

УПРАВЛЕНИЕ СЕГРЕГИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ ОБРАБОТКИ МЕТОДАМИ РАЗДЕЛЕНИЯ И СОЕДИНЕНИЯ

О. О. Иванов¹, В. А. Пронин², Е. А. Рябова²

*Администрация Тамбовской области, г. Тамбов, Россия (1);
кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия (2);
iooc4@mail.ru*

Ключевые слова: миграция; сегрегация; сепарация; смешивание; сыпучий материал; тепломассообмен; управляемый сегрегированный поток.

Аннотация: Рассмотрены технологические проблемы сегрегации в процессах переработки сыпучих материалов и традиционные методы их преодоления. Проанализированы прогностические возможности разработанного теоретического описания эффектов сегрегации и миграции в сдвиговых потоках зернистых сред. Изложены базовые принципы управления сегрегированными технологическими потоками при организации гидромеханических и тепломассообменных процессов переработки сыпучих материалов. Приведены результаты реализации принципов на базе аппарата с вращающимся барабаном, снабженным периферийными подъемными лопастями. Проанализирована специфика сегрегированных потоков в засыпке в нижней части барабана и падающем слое частиц. Проведена оценка эффективности предложенных методов обработки зернистых материалов на примерах управления распределениями времени пребывания неоднородных частиц в аппарате, сепарации частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств, и периодического смешивания компонентов с высокой склонностью к сегрегации.

Обозначения

c – концентрация контрольного компонента, $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$;
 D_{dif} – коэффициент квазидиффузионного перемешивания, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$;
 \bar{d} – средний диаметр частиц, м ;
 F – частота столкновений частиц, с^{-1} ;
 \vec{j}_m , \vec{j}_s и \vec{j}_{mg} – потоки перемешивания, сегрегации и миграции соответственно;
 K_s – коэффициент сегрегации, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$;

k – среднее значение коэффициента восстановления при соударении частиц;
 m – масса частиц, кг ;
 \bar{s} – среднее расстояние между частицами, м ;
 u – скорость потока, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$;
 \bar{v}' – средняя скорость хаотических перемещений частиц, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$;
 x, t, z – декартовы координаты, м ;
 ΔM – движущая сила сегрегации, $\text{Н}\cdot\text{м}$;
 ε_0 – порозность частиц, $\text{м}^3\cdot\text{м}^{-3}$;
 ρ_b – насыпная плотность потока, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Введение

Глобальным фактором, определяющим комплекс технологических проблем, которыми сопровождаются технологические процессы переработки, транспортирование и хранение сыпучих материалов, является сегрегация [1]. Под сегрегаци-

ей понимают комплекс эффектов разделения неоднородных частиц, обусловленных их взаимодействием в поле инерционных сил. Такое определение не является бесспорным, но позволяет позиционировать сегрегацию в ряду других аналогичных эффектов, например, гидро-пневмосепарации, квазидиффузионного разделения, электромагнитной сепарации и др.

Необходимым условием проявления эффектов сегрегации является возможность взаимного перемещения частиц, которая сопровождается спонтанным образованием сегрегированных технологических потоков, локализованных в отдельных зонах объема среды. Наличие данных потоков приводит к тому, что различающиеся по свойствам частицы перемещаются в их частях с характерными гидродинамическими условиями и режимными параметрами процесса. Спонтанный неконтролируемый характер перераспределения неоднородных частиц в рабочем объеме среды и является причиной многих технологических, экологических проблем и снижения качества продукта.

Проблемы сегрегации решают с использованием методов и технических средств, либо снижающих склонность материалов к сегрегации, либо непосредственно разрушающих сегрегированные потоки. Однако такие подходы являются затратными и часто не приводят к радикальному решению проблем. Например, снижение склонности частиц к сегрегации путем повышения их связности приводит к необходимости выполнения дополнительных, а часто, и нежелательных технологических операций введения специальных связующих добавок в сыпучий материал. Снижение же склонности материала к сегрегации путем его предварительного фракционирования с целью дальнейшей параллельной или последовательной обработки фракций сопряжено с использованием многопоточных и многоступенчатых технологических схем при более низких показателях технико-экономической эффективности производства. Разрушение сегрегированных потоков с применением специальных технических средств сопровождается дополнительными энергетическими затратами и приводит к неконтролируемому изменению характеристик структуры технологического потока.

Анализ влияния сегрегации на кинетику технологических процессов, представленный в монографиях [2, 3], показывает насколько неоднозначным может быть это влияние. Примеры ярко выраженных аспектов позитивного и негативного влияния сегрегации в рамках отдельного технологического процесса свидетельствуют о практической значимости разработки способов прогнозирования эффектов сегрегации, а также принципов технологического их использования в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства.

Изложим в обобщенном варианте вопросы теоретического описания сегрегации и технологического ее использования на базе принципа управления сегрегированными потоками [4]. В работах [4 – 9] показано, что использование названного принципа позволяет не только предотвратить негативные последствия сегрегации, но и использовать ее эффекты для организации процессов переработки сыпучих материалов методами разделения, соединения и тепломассообмена (сепарации, смешения, сушки, гранулирования, термовлажностной и термохимической обработки и т.д.).

При теоретическом описании динамики технологических потоков зернистых сред одной из основных проблем является необходимость комплексного отражения их свойств континуальности и дискретности. Эта задача решается в настоящее время с использованием методов конечных элементов и неклассической механики сыпучих сред.

В соответствии с базовыми положениями неклассической механики сыпучая среда представляется в виде континуума, динамические характеристики которого

зависят от свойств составляющих его микроэлементов и условий их взаимодействия. При описании динамики различных по своей природе эффектов взаимодействия микроэлементов в неоднородных зернистых средах [10 – 13] весьма плодотворным оказалось использование общих кинетических закономерностей процессов химических технологий. В частности, использование постулата о том, что скорость процесса пропорциональна его движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению, позволяет получить адекватное описание кинетики эффектов разделения частиц при минимальном числе кинетических параметров и определить пути их интенсификации (торможения).

Эффекты взаимодействия частиц в сдвиговых потоках зернистых сред

Разработка теоретической базы для технологического использования эффектов разделения частиц проведена с учетом того, что неизменным условием их является взаимное перемещение частиц, форма которого во многом определяет физический механизм данных явлений. Многообразие форм взаимных перемещений частиц в природных явлениях и технологических процессах является одной из основных причин существования множества физических механизмов сегрегации, число которых в отдельных вариантах их классификации достигает двух десятков [1]. Представляется целесообразной разработка теоретических основ сегрегации для наиболее общих форм взаимных перемещений частиц. Наиболее абстрактной формой взаимных перемещений частиц не только в технологических процессах и аппаратах, но и в природных явлениях является сдвиговое течение. При разработке теоретических основ эффектов разделения частиц в качестве базового условия их взаимодействия приняты условия сдвигового течения зернистой среды.

Общее уравнение динамики объемного распределения частиц одного из компонентов в потоке неоднородной зернистой среды записано на базе общего уравнения переноса субстанции [14]. Распределение частиц смоделировано как результат суммарного воздействия на них потоков конвекционного переноса, перемешивания и разделения в сдвиговом потоке.

Установлено, что потоки разделения компонентов зернистой среды возникают вследствие двух факторов ее неоднородности: локальной неоднородности состава среды и пространственной неоднородности распределения твердой фазы [11, 13]. Необходимым условием разделения частиц вследствие локальной неоднородности среды является гравитационное воздействие. В условиях же пространственной неоднородности среды взаимодействие неоднородных частиц сопровождается эффектом разделения вне зависимости от гравитационного воздействия. Вследствие принципиально различной физической природы эффектов разделения, вызванных локальной и пространственной неоднородностью среды, представляется целесообразным позиционировать их как оригинальные эффекты сегрегации и миграции соответственно.

Уравнение динамики пространственного распределения контрольного компонента смеси зернистых частиц во времени $c(t, x, y, z)$ записано в форме общего уравнения переноса субстанции [14] с учетом потоков конвекции, перемешивания и разделения

$$\frac{\partial(c\rho_b)}{\partial t} + \text{div}(uc\rho_b) = -\text{div}(\vec{j}_m) - \text{div}(\vec{j}_s) - \text{div}(\vec{j}). \quad (1)$$

Величина потока перемешивания \bar{j}_m с учетом его энтропийной природы определена по аналогии с таковой для потока квазидиффузионного перемешивания контрольного компонента [10]

$$\bar{j}_m = -D_{\text{dif}} \rho_b \text{grad} c. \quad (2)$$

Величина D_{dif} определена для широкого диапазона скорости хаотических перемещений частиц [10, 15] на базе молекулярно-кинетической теории газов в виде [13]

$$D_{\text{dif}} = 1/3s\bar{v}'. \quad (3)$$

Необходимое для расчета коэффициента перемешивания среднее расстояние между частицами s определяется в зависимости от размера частиц и порозности среды

$$\bar{s} = \left(\frac{b}{b_0} - 1 \right) \bar{d}, \quad (4)$$

где $b = 3\sqrt{\frac{\pi}{6(1-\varepsilon)}}$; $b_0 = b(\varepsilon_0)$; $\varepsilon_0 = 0,2595$ – порозность наиболее плотной укладки однородных по размеру частиц.

Потоки разделения (сегрегации и миграции), вызванные взаимодействием неоднородных частиц в условиях локальной и пространственной неоднородности среды, определены как произведение движущей силы и кинетического коэффициента. В соответствии с механизмом сдвиговой поточной сегрегации движущая сила сегрегации ΔM определена как избыточный (положительный или отрицательный) суммарный момент сил тяжести, трения и ударных импульсов, действующих на частицу контрольного компонента в сдвиговом потоке условно однородной зернистой среды [12]. В работах [12, 13] предложен метод определения коэффициента сегрегации K_s в гравитационном потоке на шероховатом скате. Результаты исследования свидетельствуют, что коэффициент сегрегации может быть определен как кинетическая константа для широкого диапазона параметров сдвигового течения и свойств частиц. В результате величина потока сегрегации вследствие локальной неоднородности среды определена в виде

$$\bar{j}_s = K_s c \rho_b \Delta M. \quad (5)$$

В соответствии с физической природой миграции, как эффекта квазидиффузионного разделения частиц, имеющих различную скорость хаотических перемещений, в условиях пространственной неоднородности среды, в качестве движущей силы процесса использован [10] темп изменения среднего расстояния s между частицами в направлении x потока разделения: $\partial(\ln s)/\partial x$.

Коэффициент миграции определен [13] как величина результирующего квазидиффузионного потока частиц, имеющих различные физико-механические свойства, для случая, когда $\text{grad} c = 1$. Выражение для определения коэффициента миграции частиц, вследствие их различия по размеру, плотности, упругости и шероховатости получено в виде

$$D_m = \frac{\bar{m}(c)(\bar{v}')^2}{2Fk} \left(\frac{d_1^2 k_1}{m_1 \bar{d}^2} - \frac{d_2^2 k_2}{m_2 \bar{d}^2} \right), \quad (6)$$

где $F = \bar{v}'/s$; $\bar{d} = cd_1 + (1-c)d_2$; $\bar{m}(c) = \pi/\left[(c/(d_1^3\rho_1) + (1-c)/(d_2^3\rho_2))6\right]$; d_i, k_i, m_i – диаметр, коэффициент восстановления при ударе и масса частиц i -го типа соответственно [13].

Для неоднородных по размеру, плотности, упругости и шероховатости частиц поток миграции выражен в виде

$$j = D_m c \rho_b \frac{1}{s} \text{grad} \bar{s} = c \rho_b \frac{\bar{m}(c)(v')^2}{2Fk} \left(\frac{d_1^2 k_1}{m_1 \bar{d}^2} - \frac{d_2^2 k_2}{m_2 \bar{d}^2} \right) \frac{1}{s} \text{grad} \bar{s}. \quad (7)$$

Для двумерного быстрого сдвигового течения зернистой среды уравнение, описывающее динамику изменения поля концентрации контрольного компонента $c(x, y, \tau)$ с учетом кинетических закономерностей эффектов перемешивания и разделения (3), (5) и (7), принимает вид

$$\frac{\partial(c\rho_b)}{\partial t} = -\frac{\partial(uc\rho_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho_b \left(D_{\text{dif}} \frac{\partial c}{\partial y} - cD_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} - K_s c \Delta M \right) \right]. \quad (8)$$

Граничные условия для уравнения (8) формулируются из условия отсутствия поперечных материальных потоков на верхней ($y = h$) и нижней ($y = 0$) границах движущегося слоя частиц в виде

$$D_{\text{dif}} \frac{\partial c}{\partial y} = cD_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} = K_s c \Delta M \Big|_{y=0,h} = 0. \quad (9)$$

Начальное условие в общем случае можно задать как

$$c(0, x, y) = f(x, y). \quad (10)$$

Уравнение (8) с граничными (9) и начальным (10) условиями интегрируется численным методом.

Представленное математическое описание обеспечивает возможность моделирования динамики распределения контрольного компонента в потоке смеси зернистых материалов, частицы которых различаются по комплексу физико-механических свойств (размеру, плотности, шероховатости, упругости), с использованием их традиционных характеристик. Единственной экспериментально определяемой кинетической характеристикой при этом является коэффициент сегрегации K_s [12].

Управление сегрегированными потоками как принцип организации процессов переработки зернистых материалов методами разделения и соединения

До недавнего времени в технологиях сыпучих материалов сегрегация воспринималась большинством специалистов как исключительно негативное явление, в отношении которого первостепенное внимание уделялось вопросам выявления причины и разработки способов его подавления [1–3]. Однако такая ситуация является результатом одностороннего взгляда на явление сегрегации и не располагает к поиску путей ее технологического применения.

Анализ технологических проблем, связанных с сегрегацией, показывает, что во всех случаях они являются следствием формирования сегрегированных потоков. Сегрегированные потоки, как части общего технологического потока, отличаются от него более однородным составом, занимают доминантные для них области рабочего объема и отличаются друг от друга структурными и кинематическими характеристиками. Вследствие названного комплекса отличий сегрегированных потоков происходит не только неконтролируемое изменение их структуры, но и спонтанный дрейф значений кинетических характеристик протекающих в них процессов.

На практике для предотвращения негативных последствий сегрегации идут традиционно путем разрушения сегрегированных потоков. Очевидно, что такой подход является энергозатратным и сопровождается неконтролируемыми нарушениями структуры потока и, соответственно, нежелательными технологическими эффектами. В рамках исследований, проводимых на базе межотраслевой научно-исследовательской лаборатории «Механика сдвиговых течений зернистых сред» кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета, для решения технологических проблем сегрегации предложен принцип организации технологических процессов с управляемыми сегрегированными потоками [3, 4]. В соответствии с данным принципом сегрегированные потоки образуются в результате либо спонтанного, либо искусственно инициированного проявления эффектов разделения (сегрегации и миграции) в технологических потоках. При этом управление сегрегированными потоками имеет своей целью не только предотвращение негативных последствий сегрегации, но, более того, направлено на достижение дополнительного технологического эффекта от ее применения.

С учетом широкого межотраслевого значения технологических эффектов сегрегации в настоящей работе анализируются результаты исследования, опытной апробации и технические решения различных вариантов реализации принципа управления сегрегированными потоками зернистых материалов для организации процессов в химической промышленности и сельском хозяйстве. Анализ сопровождается сравнением эффективности технических решений с реализацией и без реализации принципа управления сегрегированными потоками.

Управление сегрегированными потоками осуществляется путем избирательного воздействия на сегрегированные части технологического потока распределенными прямоточными, противоточными и поперечными импульсами при различных вариантах их сочетаний. Принцип управления сегрегированными потоками характеризуется тем преимуществом, что его реализация обеспечивает технологическую гибкость соответствующим технологическим узлам и может быть многовариантной и направленной на достижение различных и, в том числе, противоположных технологических целей при использовании единой технической базы.

К основным технологическим целям и способам их достижения путем управления сегрегированными потоками могут быть отнесены:

- дифференциация режима обработки или его унификация для неоднородных частиц с учетом их свойств путем автономного управления распределениями их времени пребывания (РВП) и размещением в рабочем объеме оборудования;
- организация процессов разделения (сепарации, классификации, калибровки) материалов по комплексу физико-механических свойств частиц (размеру, плотности, форме, шероховатости, упругости) за счет организации многоступенчатого противоточного контакта сегрегированных потоков;

- обеспечение однородного пространственного распределения неоднородных компонентов среды в рабочем объеме оборудования за счет организации взаимного объемного (продольно-поперечного) проникновения сегрегированных потоков;
- компенсация неоднородностей непрерывной подачи отдельных компонентов путем избирательного сглаживающего воздействия на их сегрегированные потоки;
- совмещение технологических процессов, интенсифицирующее переработку материалов.

В совокупности представленные варианты управления сегрегированными потоками обеспечивают многовариантную обработку сыпучих материалов методами разделения и соединения.

Примеры реализации принципа управления сегрегированными потоками и оценка их эффективности

Теория и практика позволяют утверждать [3], что сегрегированные потоки зернистых материалов интенсивно формируются в тех случаях, когда в рабочих объемах аппаратов имеют место их упорядоченные постоянные или циклически повторяющиеся сдвиговые потоки. Наглядным примером такого оборудования могут быть аппараты с вращающимся барабаном. В поперечном сечении вращающегося барабана, вне зависимости от того снабжен ли он насадочным устройством или имеет внутреннюю гладкую поверхность, циклически возникают быстрые сдвиговые гравитационные течения сыпучих материалов, которые сопровождаются интенсивно протекающими эффектами разделения неоднородных частиц.

На рисунке 1 приведена схема образования сегрегированных потоков зернистого материала в аппарате с вращающимся барабаном, снабженным периферийными подъемными лопастями. Эта конструкция является традиционной и широко используется в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, в первую очередь, для организации тепломассообменных процессов (сушки, гранулирования, термовлажностной обработки, инкрустирования, дражирования). Схема обобщает результаты исследований [16], проведенных с использованием плоской прозрачной модели аппарата и модельных материалов, различающихся по размеру и плотности частиц. Сегрегированные потоки зарождаются в сдвиговом гравитационном потоке частиц на откосе, который образуется у поверхности засыпки материала в нижней части барабана. Под действием эффектов сегрегации и миграции у открытой поверхности потока концентрируются преимущественно крупные и менее плотные частицы, в то время как вблизи основания потока скапливаются преимущественно мелкие и более плотные частицы.

В соответствии с наиболее вероятной схемой лопасти заполняются первоначально крупными и менее плотными частицами с открытой поверхности сегрегированного потока и затем более мелкими и более плотными частицами из глубинных его слоев. Процесс же образования завесы из по-

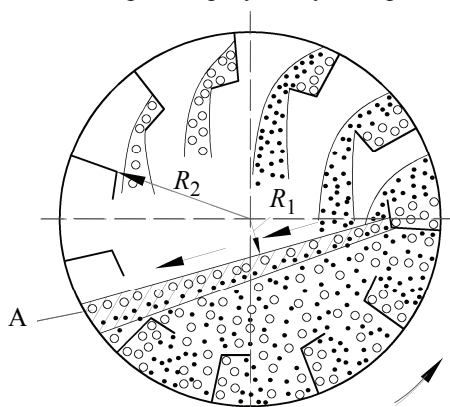


Рис. 1. Схема образования сегрегированных потоков в барабанном аппарате:

А – участок быстрого сдвигового потока неоднородных частиц

тока частиц сопровождается их падением с лопастей в обратном порядке. Первоначально с поднимающихся из засыпки лопастей ссыпаются мелкие и более плотные частицы, а затем с опускающихся в засыпку лопастей падают крупные и менее плотные частицы. Таким образом, сегрегация в потоке частиц, циркулирующих в засыпке материала в нижней части барабана, становится причиной образования сегрегированного потока падающего слоя в поперечном сечении барабана.

В целях реализации принципа управления сегрегированными потоками для многовариантной обработки сыпучих материалов методами разделения и соединения на базе барабанного аппарата применено устройство [4], позволяющее управлять сегрегированными потоками, которое выполнено в виде системы управляемых отклоняющих элементов, установленных с возможностью поперечного перемещения продольными рядами в приосевой зоне барабана (рис. 2).

Элементы установлены в рядах с возможностью автономного изменения направления их наклона, что позволяет использовать их для оказания избирательного воздействия на потоки падающих частиц под поднимающимися и опускающимися лопастями барабана. Путем сообщения сегрегированным потокам падающих частиц импульсов с необходимой ориентацией относительно продольной и поперечной осей барабана представляется возможным обеспечить достижение комплекса ранее обозначенных технологических целей. Оперативное автономное управление структурой сегрегированных потоков твердой фазы в аппарате позволяет принципиально влиять на его функциональные свойства, придавая аппарату функции сепаратора, смесителя и тепломассообменного устройства с регулируемым временем обработки неоднородных компонентов технологического потока.

Возможности избирательного управления характеристиками структуры потоков отдельных компонентов неоднородного сыпучего материала в аппарате с управляемыми сегрегированными потоками продемонстрированы результатами экспериментального исследования, представленными на рис. 3. Они позволяют провести оценку степени различия функций распределения времени пребывания (РВП) фракции +3,0–4,0 мм гранулированного аммофоса с размером частиц +1,2–4,0 мм при различных вариантах управления ее сегрегированным потоком. Исследование проведено в аппарате с вращающимся барабаном диаметром 0,3 м и длиной 1,2 м методом импульсного ввода индикатора с применением неидеального трассера (окрашенных гранул фракции +3,0–4,0 мм).

Избирательное воздействие на сегрегированный поток компонента прямоточными и противоточными импульсами с использованием устройства, представленного на рис. 2, позволяет принципиально изменять структуру потока. Действительно, воздействие на сегрегированный поток крупных частиц прямоточными

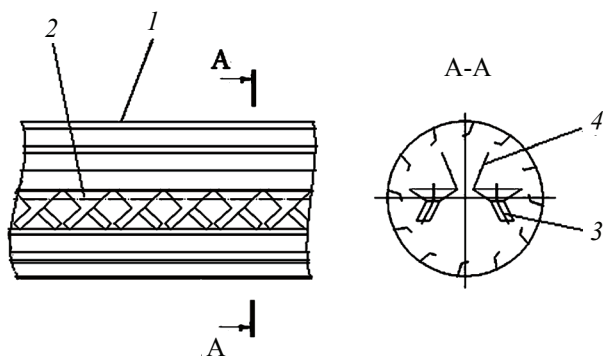


Рис. 2. Схема устройства для управления сегрегированными потоками:

1 – барабан; 2 – насадка, управляющая сегрегированными потоками;

3 – отклоняющие элементы насадки; 4 – делители потока

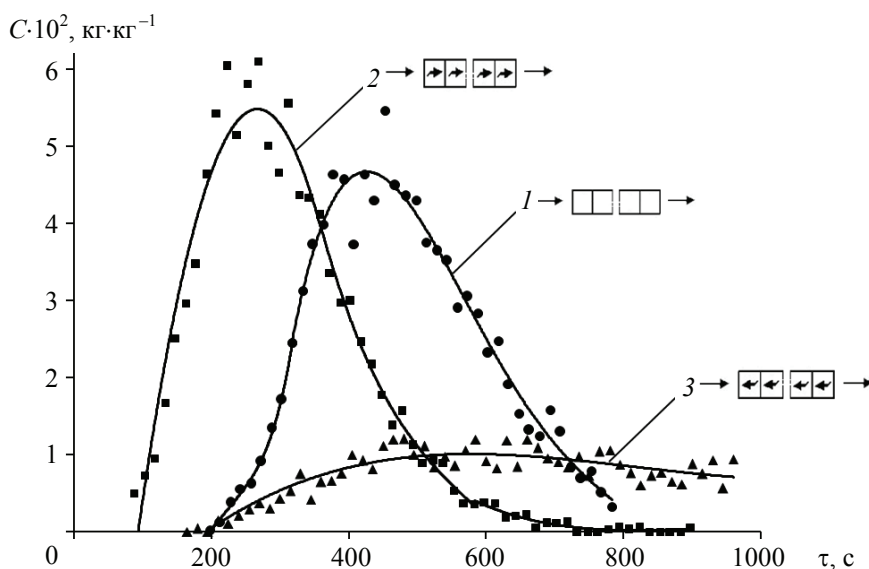


Рис. 3. Распределение частиц сегрегированного потока крупных гранул аммофоса по времени пребывания в аппарате:
 1 – в отсутствие управляющего импульсного воздействия;
 2, 3 – при воздействии прямоточными и противоточными импульсами соответственно

импульсами приводит (см. рис. 3) почти к двукратному уменьшению их среднего времени пребывания без значительного изменения дисперсии РВП. Действие же обратных импульсов на сегрегированный поток крупных частиц приводит к многократному увеличению и дисперсии РВП и его среднего значения.

Первый вариант преобразования структуры потока (прямоточными импульсами) рационально использовать с целью ускоренного вывода какого-либо компонента среды из аппарата, например, крупной фракции из зоны гранулообразования гранулятора или мелкой фракции из рабочей зоны теплообменного аппарата. Очевидно, что такое техническое решение будет способствовать снижению энергопотребления и повышению однородности обработки материала. Преобразование же структуры потока противоточными импульсами (второй вариант импульсного воздействия) сопровождается интенсивными избирательными сглаживающими и задерживающими эффектами, которые могут быть использованы для сглаживания неоднородностей подачи (например, порционной) компонентов и поддержания их повышенной концентрации в рабочем объеме непрерывно действующего оборудования, например, смесителях [17], твердофазных реакторах, дражираторах и др.

В целях обработки материалов методом разделения (сепарации, классификации, очистки, калибровки и др.) в рабочем объеме организуется многоступенчатый контакт движущихся навстречу друг другу сегрегированных потоков материала. Вследствие эффектов сегрегации и миграции на каждой ступени контакта встречные потоки обмениваются частицами, характеризующимися наибольшей неоднородностью свойств. В результате многократного контакта происходит обогащение сегрегированных потоков тем или иным компонентом сыпучего материала. При комплексном использовании эффектов сегрегации и миграции такой вариант управления обеспечивает разделение частиц либо по комплексу физико-механических свойств, либо по какому-либо доминирующему отличительному признаку (размеру, плотности, форме, шероховатости, упругости).

Для демонстрации технологических возможностей такого метода на рис. 4 приведены результаты экспериментального исследования динамики процесса сепарации трудно разделяемой смеси ячмень–овсюг в барабанном аппарате, использованном в предыдущем примере. Исследование проведено при производительности $150 \text{ кг}\cdot\text{ч}^{-1}$ по исходной смеси с концентрацией овсяга около 100 кг^{-1} и при подаче исходной смеси в центральную часть барабана. Динамика процесса сепарации определялась путем измерения концентрации овсяга в продуктах разделения в процессе выхода аппарата на стационарный режим. При этом обеспечивалось начальное условие равномерного распределения исходной смеси в аппарате. Управление сегрегированными потоками в аппарате с вращающимся барабаном обеспечивает практически полное извлечение примеси с выходом целевой фракции около 80 % при времени выхода аппарата на стационарный режим менее 120 с.

Наиболее общей задачей при обработке материалов методом соединения является достижение однородного объемного распределения компонентов среды в рабочем объеме оборудования. Для обеспечения такого условия необходимо организовать интенсивное объемное взаимное проникновение сегрегированных потоков путем комплексного воздействия на них встречными уравновешенными продольными и поперечными импульсами. Основной задачей при этом является определение рационального варианта сопряжения названных импульсов, обеспечивающего наибольшую интенсивность и эффективность процесса смешивания сегрегированных потоков. Выбор варианта сопряжения продольных и поперечных импульсов должен осуществляться с учетом режима функционирования оборудования, технологических параметров его рабочего объема и характеристик структуры сегрегированных потоков. Если принять во внимание механизм образования сегрегированных потоков в поперечном сечении барабана, большое соотношение его длины и диаметра и структуру потоков в нем, близкую к идеальному вытеснению, то можно предположить, что для достижения однородного объемного распределения компонентов среды в барабане в равной мере важны эффекты и продольного и поперечного перемешивания. В определенной мере данные предположения подтверждаются результатами экспериментального исследования эволюции степени неоднородности состава смеси модельных материалов в процессе ее приготовления в периодически действующем аппарате (рис. 5). В качестве модельных материалов использованы гранулы полиэтилена (фракция $+4,0 - 5,0 \text{ мм}$) и стеклянного бисера (фракция $+3,0 - 3,5 \text{ мм}$), сочетание размеров и плотностей которых чрезвычайно осложняет процесс приготовления их смеси. Анализ различных вариантов перемешивания сегрегированных потоков продольными и поперечными импульсами свидетельствует (см. рис. 5), что наибольшая интенсив-

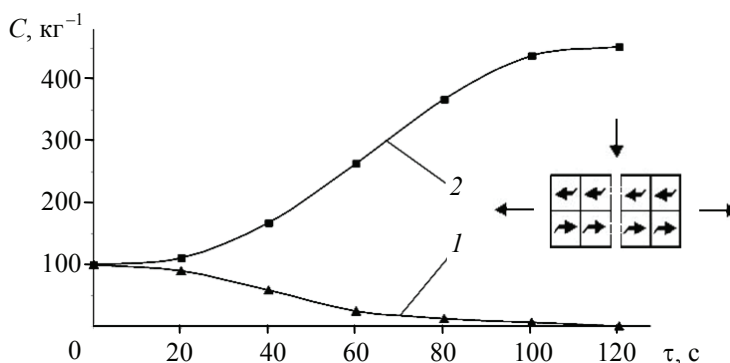


Рис. 4. Динамика процесса разделения смеси «ячмень – овсюг»:
 1, 2 – концентрация овсяга в целевом продукте
 и загрязненной фракции соответственно

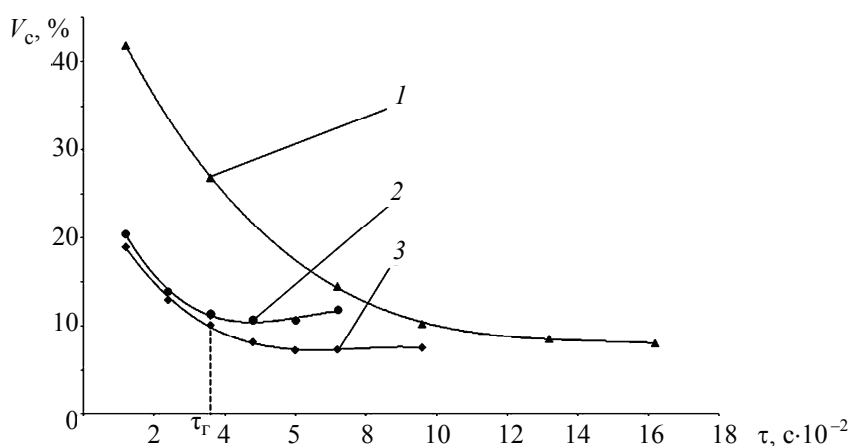


Рис. 5 Динамика изменения коэффициента вариации V_c в объеме смеси при смешении:

1, 2 – поперечно и продольно уравновешенными встречными импульсами соответственно; 3 – при комплексном использовании продольно ($\tau < \tau_r$) и поперечно ($\tau > \tau_r$) уравновешенных импульсов

ность и эффективность процесса смешивания достигается при комплексном последовательном их использовании: продольных на первой стадии и поперечных – на второй (кривая 3 на рис. 5).

Результаты исследования позволяют сделать вывод о широких возможностях технологического использования эффектов сегрегации и миграции в гравитационных потоках сыпучих материалов для организации гидромеханических и тепломассообменных процессов.

Список литературы

1. Bates, L. User Guide to Segregation / L. Bates. – United Kingdom : British Materials Handling Board ; Elsinore house, 1997. – 134 p.
2. Долгунин, В. Н. Сегрегация в зернистых средах: явление и его технологическое применение : монография / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 180 с.
3. Долгунин, В. Н. Процессы и оборудование для переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках : монография / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2011. – 120 с.
4. Процессы переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках / В. Н. Долгунин [и др.] // Теорет. основы хим. технологии. – 2014. – Т. 48, № 4. – С. 434 – 443.
5. Dolgunin, V. N. Processing of Nonuniform Granular Materials in Operation Segregated Flows / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, A. A. Ukolov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 321 – 327.
6. Карев, В. И. Развитие принципов управления сегрегированными технологическими потоками зернистых материалов / В. И. Карев, В. Н. Долгунин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 588 – 596.
7. Организация процесса смешения при управлении сегрегированными потоками зернистых материалов / В. Н. Долгунин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 388 – 396.
8. Повышение эффективности барабанного аппарата путем управления сегрегированными потоками зернистых материалов / О. О. Иванов [и др.] // Изв. вузов. Пищевая технология. – 2011. – № 2–3. – С. 89 – 92.

9. Технологические возможности управления структурой потоков в барабанном теплообменном аппарате / В. Н. Долгунин [и др.] // Хим. технология. – 2012. – № 10. – С. 600 – 607.

10. Dolgunin, V. N. Segregation Modeling of Particle Rapid Gravity Flow / V. N. Dolgunin, A. A. Ukolov // Powder Technology. – 1995. – Vol. 83, Is. 2. – P. 95 – 103. doi:10.1016/0032-5910(94)02954-M

11. 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, Is. 3. – P. 211 – 218. doi:10.1016/S0032-5910(97)03376-7

12. Долгунин, В. Н. Кинетические закономерности сегрегации при быстром гравитационном течении зернистых материалов / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов, О. О. Иванов // Теорет. основы хим. технологии. – 2006. – Т. 40, № 4. – С. 423 – 435.

13. Долгунин, В. Н. Кинетика сегрегации частиц различной шероховатости и упругости при быстром гравитационном течении зернистой среды / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. А. Уколов // Теорет. основы хим. технологии. – 2009. – Т. 43, № 2. – С. 199 – 207.

14. Лыков, А. В. Теплообмен : справочник / А. В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.

15. Борщев, В. Я. Исследование эффектов взаимодействия частиц при сдвиговых деформациях зернистой среды / В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин, О. О. Иванов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 230 – 235.

16. Иванов, О. О. Эффекты разделения частиц в завесе барабанного насадочного аппарата / О. О. Иванов, В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 8. – С. 13 – 15.

17. Organization of Mixing Process of Granular Aterials with Portion Dosage of Some Components / V. N. Dolgunin [et al.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 108 – 114.

Controlling of Segregated Flows of Granular Materials for Further Processing by Separation and Joining Methods

O. O. Ivanov¹, V. A. Pronin², E. A. Ryabova²

*Administration of the Tambov region, Tambov, Russia (1);
Department “Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries”,
TSTU, Tambov, Russia (2); iooc4@mail.ru*

Keywords: controlled segregated flows; heat and mass exchange; migration; mixing; particulate solids; segregation; separation.

Abstract: The technological problems of segregation in the course of processing of particulate solids and traditional methods of its overcoming are discussed. The forecasting possibilities of the developed theoretical description of segregation and migration effects during shear flows of granular media are analyzed. The general principles of controlling the segregated flows in the course of hydromechanical and heat and mass treatment of particulate solids are described; experimental results of its realization are discussed. The principle realization was carried out using an apparatus with rotating drum with peripheral lifting blades. The segregated flows occurring in the material heap of apparatus and in the falling bed of particles are analyzed. The efficiency of the proposed methods of processing of granular materials is demonstrated using the examples of the residence time distribution control of non-uniform particles, separation of particles differing in complex of physical and mechanical properties and periodic mixing of strongly segregating components.

References

1. Bates L. *User Guide to Segregation*, United Kingdom: British Materials Handling Board, Elsinore house, 1997, 134 p.
2. Dolgunin V.N., Ukolov A.A. *Segregatsiya v zernistykh sredakh: yavlenie i ego tekhnologicheskoe primenenie* [Segregation in granular media: the phenomenon and its technological application], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2005, 180 p. (In Russ.)
3. Dolgunin V.N., Ivanov O.O. *Protsessy i oborudovanie dlya pererabotki zernistykh materialov v upravlyaemykh segregirovannykh potokakh: monografiya* [The processes and equipment for the processing of granular materials under controlled segregated streams], Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2011, 120 p. (In Russ.)
4. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A., Kudi A.N. Processing of Granular Materials in Controlled Segregated Flows, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 4, pp. 404-413. doi: 10.1134/S0040579514040149
5. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. Processing of Nonuniform Granular Materials in Operation Segregated Flows, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 14, no. 2, pp. 321-327.
6. Karev V.I., Dolgunin V.N. [The Development of Operation Principles for Segregated Technological Flows of Granular Materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 588-596. (In Russ., Abstract in Eng.)
7. Dolgunin V.N., Shary Yu.V., Lebedenko I.A., Yumasheva O.V. [Organization of the Process of Mixing by Controlling the Flow of Particulate Segregated Materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 388-396. (In Russ., Abstract in Eng.)
8. Ivanov O.O., Kudy A.N., Dolgunin V.N., Shary Yu.V. [Increase of Efficiency of Drummer Heat-Mass Transfer Apparatus by Operating the Segregated Flows of Particulate Solids], *Izvestia vuzov. Pishhevaya tekhnologiya* [News of Institutes of Higher Education. Food technology], 2011, no. 2-3, pp. 89-92. (In Russ., Abstract in Eng.)
9. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Kudi A.N., Ukolov A.A., Karev V.I. [Technological possibilities of flow structure control in barrel heat-mass exchange reactor], *Khimicheskaya Tekhnologiya*, 2012, no. 10, pp. 600-607. (In Russ.)
10. Dolgunin V.N., Ukolov A.A. Segregation Modeling of Particle Rapid Gravity Flow, *Powder Technology*, 1995, vol. 83, issue 2, pp. 95-103. doi:10.1016/0032-5910(94)02954-M
11. 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
12. 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
13. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. Segregation kinetics of particles with different roughnesses and elasticities under a rapid gravity flow of a granular medium, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2009, vol. 43, no. 2, pp. 187-195. doi: 10.1134/S0040579509020092
14. Lykov A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer], Moscow: Energiya, 1978, 480 p. (In Russ.)
15. Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N., Ivanov O.O. [Investigation of Particles Interaction Effects under Shear Deformation in Granular Medium], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 2, pp. 230-235. (In Russ., Abstract in Eng.)

16. Ivanov O.O., Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N. Effect of particle separation in the curtain of a packed drum vessel, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2009, vol. 45, issue 7-8, pp. 468-472. doi: 10.1007/s10556-009-9211-2

17. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A., Pronin V.A., Ryabova E.A., Larionova E.P. Organization of Mixing Process of Granular Aterials with Portion Dosage of Some Components, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no 1, pp. 108-114.

Steuerung von den segregierten Strömen der Schüttstoffe zwecks ihrer Bearbeitung von den Methoden der Teilung und der Vereinigung

Zusammenfassung: Es sind die technologischen Probleme der Segregation in den Prozessen der Verarbeitung der Schüttstoffe und die traditionellen Methoden ihrer Überwindung betrachtet. Es sind die prognostischen Möglichkeiten der ausgearbeiteten theoretischen Beschreibung der Effekte der Segregation und der Migration in den Schiebeströmen der körnigen Umgebungen analysiert. Es sind die grundlegenden Prinzipien der Steuerung von den segregierten technologischen Strömen bei der Organisation der Hydromechanisch- und Wärmemassetauschprozesse der Verarbeitung der Schüttstoffe dargelegt und es werden die Ergebnisse ihrer experimentalen. Approbation besprochen. Es sind die Ergebnisse der Realisation der Prinzipien auf Grund vom Apparat mit der sich drehenden Trommel, die die peripherischen Hebeflügel hat, angeführt. Es ist die Besonderheit der segregierten Ströme im Einschütten im unteren Teil der Trommel und in der fallenden Schicht der Teilchen analysiert. Es ist die Einschätzung der Effektivität der angebotenen Methoden der Bearbeitung der körnigen Materialien an den Beispielen der Steuerung der Einteilungen der Zeit des Aufenthaltes der ungleichartigen Teilchen im Apparat, der Segregation der Teilchen, die nach dem Komplex der physikalisch-mechanischen Eigenschaften unterschieden werden, und der periodischen Vermischung der Komponenten mit der hohen Neigung zur Segregation durchgeführt.

Commande des flux ségrégués des matériaux pulvérulents dans le but de leur traitement par les méthodes de séparation et de combinaison

Résumé: Sont examinés les défis technologiques de la ségrégation dans le processus de la transformation des matériaux pulvérulents et les méthodes traditionnelles pour les surmonter. Sont analysées les possibilités de la description théorique élaborée des effets de la ségrégation et de la migration dans le flux de décalage des milieux granulaires. Sont exposés les principes de base de la commande des flux technologiques ségrégués lors de l'organisation des procédés hydromécaniques de traitement des matériaux pulvérulents et ceux de transfert de masse et de chaleur; sont discutés les résultats de leurs approbation expérimentale. Est analysée la spécificité des flux ségrégués. Est effectuée l'évaluation de l'efficacité des méthodes proposées.

Авторы: *Иванов Олег Олегович* – кандидат технических наук, доцент, заместитель главы администрации Тамбовской области, г. Тамбов, Россия; *Пронин Василий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Рябова Екатерина Алексеевна* – аспирант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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