по плотности достигается при формировании в потоке параболического вогнутого профиля концентрации твердой фазы в результате возрастания движущей силы квазидиффузионной сепарации и встречного направления потоков сепарации в центральную часть слоя.

Технологии зернистых материалов в промышленности и сельском хозяйстве, в общем случае, сопряжены с осуществлением процессов переработки и операций транспортирования, которые сопровождаются взаимным перемещением неоднородных частиц. Взаимодействия неоднородных частиц в режиме относительных перемещений приводят к их упорядоченному перераспределению в технологическом потоке по сходственным свойствам. Соответствующий физический эффект, играющий важную роль в технологии зернистых материалов, называют сегрегацией, а технологические потоки, в которых вследствие сегрегации сформированы области с высокой концентрацией частиц со сходственными свойствами, – сегрегированными [1, 2]. Таким образом, сегрегированные потоки представляют собой некоторую совокупность элементарных сегрегированных потоков, каждый из которых характеризуется повышенным содержанием частиц определенного свойства.

В соответствии со спецификой физико-механических свойств частиц элементарных сегрегированных потоков они приобретают специфические реологические свойства, которые обеспечивают их перемещение в определенной зоне рабочего объема оборудования при характерных параметрах гидродинамической структу-

ры потоков – среднем значении и дисперсии распределения времени пребывания. Вследствие формирования сегрегированных потоков, технологическая обработка неоднородных частиц осуществляется в различных условиях, отличающихся интенсивностью, временем и однородностью технологического воздействия [3 – 5]. Если технологическим эффектом от формирования сегрегированных потоков пренебречь не представляется возможным, то возникает технологическая целесообразность оказания воздействия на процесс их формирования. В зависимости от того, является ли технологический эффект от формирования сегрегированных потоков негативным или желательным, следует стремиться либо к подавлению, либо интенсификации сегрегации.

Физические механизмы и кинетика сегрегации принципиально зависят от условий взаимодействия частиц [6]. Вследствие этого, представляется возможным воздействовать на эффекты сегрегации путем изменения условий взаимодействия частиц в технологических потоках. В рамках настоящей работы проводится поиск путей решения такого рода задачи для одного из технологически важных случаев технологического потока.

Наиболее общим случаем формирования условий для яркого проявления сегрегации характеризуются быстрые гравитационные течения [7]. Такого рода течения формируются на естественных откосах несвязных зернистых материалов в машинах и аппаратах, силосах, бункерах и буртовых хранилищах, на вибрационных и гравитационных технологических и транспортирующих скалах и др. Характерная особенность такого рода течений – взаимодействие частиц в режиме быстрой сдвиговой деформации, происходящей под воздействием гравитации. В таких условиях напряжения генерируются преимущественно под действием ударных импульсов, которыми обмениваются частицы, взаимодействуя друг с другом через поверхность сдвига. При этом частицы имеют кроме скорости поступательного перемещения в направлении сдвига ярко выраженную хаотически распределенную в пространстве скорость флуктуаций. Скорость флуктуаций вызывает дилатансию среды и во многом определяет ее реологические (вязкостные) свойства в состоянии быстрого сдвига, обнаруживая определенную аналогию с газом. В связи с этим зернистые материалы в условиях быстрого сдвигового течения часто называют «газом твердых частиц» [8].

Перечисленные особенности быстрых гравитационных течений позволили адаптировать для описания их динамики основные положения молекулярно-кинетической теории плотного газа [9] и на ее базе сформулировать уравнение состояния зернистой среды в условиях быстрого гравитационного сдвига. Уравнение состояния [10] описывает взаимосвязь между дилатансией $\bar{\varepsilon}$, отражающей относительное увеличение доли свободного объема в зернистой среде под воздействием сдвиговой деформации, «температурой» зернистой среды E , представляющей собой кинетическую энергию частиц в их взаимных перемещениях, и литостатическим давлением p

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

где χ – коэффициент уравнения состояния зернистой среды при быстром гравитационном сдвиге, зависящий от физико-механических свойств частиц [7].

Дилатансия потока $\bar{\varepsilon}$ в расчете на единицу объема твердой фазы определяется выражением

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0}, \quad (2)$$

где ε , ε_0 – локальное значение объемной доли пустот в слое в условиях сдвиговой деформации и объемная доля пустот для слоя в состоянии покоя соответственно.

В рамках решаемой задачи температуру зернистой среды представляется возможным выразить в классическом варианте ее представления [8] как энергию хаотических колебаний частиц ($\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-2}$):

$$E = \frac{\pi d^3}{12} \rho (V')^2, \quad (3)$$

где V' – скорость флуктуаций частиц, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; d – диаметр частиц, м; ρ – плотность частиц, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Скорость флуктуаций частиц определяется как функция частоты f , с^{-1} , столкновений частиц, участвующих в переносе импульса через поверхность сдвига [7, 10], и среднего расстояния s , м, между частицами слоя

$$(V')^2 = (2 f s)^2 = \Phi \left(\frac{du_x}{dy} \right)^2, \quad (4)$$

где u_x – среднее значение скорости перемещения частицы в направлении сдвига x , $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; y – декартова координата в направлении основания потока; Φ – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств частиц; du_x/dy – скорость сдвиговой деформации в гравитационном потоке, с^{-1} .

Литостатическое давление p , $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$, вычисляется следующим образом:

$$p(y) = \int_{h-y}^h \rho(y) (1 - \varepsilon(y) g \cos \alpha) dy, \quad (5)$$

где h – высота слоя, м; α – угол наклона ската к горизонту; g – гравитационное ускорение, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$.

С учетом выражений (3), (4) представляется возможным заменить температуру зернистой среды E в уравнении состояния зернистого материала в условиях быстрой сдвиговой деформации (1) ее функционалом, включающим скорость сдвиговой деформации в качестве параметра состояния среды,

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Psi \left(\frac{du_x}{dy} \right)^2}{p}, \quad (6)$$

где Ψ – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств частиц.

Уравнение состояния (6) определяет взаимную корреляцию распределений скорости и концентрации твердой фазы в быстром гравитационном потоке и позволяет по одному из названных распределений определять другое распределение. Поскольку коэффициент Ψ в уравнении (6) можно принять независимым от структурно-кинематических параметров потока в достаточно широком диапазоне их изменения [11], то в результате обеспечиваются условия для проведения на его базе виртуального вычислительного эксперимента по исследованию влияния условий гравитационного течения на эффекты сепарации.

Виртуальный эксперимент проведен на базе общего уравнения динамики сепарации [7], которое учитывает сегрегацию как один из эффектов сепарации, наряду с эффектом квазидиффузионной сепарации, а также потоки конвекционного и квазидиффузионного перемешивания. Для случая двухмерного гравитационного течения уравнение описывает динамику поля концентрации контрольного компонента $c(x, y, \tau)$

$$\frac{\partial c(x, y, \tau) \rho_b}{\partial \tau} = -\frac{\partial \text{disc} \rho_b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho_b \left(D_{\text{dif}} \frac{\partial c}{\partial y} - D_m c \frac{\partial \ln s}{\partial y} - K \Delta M c \right) \right), \quad (7)$$

где $\rho_b = \rho(1 - \varepsilon(y))$ – насыпная плотность частиц; D_{dif} и D_m – кинетические коэффициенты соответственно квазидиффузионного перемешивания и квазидиффузионной сепарации (миграции), которые определяются аналитически, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$; K – коэффициент сегрегации, $(\text{Н} \cdot \text{с})^{-1}$; ΔM – вычисляемая аналитически движущая сила сегрегации, $\text{Н} \cdot \text{м}$ [6, 7]. Коэффициент сегрегации K является единственной кинетической характеристикой уравнения (7), которая определяется экспериментально [6, 7] в виде константы для достаточно широкого диапазона изменения свойств частиц.

Начальные и граничные условия для уравнения динамики сепарации (6) формулируются в следующем традиционном виде [6, 7]:

$$D_{\text{dif}} \frac{\partial c}{\partial y} = c D_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} = K_s c \Delta M \Big|_{y=0, h} = 0; \quad (8)$$

$$c(0, t, y) = c_0, \quad c(t, 0, y) = c_0, \quad (9)$$

где c_0 – среднее значение концентрации контрольного компонента в потоке, $\text{кг}/\text{кг}$.

Согласно результатам исследования [6] процесс сепарации примеси крупных частиц протекает при определяющем значении эффекта сегрегации в соответствии с механизмом гидромеханического разделения, интенсивность которого определяется скоростью сдвига. Сепарация примеси частиц по плотности осуществляется при доминирующем значении эффекта миграции (квазидиффузионной сепарации) [6, 12]. Интенсивность квазидиффузионной сепарации определяется градиентом объемной доли твердой фазы в гравитационном потоке. Характер распределений скорости сдвига и объемной доли твердой фазы в потоке зернистой среды определяется с использованием уравнения состояния (6), которое позволяет в виртуальном эксперименте произвольным образом варьировать одним из распределений в гравитационном потоке и определять соответствующее ему распределение другого параметра.

Исследование влияния структурных и кинематических параметров гравитационного потока зернистого материала на эффекты сепарации по размеру и плотности проведено при использовании в качестве базового варианта параметров полученных экспериментальным методом [6] профилей скорости $u(y)$ и объемной доли твердой фазы $v(y)$ бинарной смеси стеклянного бисера (рис. 1).

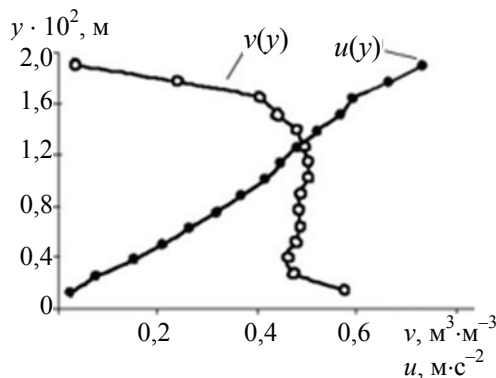


Рис. 1. Профили осредненных значений поступательной скорости $u(y)$ и объемной доли твердой фазы $v(y)$ в быстром гравитационном потоке на шероховатом скате для бисера с фракционным составом +3,25–3,5 мм (88 %) и +3,6–3,75 мм (12 %)

Исследование влияния скорости сдвига на сепарацию частиц по размеру в гравитационном потоке проводили, задаваясь виртуальными профилями продольной скорости перемещения частиц на шероховатом скате. При этом исходили из экспериментального профиля скорости (рис. 2, *a*), но в целях внесения определенности в задачу исследования скорость сдвига принималась постоянной по высоте слоя. Далее с использованием уравнения (6) определяли профили объемной доли твердой фазы, соответствующие назначенным профилям скорости (рис. 2, *b*).

На базе установленных структурных и кинематических параметров гравитационного потока с использованием уравнения (7) при граничных и начальных условиях (8) и (9) проводилось моделирование динамики сепарации частиц. Моделирование осуществлялось путем интегрирования уравнения (7) численным методом с использованием конечно-разностной схемы Кранка–Николсон [13]. Для анализа степени влияния различных эффектов сепарации на динамику процесса моделирование проводилось по трем вариантам: 1) с учетом только эффекта квазидиффузионной сепарации; 2) с учетом только эффекта сегрегации; 3) при комплексном учете названных эффектов сепарации. Эффективность сепарации оценивалась путем определения неоднородности распределения контрольного компонента в потоке, которая выражалась с использованием коэффициента вариации:

$$V = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{\sum u_i (1 - \varepsilon_i) \rho_i(c) \Delta H_i}{\sum u_i (1 - \varepsilon_i) \rho_i(c) \Delta H_i} (c_i - \bar{c})^2}, \quad (10)$$

где \bar{c} , c_i – средние значения концентрации контрольного компонента в потоке и в его i -м подслое соответственно, кг/кг; u_i – среднее значение продольной скорости частиц i -го подслоя потока, м/с; ρ_i – средняя плотность частиц в i -м подслое потока материала, кг/м³; ΔH_i – толщина i -го подслоя, м.

Зависимость коэффициента вариации V в распределении концентрации крупных частиц модельной смеси от скорости сдвига в быстром гравитационном потоке при инвариантной толщине слоя представлена на рис. 3. Полученная зависимость $V = f(du/dy)$ обнаруживает ярко выраженный максимум при скорости сдвиговой деформации, равной $(80 \pm 5) \text{ с}^{-1}$.

Наличие экстремальных значений коэффициента вариации распределения концентрации различных по размеру частиц в потоке позволяет объяснить варианты моделирования динамики процесса с альтернативным учетом того или иного

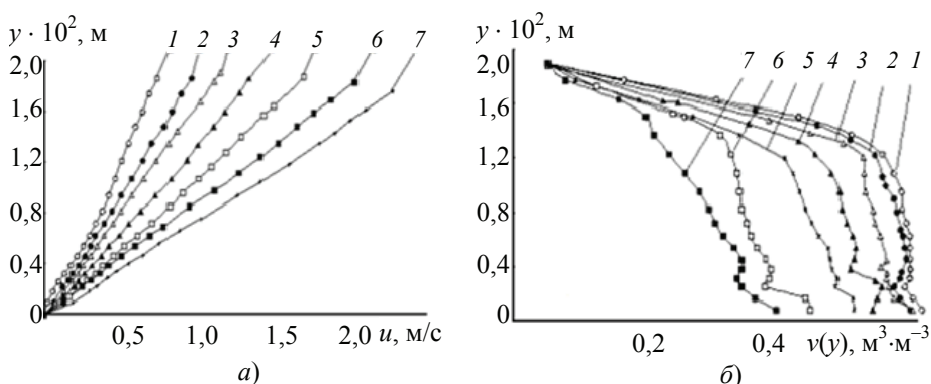


Рис. 2. Экспериментальные (1) и виртуальные (2 – 7) профили осредненных значений поступательной скорости (*a*) и объемной доли твердой фазы (*b*) в быстром гравитационном потоке бисера при средних значениях скорости сдвига du/dy , с^{-1} : 1 – 40; 2 – 50; 3 – 60; 4 – 70; 5 – 80; 6 – 95; 7 – 110

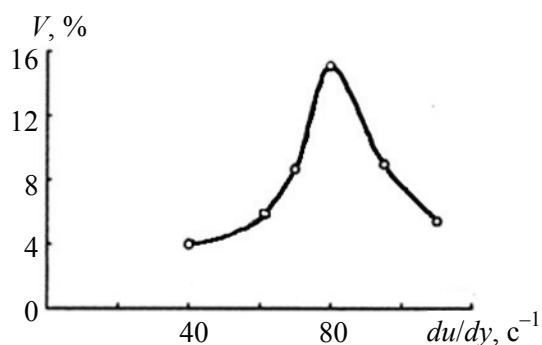


Рис. 3. Коэффициент вариации состава бидисперсной смеси частиц бисера как функция скорости сдвига в быстром гравитационном потоке

эффекта сепарации. Результаты моделирования свидетельствуют, что увеличение коэффициента вариации с увеличением скорости сдвига на восходящем участке кривой происходит вследствие доминирования в соответствующих условиях эффекта сегрегации. Снижение коэффициента вариации при дальнейшем увеличении скорости сдвига объясняется переходом доминирующей роли от сегрегации к квазидиффузионной сепарации, который вызван интенсификацией квазидиффузионных процессов с увеличением объемной доли пустот при высоких скоростях сдвига [14].

Вычислительный эксперимент по исследованию влияния структурных и кинематических параметров гравитационного потока на динамику сепарации частиц по плотности проведен с использованием монодисперсной смеси частиц размером 3,375 мм, состоящую из двух фракций плотностью 2500 кг/м³ (88 %) и плотностью 4000 кг/м³ (12 %). Результаты исследования, полученные в работах [6, 14, 15], свидетельствуют о доминирующей роли эффекта квазидиффузионной сепарации в процессе сепарации частиц по плотности в быстром гравитационном потоке. Поскольку движущей силой квазидиффузионной сепарации является градиент среднего расстояния между частицами в потоке, то в качестве варьируемой характеристики гравитационного течения в исследовании выбрана форма профиля неоднородности распределения твердой фазы и параметры распределения. В эксперименте использованы профили распределения объемной доли твердой фазы трех типов: 1) гиперболические (рис. 4); 2) параболические вогнутые (рис. 5); 3) параболические выпуклые (рис. 6). Для названных профилей с различными градиентами объемной доли твердой фазы с использованием уравнения (6) получены соответствующие профили скорости частиц в направлении сдвига. На рисунках 4 – 6 представлены совокупности профилей, характеризующих структурно-кинематические свойства быстрых гравитационных течений зернистого материала, для трех вышеназванных форм распределений объемной доли твердой фазы.

С использованием совокупности профилей (см. рис. 4 – 6) определялись структурно-кинематические параметры гравитационных потоков, и на базе уравнения (7) при граничных и начальных условиях (8) и (9) моделировалась динамика сепарации частиц по плотности. Моделирование проводилось путем интегрирования уравнения (7) численным методом с использованием конечно-разностной схемы Кранка–Николсон [13]. В целях анализа степени влияния различных эффектов сепарации на динамику процесса моделирование проводилось по трем вариантам: 1) с учетом только эффекта квазидиффузионной сепарации; 2) с уче-

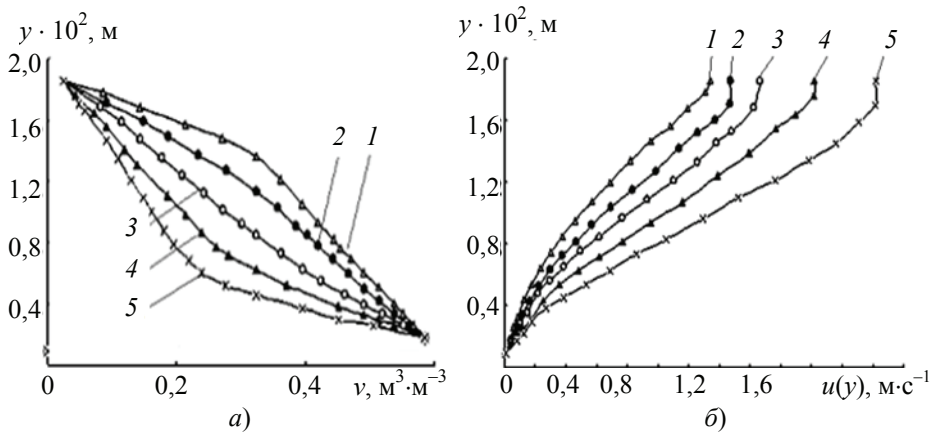


Рис. 4. Виртуальные профили объемной доли твердой фазы $v(y)$ гиперболической формы (а) и осредненных значений поступательной скорости $u(y)$ (б) в быстром гравитационном потоке бисера при $v(y)$ в центральной части слоя, равной: 1 – 0,44; 2 – 0,375; 3 – 0,3; 4 – 0,23; 5 – 0,175

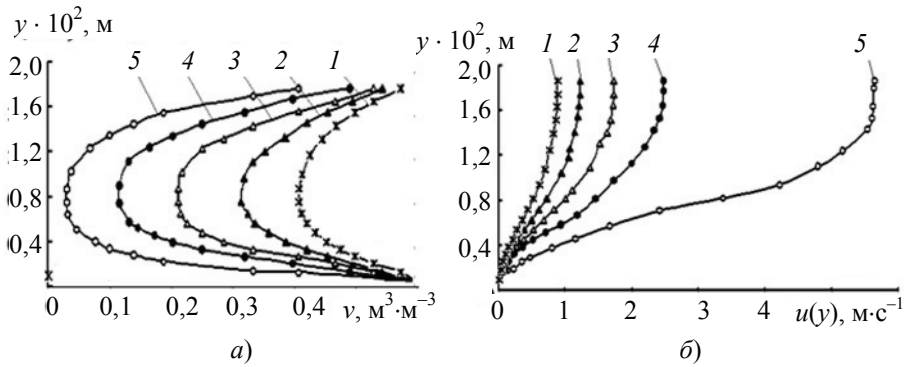


Рис. 5. Виртуальные профили объемной доли твердой фазы $v(y)$ параболической вогнутой формы (а) и осредненных значений поступательной скорости $u(y)$ (б) в быстром гравитационном потоке бисера при $v(y)$ в центральной части слоя, равной: 1 – 0,4; 2 – 0,3; 3 – 0,2; 4 – 0,1; 5 – 0,01

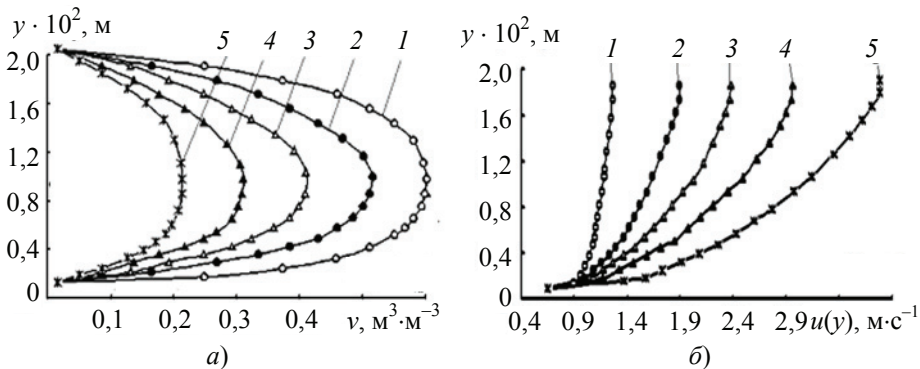


Рис. 6. Виртуальные профили объемной доли твердой фазы $v(y)$ параболической выпуклой формы (а) и осредненных значений поступательной скорости $u(y)$ (б) в быстром гравитационном потоке бисера при $v(y)$ в центральной части слоя, равной: 1 – 0,58; 2 – 0,5; 3 – 0,4; 4 – 0,3; 5 – 0,2

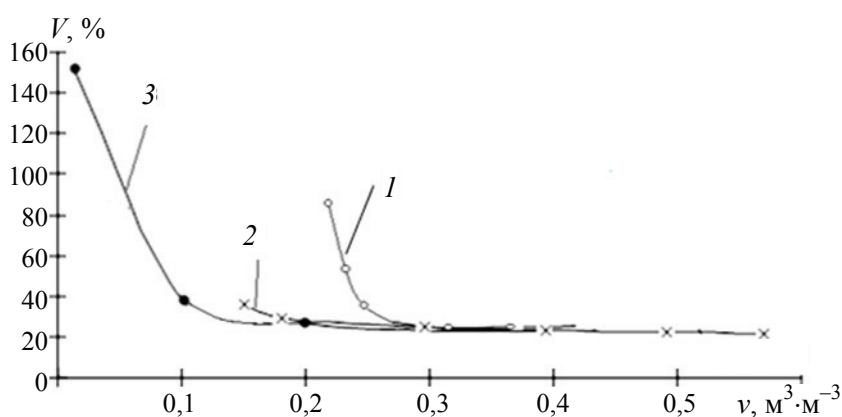


Рис. 7. Коэффициент вариации как функция объемной доли твердой фазы в центральной части слоя для трех типов профилей ее распределений в потоке:
 1 – гиперболический; 2 – параболический выпуклый; 3 – параболический вогнутый

том только эффекта сегрегации; 3) при комплексном учете названных эффектов сепарации. В результате установлено, что во всех случаях моделирования доминирующая роль в процессе сепарации по плотности принадлежит эффекту квазидиффузионной сепарации.

По результатам моделирования распределений концентрации неоднородных частиц, рассчитаны коэффициенты вариации концентрации по формуле (7), которые использованы для характеристики эффективности сепарации. Зависимости коэффициента вариации от объемной доли твердой фазы в центральной части потока для трех форм профилей ее распределений приведены на рис. 7.

Полученные результаты позволяют сделать однозначный вывод о том, что для всех форм профилей распределений объемной доли твердой фазы увеличение градиента концентрации твердой фазы сопровождается возрастанием коэффициента вариации. Это является еще одним подтверждением доминирующей роли эффекта квазидиффузионной сепарации в формировании распределений концентрации частиц различной плотности в широком диапазоне изменения структурно-кинематических параметров быстрых гравитационных течений. Наиболее высокая неоднородность распределения концентрации частиц различной плотности в гравитационном потоке (коэффициент вариации) наблюдается при параболическом вогнутом профиле распределения объемной доли твердой фазы, а наименьшая – при параболическом выпуклом. Наблюдаемый эффект, очевидно, связан с противоположным направлением градиента объемной доли твердой фазы в случаях выпуклого и вогнутого профилей распределений. Поскольку средние по объему слоя значения движущей силы квазидиффузионной сепарации, пропорциональные градиенту объемной доли твердой фазы, примерно одинаковы для случаев выпуклого и вогнутого профилей, то причиной различной кинетики может быть различная диффузионная проницаемость среды в альтернативных условиях ее течения. Диффузионная проницаемость среды пропорциональна скорости флуктуаций частиц и среднему расстоянию между ними (дилатансии) [9]. Поскольку скорость флуктуаций частиц в сдвиговом потоке пропорциональна скорости сдвига, а дилатансия среды увеличивается пропорционально квадрату скорости сдвига (6), то, согласно профилям скорости, представленным на рис. 5 и 6, более высокой склонностью к диффузионному прониканию характеризуется поток с параболическим вогнутым профилем объемной доли твердой фазы.

Полученные результаты исследования позволяют использовать их в качестве научной базы для разработки технологических решений по организации процессов переработки зернистых материалов. В зависимости от отличительных свойств частиц и их концентрации в смеси, определяются гидродинамические условия их взаимодействия в быстром гравитационном потоке, обеспечивающие достижение необходимого технологического эффекта.

Список литературы

1. Иванов, О. О. Управление сегрегированными потоками сыпучих материалов для их обработки методами разделения и соединения / О. О. Иванов, В. А. Пронин, Е. А. Рябова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 397 – 410. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410
2. Dolgunin, V. N. Characteristics of Continuous Granular Materials Mixer with Pulse Action on Segregated Flow of Batch-Dosed Component / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, V. A. Pronin, E. A. Ryabova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 54, No. 3-4. – P. 143 – 149. doi:10.1007/s10556-018-0453-8
3. Долгунин, В. Н. К разработке технологии и аппаратурного оформления производства субстрата из целлюлозосодержащего сырья / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 595 – 602. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602
4. Долгунин, В. Н. Кинетические закономерности биоконверсии целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры микроскопического гриба / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 3. С. 393 – 401. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401
5. Долгунин, В. Н. Кинетика и гидродинамические условия твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме / В. Н. Долгунин, Д. А. Власов, В. А. Пронин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 269 – 278. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.269-278
6. Долгунин, В. Н. Структурная неоднородность и эффекты сепарации по размеру и плотности при гравитационном течении зернистых материалов / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди, А. Г. Тараканов // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 2. – С. 492 – 503.
7. Долгунин, В. Н. Механизмы и кинетика гравитационной сепарации гранулированных материалов / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди, М. А. Туев // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190, № 6. – С. 585 – 604. doi: 10.3367/UFN.2020.01.038729
8. Brennen, C. E. Fundamentals of Multiphase Flows. – Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – 410 p. doi: 10.1017/CBO9780511807169
9. Ferziger, J. H. Mathematical Theory of Transport Processes in Gases / J. H. Ferziger, H. G. Kaper. – Amsterdam : North-Holland Publ., 1972. – 568 p.
10. Dolgunin, V. N. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles / V. N. Dolgunin, A. N. Kudi, A. A. Ukolov, M. A. Tudev // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – Vol. 122, No. 5. – P. 22 – 32. doi: 10.1016/j.cherd.2017.03.038
11. Борщев, В. Я. Феноменологический анализ взаимодействия неэластичных несвязных частиц в быстром гравитационном потоке / В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин, П. А. Иванов // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – Т. 42, № 3. – С. 343 – 347
12. Dolgunin, V. N. Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // Powder Technology. 1998. – Vol. 96, No. 3. – P. 211 – 218. doi: 10.1016/S0032-5910(97)03376-7

13. Marchuk, G. I. *Methods of Numerical Mathematics. Applications of Mathematics 2*. Berlin – Heidelberg – New York : Springer-Verlag, 1975. XII. – 316 p.

14. Куди, А. Н. Мультифракционное сепарирование различающихся по форме и плотности полидисперсных частиц / А. Н. Куди, Н. А. Федосов, В. В. Сергеев, А. Г. Тараканов, В. А. Пронин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.* – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 285 – 293. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.285-293

15. Dolgunin, V. N. Organization of Mixing Process of Granular Materials with Portion Dosage of Some Components / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, A. A. Ukolov, V. A. Pronin, E. A. Ryabova // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та.* – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 108 – 114.

The Influence of the Structural and Kinematic Characteristics of the Gravitational Flow of a Grain Medium on the Effects of Separation by Size and Density

O. O. Ivanov¹, A. G. Tarakanov², K. A. Kudi³, V. N. Dolgunin²

*Department of Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries (2),
dolgunin-vn@yandex.ru, TSTU, Tambov, Russia;
CB “Renaissance Credit” (LLC) (3), Tambov, Russia*

Keywords: gravitational flow; granular material; math modeling; separation by size and density.

Abstract: A mathematical model of the dynamics of separation of particles by size and density in a fast gravitational flow is used to study the influence of its structural and kinematic characteristics on the efficiency of the process. It has been established that the separation efficiency of coarse particles increases with increasing shear rate, reaching limiting values at a shear strain rate of $(80 \pm 5) \text{ s}^{-1}$. This is explained by the dominance of segregation at high values of shear rate and solid phase concentration, which gradually passes to quasi-diffusion effects of separation and mixing with an increase in the volume fraction of voids in the flow. The influence of the inhomogeneity of the distribution of the concentration of the solid phase for various variants of the shape of the distribution profiles in the shear flow on the density separation intensity is studied. It has been established that the highest density separation efficiency is achieved when a parabolic concave solid phase concentration profile is formed in the flow as a result of an increase in the driving force of quasi-diffusion separation and the opposite direction of separation flows to the central part of the layer.

References

1. Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova Ye.A. [Control of segregated flows of bulk materials for their processing by separation and connection methods], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 397-410. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410 (In Russ., abstract in Eng.).

2. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova E.A. Characteristics of continuous granular materials mixer with pulse action on segregated flow of batch-dosed component, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 54, No. 3-4, pp. 143-149. doi:10.1007/s10556-018-0453-8

3. Dolgunin V.N., Slepikh A.V., Pronin V.A. [On the development of technology and instrumentation for the production of a substrate from cellulose-containing raw materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 595-602. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602 (In Russ., abstract in Eng.).

4. Dolgunin V.N., Slepikh A.V., Pronin V.A. [Kinetic patterns of bioconversion of cellulose-containing raw materials using a microscopic fungus culture], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 393-401. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401 (In Russ., abstract in Eng.).
5. Dolgunin V.N., Vlasov D.A., Pronin V.A. [Kinetics and hydrodynamic conditions of solid-phase bioconversion of cellulose-containing raw materials in static-dynamic mode], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 269-278. doi: 10.17277/vestnik.2022.02.pp.269-278 (In Russ., abstract in Eng.).
6. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Tarakanov A.G. Structural Inhomogeneity and Effects of Separation by Size and Density in Gravity Flow of Granular Materials, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 2, pp. 484-494. doi: 10.1007/s10891-022-02505-y
7. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Tuev M.A. Mechanisms and Kinetics of Gravity Separation of Granular Materials, *Physics-Uspexhi*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 545-561. doi: 10.3367/UFNe.2020.01.038729
8. Brennen C. E. *Fundamentals of Multiphase Flows*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005, 410 p. doi: 10.1017/CBO9780511807169
9. Ferziger J.H., Kaper H.G. *Mathematical Theory of Transport Processes in Gases*, Amsterdam: North-Holland Publ., 1972, 568 p.
10. 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, vol. 122, no. 5, pp. 22-32. doi: 10.1016/j.cherd.2017.03.038
11. Borschov V.Ya., Dolgunin V.N., Ivanov P.A. Phenomenological Analysis of the Interaction of Nonelastic Incoherent Particles in a Rapid Gravity Flow, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2008, vol. 42, no. 3, pp. 331-335. doi: 10.1134/S0040579508030147
12. 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, no. 3, pp. 211-218. doi: 10.1016/S0032-5910(97)03376-7
13. Marchuk G. I. *Methods of Numerical Mathematics. Applications of Mathematics 2*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1975. XII. 316 p.
14. Kudi A.N., Fedosov N.A., Sergeev V.V., Tarakanov A.G., Pronin V.A. [Multifractional separation of polydisperse particles differing in shape and density], 2021, vol. 27, no. 2, pp. 285-293. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.285-293 (In Russ., abstract in Eng.).
15. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A., Pronin V.A., Ryabova E.A. Organization of mixing process of granular materials with portion dosage of some components, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 108-114. (abstract in Russ.).

Einfluss der strukturellen und kinematischen Eigenschaften der Gravitationsströmung des Kornmediums auf die Auswirkungen der Trennung nach Größe und Dichte

Zusammenfassung: Das mathematische Modell der Dynamik der Trennung von Partikeln nach Größe und Dichte in einer schnellen Gravitationsströmung ist verwendet, um den Einfluss seiner strukturellen und kinematischen Eigenschaften auf die Effizienz des Prozesses zu untersuchen. Es ist festgestellt, dass die Separierungsleistung von großen Partikeln mit zunehmender Schergeschwindigkeit zunimmt und bei der

Scherverformungsgeschwindigkeit von $(80 \pm 5) \text{ s}^{-1}$ Grenzwerte erreicht. Dies erklärt sich durch die Dominanz der Segregation bei hohen Werten der Schergeschwindigkeit und Festphasenkonzentration, die allmählich zu Quasi-Diffusionseffekten der Trennung und Vermischung mit einer Zunahme des Volumenanteils von Hohlräumen in der Strömung übergeht. Es ist der Einfluss der Inhomogenität der Konzentrationsverteilung der Festphase für verschiedene Varianten der Form der Verteilungsprofile in der Scherströmung auf die Intensität der Dichtentrennung untersucht. Es ist festgestellt, dass die höchste Dichteabscheidungseffizienz bei der Bildung in dem Strom des parabolischen konkaven Profils der Festphasenkonzentration infolge der Erhöhung der Antriebskraft der Quasidiffusionsabscheidung und der entgegengesetzten Richtung der Trennströme in den zentralen Teil der Schicht erreicht wird.

Influence des caractéristiques structurelles et cinématiques du flux gravitationnel du milieu granulaire sur les effets de séparation en taille et en densité

Résumé: Pour étudier l'influence de ses caractéristiques structurelles et cinématiques sur l'efficacité du processus est utilisé le modèle mathématique de la dynamique de séparation des particules en termes de mesure et de densité dans un flux gravitationnel rapide. Est établi que l'efficacité de la séparation des impuretés de grosses particules augmente avec l'augmentation du taux de cisaillement, atteignant les valeurs limites à un taux de déformation au cisaillement $(80 \pm 5) \text{ s}^{-1}$. Cela s'explique par la prédominance de la ségrégation à des taux de cisaillement élevés et à la concentration en phase solide, qui passe progressivement aux effets de quasi-diffusion de la séparation et du mélange avec l'augmentation de la fraction volumique des vides dans le flux. Est étudié l'effet de l'hétérogénéité de la distribution de la concentration en phase solide pour de différentes variantes de la forme des profils de distribution dans le flux de cisaillement sur l'intensité de la séparation en fonction de la densité. Est établi que l'efficacité de séparation de densité la plus élevée est obtenue lors de la formation d'un profil concave parabolique de concentration en phase solide dans le flux en raison de l'augmentation de la force motrice de la séparation de quasi-diffusion et de la direction opposée des flux de séparation dans la partie centrale de la couche.

Авторы: *Иванов Олег Олегович* – кандидат технических наук, самозанятый, Тамбов, Россия; *Тараканов Александр Геннадиевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Куди Константин Андреевич* – главный финансовый аналитик, КБ «Ренессанс Кредит» (ООО), Тамбов, Россия; *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.