

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**А. Н. КУДИ, В. Н. ДОЛГУНИН**

**СЕГРЕГАЦИЯ И МИГРАЦИЯ  
В ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКАХ  
ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ:  
МЕХАНИЗМЫ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ  
И ТЕХНОЛОГИИ**

Рекомендовано Научно-техническим советом университета  
в качестве монографии



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2019

УДК 66.047.75  
ББК Л111.33+Л821.03  
К88

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Теоретическая механика  
и сопротивление материалов» ФГБОУ ВО «Ярославский  
государственный технический университет»  
*А. Б. Капанова*

Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры прикладной математики  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный  
энергетический университет им. В. И Ленина»  
*В. Е. Мизонов*

**Куди, А. Н.**

К88      Сегрегация и миграция в гравитационных потоках зернистых материалов: механизмы, интенсификация и технологии : монография / А. Н. Куди, В. Н. Долгунин. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – 136 с. – 100 экз.  
ISBN 978-5-8265-2124-3

Проанализированы физические механизмы и кинетические закономерности эффектов сегрегации и миграции в быстрых гравитационных потоках неоднородных зернистых материалов. Результаты анализа используются для разработки и исследования способов интенсификации эффектов и стратегии их технологического применения.

Предназначена для научных работников, аспирантов и магистрантов, специализирующихся в области механики зернистых сред, а также инженерно-технического персонала, разрабатывающего технологии и эксплуатирующего оборудование для производства и переработки сыпучих материалов.

УДК 66.047.75  
ББК Л111.33+Л821.03

**ISBN 978-5-8265-2124-3**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. СЕГРЕГАЦИЯ: ФИЗИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ, ЕГО МЕХАНИЗМЫ, КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЭФФЕКТЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	8
1.1. Механизмы сегрегации и ее проявление в технологических процессах .....	8
1.2. Моделирование сегрегации в сдвиговых гравитационных потоках зернистых сред .....	17
1.3. Управление сегрегацией в технологических процессах переработки сыпучих материалов .....	27
Выводы по главе 1 .....	29
2. ЭФФЕКТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЧАСТИЦ В ПОПЕРЕЧНО ПРОДУВАЕМЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКАХ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	32
2.1. О методах исследования структурных и кинематических характеристик быстрых гравитационных потоков зернистых материалов .....	32
2.2. Методика исследования и особенности гидродинамики поперечно продуваемого быстрого гравитационного течения зернистых материалов .....	36
2.3. Экспериментальное исследование сегрегации и миграции в поперечно продуваемом гравитационном потоке зернистого материала .....	41
2.4. Математическое моделирование эффектов взаимодействия неоднородных частиц в поперечно продуваемом гравитационном потоке зернистого материала .....	46
Выводы по главе 2 .....	50
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЙ УСЛОВИЙ ТЕЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕГРЕГАЦИИ И МИГРАЦИИ .....	53
3.1. Влияние угла наклона поверхности ската к горизонту на интенсивность эффектов разделения и перемешивания .....	53
3.2. Влияние интенсивности гравитационного потока на шероховатом скате на эффекты разделения и перемешивания ...	59

3.3. Эффект «прыжка зернистой среды» и его влияние на сегрегацию и перемешивание неоднородных частиц в гравитационном потоке .....	64
3.4. Управление эффектами разделения в гравитационных потоках частиц, различающихся по размеру и плотности .....	65
Выводы по главе 3 .....	69
4. СЕГРЕГАЦИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТОКЕ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ШЕРОХОВАТОМ ВИБРИРУЮЩЕМ СКАТЕ .....	72
4.1. Влияние вибрации на структурные и кинематические характеристики зернистой среды на шероховатом скате .....	72
4.2. Экспериментальное исследование динамики течения и сегрегации в потоке зернистого материала на вибрирующем шероховатом скате .....	82
4.3. Моделирование динамики сегрегации и миграции в гравитационном потоке зернистого материала на шероховатом вибрирующем скате .....	97
Выводы по главе 4 .....	100
5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТОВ СЕГРЕГАЦИИ И МИГРАЦИИ .....	103
5.1. Специфика эффектов разделения неоднородных частиц в сдвиговых потоках зернистых сред и перспективы их технологического применения .....	103
5.2. Комплексное использование эффектов сегрегации и миграции в быстром гравитационном потоке зернистой среды для организации многоступенчатой сепарации частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств ...	105
Выводы по главе 5 .....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	130

## ВВЕДЕНИЕ

---

Под сегрегацией (лат. *segregatio* – отделение) в механике дисперсных материалов понимают процесс перераспределения неоднородных частиц смеси вследствие их взаимодействия и относительного встречного перемещения. Теоретически сегрегация имеет место при любом взаимодействии частиц дисперсной среды, если их взаимодействие сопровождается взаимным перемещением. Это утверждение верно настолько, насколько верно то, что в природе отсутствуют идеально однородные зернистые среды.

Причиной сегрегации может быть различие частиц по размеру, плотности, форме, шероховатости, упругости, адгезионным и другим физико-механическим свойствам. Практически, вопрос о степени проявления сегрегации актуален во всех тех случаях, когда частицы взаимодействуют с возможностью перемещений относительно друг друга и их неоднородностью пренебречь не представляется возможным.

Большинство природных дисперсных сред и сыпучих материалов в промышленности и сельском хозяйстве являются существенно неоднородными в связи с чем природные явления и технологические процессы, протекающие при взаимном перемещении частиц дисперсных сред, сопровождаются значительными эффектами сегрегации. Происходящие при этом перераспределения неоднородных частиц могут быть причиной существенных изменений в динамике течения дисперсных сред, кинетике технологических процессов и снижения качества продукта.

Традиционно сегрегацию воспринимают как спонтанно протекающее физическое явление с негативными технологическими последствиями для процессов переработки сыпучих материалов. Основное негативное последствие проявления сегрегации заключается в нарушении однородности распределения либо компонентов смеси, либо неоднородных по размеру, упругости и плотности частиц сыпучих материалов.

В связи с этим основные усилия специалистов, разрабатывающих и обслуживающих технологические процессы и оборудование для переработки сыпучих материалов, направлены традиционно в отношении сегрегации на разработку способов подавления последней.

В полной мере такое отношение к сегрегации отражается и в специальной научной и технической литературе. Весьма многочисленные литературные источники посвящены, в основном, изучению сегрегации в аспекте разработки способов и практических рекомендаций по ослаблению и предотвращению эффектов разделения, снижающих однородность дисперсных материалов. В наиболее обобщенном виде такой взгляд на сегрегацию отражен в монографии английского специалиста по процессам и оборудованию для переработки сыпучих материалов Линдона Бейтса (см. Bates L. User guide to segregation... в библиографическом списке настоящего издания).

Однако, если принять во внимание, что некоторые из эффектов сегрегации известны с давних времен и более того, используются в технологических целях, например, при добыче золота и обогащении многих полезных ископаемых, то такое одностороннее отношение к сегрегации, как к физическому явлению с негативными последствиями, является недостаточно конструктивным. Традиционное восприятие сегрегации в качестве только негативного явления, очевидно, является сдерживающим фактором в развитии способов технологического использования сегрегации для организации гидромеханических и тепломассообменных процессов, протекающих с участием неоднородных зернистых материалов. Практическое же использование эффектов сегрегации позволяет существенно расширить технологические возможности процессов и оборудования переработки сыпучих материалов.

Технологические преимущества использования эффектов сегрегации связаны, с одной стороны, с возможностью избежать применения малонадежных ситовых устройств, а также вспомогательных газовых и жидкостных потоков, необходимых в соответствии с традиционными технологиями. С другой стороны, использование эффектов сегрегации обеспечивает возможность гибко дифференцировать режим обработки неоднородных частиц за счет их взаимодействия и вытеснения кондиционных частиц некондиционными из зоны активной обработки частиц машин и аппаратов.

В связи с этим технологическое использование эффектов сегрегации может не только способствовать повышению эффективности существующих технологических процессов, их надежности и экологической безопасности, но и обеспечить разработку оригинальных, в первую очередь, совмещенных гидромеханических и тепломассообменных процессов.

Настоящее издание имеет своей целью провести анализ возможности технологического использования эффектов сегрегации в противовес традиционному представлению о сегрегации как о негативном явлении. Особое внимание при этом уделяется вопросам интенсификации сегрегации и прогнозирования ее эффектов в условиях максимального их проявления. Это издание следует рассматривать как дополнение к опубликованной ранее монографии «Сегрегация в зернистых средах: физическое явление и его технологическое применение» В. Н. Долгунина и А. А. Уколова (см. библиографический список в настоящем издании), в которой основное внимание уделено разработке теоретических основ, анализу механизмов и моделированию эффектов сегрегации при быстром сдвигом течении неоднородных зернистых материалов.

Монография предназначена для научных работников, аспирантов и магистрантов, специализирующихся в области механики зернистых сред, а также инженерно-технического персонала, разрабатывающего технологии и эксплуатирующего оборудование для производства и переработки сыпучих материалов.

Авторы выражают благодарность за плодотворное обсуждение результатов исследований и оказанную помощь в работе профессорам И. Г. Гришаеву, П. В. Классену, В. Ф. Першину, генеральному директору ООО «Агрофирма Аэлита» В. Г. Качайнику и коллегам по совместной научной деятельности профессорам: А. А. Уколову, В. Я. Борщеву, А. М. Климову и доцентам О. О. Иванову, П. А. Иванову, В. А. Пронину, Р. А. Шубину и Д. Н. Алленову.

# **1. СЕГРЕГАЦИЯ: ФИЗИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ, ЕГО МЕХАНИЗМЫ, КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЭФФЕКТЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

---

## **1.1. МЕХАНИЗМЫ СЕГРЕГАЦИИ И ЕЕ ПРОЯВЛЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

Многие природные явления и технологические процессы сопровождаются взаимным перемещением частиц сыпучих материалов. Сыпучий материал представляет собой, обычно, смесь неоднородных частиц, поскольку практически в любом случае речь может идти только о большей или меньшей их однородности. Взаимное перемещение частиц всегда в той или иной мере характеризуется наличием хаотической составляющей скорости, которая является причиной их перемешивания. Эффекты перемешивания используются в технологических целях для организации смешения компонентов и интенсификации процессов переноса в дисперсной среде.

Вместе с тем взаимное перемещение неоднородных частиц, сопровождающееся их взаимодействием, инициирует возникновение их встречных потоков вследствие проявления эффектов сегрегации. Таким образом, сегрегация проявляет себя как антипод перемешивания и, в общем случае, препятствует образованию однородных смесей частиц и обеспечению однородных условий их технологической обработки. В этом заключается основной негативный технологический аспект сегрегации, определяющий традиционное отношение к ней специалистов, разрабатывающих и обслуживающих процессы и оборудование для переработки сыпучих материалов.

Системное изложение негативных аспектов сегрегации представлено в монографии Bates [1]. При этом сегрегация представляется как один из самых масштабных факторов, имеющий пагубные последствия на всех этапах производства и использования сыпучих материалов. К основным негативным последствиям сегрегации автор относит: снижение качества продукта; нарушения в технологических процессах переработки сыпучих материалов; срывы производственной программы; дополнительная нагрузка на персонал, обслуживающий оборудование; нарушения работоспособности оборудования; ухудшение условий труда и снижение безопасности производства.

Однако, на практике, технологические аспекты сегрегации не ограничиваются только рамками традиционного негативного к ней отношения. В связи с этим возможно привести примеры позитивного влияния эффектов сегрегации на технологические процессы переработки сыпучих материалов. К такого рода эффектам относятся, например, сегрегация мелких частиц в направлении к поверхности сита при грохочении материалов, перемещение золотого песка в направлении к поверхности лотка при золотодобыче и всплытие половы при обмо­лоте зерна.

Приведенные факты прямо наводят на мысль о необходимости разработки научно обоснованных способов не только подавления сегрегации, но и ее интенсификации в случаях технологического использования эффектов разделения, обусловленных взаимодействием неоднородных частиц. Очевидно, что эффективное управление сегрегацией может быть разработано в результате анализа закономерностей процесса. Разработка принципов управления сегрегацией предполагает анализ ее движущих сил и сопротивлений в соответствии с механизмами протекания процесса. Такой анализ становится возможным при достаточно высоком уровне развития теоретических основ сегрегации.

Необходимыми условиями сегрегации являются взаимодействие частиц и взаимное их перемещение под воздействием какого-либо инициирующего фактора, в общем случае некоторого физического поля или комплекса полей. В физике принято различать четыре вида полей, а именно: гравитационное, электромагнитное (электрическое, магнитное), а также поля слабых и поля сильных взаимодействий, обусловленных действием межмолекулярных и внутримолекулярных сил, таких как силы смачивания и Ван-дер-Ваальсовы силы. В таких условиях причиной сегрегации может быть различие частиц либо по одному из комплекса разнообразных физических, физико-химических и других свойств, либо сразу по нескольким свойствам.

Например, Bates [1] выделяет четырнадцать видов характеристик свойств дисперсных материалов, которые могут оказывать влияние на сегрегацию. При этом, очевидно, что каждое из свойств в отдельности определяет поведение соответствующих частиц в том или ином физическом поле. Таким образом, в условиях определенного поля доминирующее влияние на сегрегацию может оказывать различие в том или ином свойстве частиц дисперсной среды. При оценке характера влияния свойств частиц на сегрегацию необходимо принять во внимание, что сегрегация является результатом взаимодействия неоднородных частиц под воздействием физического поля или комбинации полей.

С учетом изложенного свойства частиц, влияющие на сегрегацию, можно условно разделить на две категории:

а) свойства, которые определяют силы, действующие на отдельные частицы со стороны поля, и, тем самым, влияющие на динамику их перемещений в пространстве полевого воздействия;

б) свойства, влияющие на эффект взаимодействия неоднородных частиц, т.е. на направление и интенсивность относительного перемещения частиц.

Отсюда следует, то склонность смеси частиц к сегрегации определяется не только совокупностью их свойств по указанным категориям, но и совокупностью и интенсивностью физических полей и дополнительных факторов, способствующих и препятствующих сегрегации.

В связи с изложенным достаточно сложно перечислить все свойства частиц, которые могут стать причиной сегрегации. Кроме того, простое перечисление множества свойств без определения условий и механизмов, в которых они значимо проявляются, не представляется сколько-нибудь важным. Здесь же целесообразно ограничиться информацией об основных свойствах частиц, различия в которых приводит к проявлению значительных эффектов сегрегации в самых общих случаях взаимных перемещений микро- и макрообъемов зернистых сред. Комплекс такого рода свойств для зернистых материалов включает в первую очередь размер, плотность, шероховатость, упругость, форму частиц и адгезионные свойства их поверхности.

Согласно большому числу экспертных оценок [1, 3], первостепенное значение для сегрегации имеет размер и соотношение размеров частиц. Этот вывод действителен, например, для множества случаев сегрегации и сдвиговых потоках зернистых материалов. Однако, принимая во внимание многообразие возможных механизмов сегрегации и условий взаимодействия неоднородных частиц, обусловленных совокупностью физических полей и граничных условий, следует признать определенную условность такого вывода. Это тем более справедливо, если учесть, что взаимодействие частиц в дисперсной среде, в подавляющем большинстве случаев протекает в присутствии дисперсионной (межчастичной) среды, которая в определенных условиях также может оказывать существенное влияние на эффект взаимодействия неоднородных частиц.

В связи с изложенными общими представлениями о природе сегрегации становится ясным, что математическое описание кинетических закономерностей процесса должно отражать, в общем случае, зависимость скорости разделения неоднородных частиц от комплекса их физико-механических свойств, свойств межчастичной среды и ком-

плекса факторов, определяющих условия взаимодействия компонентов дисперсной среды (физических полей и других факторов, инициирующих и тормозящих сегрегацию). Многообразие свойств частиц и условий их взаимодействия является причиной множества различных механизмов разделения частиц, которые могут проявляться либо в отдельности, либо в некоторых их сочетаниях. Очевидно, что кинетические характеристики сегрегации должны определяться с учетом действующих механизмов разделения частиц.

Одной из первых работ, в которой предпринята попытка объяснения механизмов сегрегации, имеющей место на свободной поверхности во время течения сыпучего материала вниз по наклонному желобу и поверхностям насыпей, является работа Brown (1939) [4].

Brown считает, что столкновение между частицами является главным фактором сегрегации, протекающей на открытой поверхности формируемых насыпей. Он полагает, что малые частицы при столкновении с большими затормаживаются и, в результате, концентрируются вблизи точки загрузки, а большие частицы продолжают движение вниз по склону.

Bagnold [5] проанализировал явление сегрегации при быстром сдвиговом течении зернистого материала на основе разработанной им концепции о существовании «дисперсионного давления». По его мнению, сортировка частиц по размеру в быстром сдвиговом потоке происходит вследствие того, что в указанном режиме течения дисперсионное давление при заданной скорости сдвига изменяется пропорционально площади поверхности частиц. При этой причине крупные частицы перемещаются в область потока с меньшей скоростью сдвига, а мелкие – в область с наибольшей скоростью сдвига.

Однако, эта аналогия с «эффектом парциальных давлений» представляется недостаточно корректной, поскольку явление сегрегации имеет место и в однородном по скорости сдвига потоке. Кроме того, как показывает опыт [6], перемещение крупных частиц может происходить и в противоположном направлении, например, к открытой поверхности быстрого гравитационного потока, в направлении которой скорость сдвига увеличивается.

Williams [7, 8] описывает три основных механизма сегрегации в сдвиговом потоке зернистой среды. Одним из таких механизмов является механизм проникания, который заключается в проникновении мелких частиц под действием силы тяжести в межчастичное пространство, образующееся между более крупными частицами в движущемся слое смеси частиц. Вследствие этого механизма крупные частицы

будут выдавливаться мелкими в обратном направлении, например к открытой поверхности движущего или вибрирующего слоя.

Еще один механизм назван механизмом различных траекторий. Этот механизм обусловлен различием в траекториях движения неоднородных частиц при взаимодействии их с межчастичной средой и имеет место, в первую очередь, при движении частиц у открытых поверхностей сдвиговых потоков. Различие же траекторий для неоднородных частиц является следствием различного соотношения сил сопротивления и инерционных сил для частиц, отличающихся друг от друга по размеру и плотности.

Третий возможный механизм сегрегации имеет место в разреженных зернистых средах, аналогичных псевдооживленным системам, и может быть условно назван механизмом «расслаивания». Однако в отличие от аналогичного физического эффекта в жидких средах, кинетика этого механизма сегрегации зависит от комплекса физико-механических характеристик частиц, а не определяется только их размером или плотностью.

В работе [8] Williams полагает, что межчастичная проницаемость является главным фактором сегрегации при течении сыпучего материала на свободной поверхности насыпи. Он представлял поверхность ската в виде сита. Малые частицы более склонны погружаться в пустоты, образующиеся на поверхности ската при движении материала. Большие частицы, не находя адекватных размеров пустот, имеют тенденцию к скатыванию. При этом, в отличие от Brown [4], столкновение частиц во внимание не принималось.

В настоящее время, в связи с развитием техники гранулирования и псевдооживления, широким применением гранулированных материалов, порошковой технологии и созданием новых технологических процессов, связанных с прямым взаимодействием дисперсных продуктов, интерес к изучению процессов сегрегации заметно повысился [1, 2, 9 – 11].

Enstad [9], анализируя только один случай сегрегации частиц при образовании насыпи, выделяет восемь основных механизмов ее протекания. По существу, если не принимать во внимание оригинальные наименования механизмов, то в дополнение к механизмам, описанным Brown [4] и Williams [8], он указывает еще на четыре механизма сегрегации. В числе дополнительных механизмов сегрегации Enstad [9] представляет механизм, обусловленный различной склонностью частиц к качению, механизм выталкивания и формирования углов естественного откоса, а также механизм, обусловленный действием сопутствующих воздушных потоков.

Механизм качения преимущественно проявляется в тех случаях, когда имеет место движение одиночных частиц относительно неподвижных. При этом неподвижные частицы образуют «шероховатость», которая обеспечивает задержку одних частиц и не является препятствием для движения других.

Механизм выталкивания заключается в вытеснении легких частиц частицами с большей массой на периферию движущегося слоя. При этом следует заметить, что отсутствие акцентов по поводу причин различия частиц по массе, позволяет полагать, что разность масс частиц обусловлена их различием не только по плотности, но и по размеру. Однако, на практике частицы большого размера, более массивные по сравнению с мелкими частицами, часто вытесняются последними на открытую поверхность гравитационного потока. Указанный факт либо противоречит описываемому механизму, либо последний нуждается в уточнениях и дополнениях.

Механизм разделения смеси на фракции в зависимости от углов их естественного откоса объясняется тем, что частицы фракции материала с меньшим углом естественного откоса отличаются более высокой подвижностью и поэтому перемещаются в область потока с более высокими скоростями деформации.

Сущность механизма сегрегации частиц сопутствующими струями воздуха заключается в том, что поток зернистой среды инициирует циркуляционные воздушные потоки, которые в большей мере воздействуют на мелкие и менее плотные частицы среды.

Кроме того, Enstad [9] полагает, что, по крайней мере, еще четыре механизма сегрегации могут иметь место при движении зернистых материалов по насыпи. В большинстве случаев их действием возможно пренебречь, однако, при некоторых обстоятельствах эти механизмы могут быть определяющими. К таким механизмам он относит просеивание, сегрегацию перемещением, диффузией и образованием агломератов частиц.

При этом различие между просеиванием и прониканием автор определяет исходя из того признака, что в первом случае частицы мелкой фракции проникают в зазоры между крупными частицами, которые образуются при сдвиге среды, а во втором – в зазоры между неподвижными или вибрирующими частицами.

Сегрегация перемещением частиц состоит в том, что при движении крупных частиц под ними образуются пустоты, которые заполняются преимущественно мелкими частицами, отличающимися высокой подвижностью.

Диффузионный механизм сегрегации проявляется также вследствие различной подвижности крупных и мелких частиц в потоке зернистой смеси. Поскольку крупные частицы не могут проникать в слой мелких частиц и подвижность мелких частиц в смеси выше, чем у частиц в зонах среды, состоящих из относительно однородных частиц, то мелкие частицы перемещаются в области потока, обогащенные себе подобными частицами.

Механизм сегрегации через образование агломератов имеет место в смесях зернистых материалов, компоненты которых имеют различную склонность к образованию агрегатов вследствие различия в адгезионных свойствах частиц. При этом компонент, склонный образовывать агрегаты частиц, сегрегирует по аналогии с крупнодисперсной фракцией зернистой смеси.

Кроме рассмотренных механизмов сегрегации, в литературе анализируется и многие другие, однако большинство из них можно представить модификациями уже представленных механизмов, которые учитывают конкретные условия протекания процесса.

Например, Shinohara, Enstad и Miyata [10, 11] обсуждают механизм просеивания, который имеет место при формировании насыпей. Однако, по существу такой механизм является аналогом механизма проникания и отличается от него наличием фазы вывода проникающих (мелких) частиц из основного потока вследствие их осаждения у основания движущегося слоя на начальном этапе его формирования.

К такого рода механизмам относится и «поточно формируемая сегрегация», которая анализируется в работе. Указанный механизм проявляется вследствие неоднородного профиля скорости потока, который определяет условия формирования областей неоднородного состава зернистой среды, т.е. их пространственное расположение.

Попытка систематизации механизмов сегрегации предпринята в монографии Bates [1]. Для повышения стройности системы автор предлагает разделить все факторы, способствующие сегрегации, на две категории:

- 1) силы, инициирующие проявление эффектов сегрегации;
- 2) процессы, которые приводят к сегрегации частиц.

При этом к силам, инициирующим проявление тех или иных механизмов сегрегации, отнесены:

- гравитационное воздействие;
- силы, возникающие при межчастичном контакте;
- трение частиц при их контакте с ограничивающими поверхностями;
- ударные силы, возникающие при взаимодействии частиц;

- расклинивающие силы, возникающие в ансамбле неоднородных частиц;
- силы упругости, возникающие при контакте частиц с ограничивающими поверхностями;
- моменты качения, при взаимодействии частиц друг с другом или с ограничивающими поверхностями;
- силы сопротивления, возникающие при перемещении частиц относительно межчастичной среды;
- силы поверхностного сцепления частиц, вызванного адгезией, электростатическими эффектами и др.

К процессам, следствием протекания которых являются те или иные эффекты сегрегации, отнесены:

- просеивание и проницание, представляющие собой процесс проникновения мелких частиц в зазоры между крупными частицами, когда последние либо движутся относительно друг друга (просеивание), либо находятся в неподвижном состоянии (проницание);
- течение дисперсных сред с различной текучестью компонентов, обобщенной характеристикой которой является различие компонентов среды в углах естественного откоса;
- процессы всплытия или погружения, обусловленные различной плавучестью частиц, вследствие их различия по плотности и форме;
- выталкивание как процесс, протекающий вследствие различного рода эффектов расклинивающего воздействия частиц друг на друга;
- взаимодействие частиц и их ансамблей, определяющее различную динамику поведения частиц, отличающихся по размеру, форме, плотности, упругости и т.д. (перекатывание, отскок, захват и т.п.);
- вымывание частиц поперечными и встречными потоками межчастичной среды;
- «захват» одних частиц другими, обусловленный различной геометрией частиц и динамическими факторами взаимодействия;
- истирание частиц с последующим отделением пыли;
- разделение, обусловленное псевдооживлением отдельных компонентов зернистой среды, имеющих низкую скорость псевдооживления, сопровождающееся изменением вектора скорости различных частиц по модулю или направлению;
- разделение частиц во вращающемся слое сыпучего материала, в котором последовательно чередуются состояние сдвигового течения частиц при их гравитационном осыпании на откосе и плотного движущегося слоя, в котором происходит перемещение частиц из нижней

части откоса в верхнюю, с концентрированием мелкой (плотной) фракции в центре циркуляции;

- поперечное циклическое расслаивание неоднородных частиц в непрерывном спирально вращающемся потоке зернистого материала;
- расслаивание неоднородных частиц в вибрирующем слое.

Однако, несмотря на детальный характер, проведенная Bates систематизация [1] не является достаточно стройной. Основная причина нарушения стройности системы заключается в отсутствии определенности использованного понятия процесса, вызывающего сегрегацию частиц. Вследствие недостаточной определенности понятия процесса в этой категории рассматриваются и механизмы сегрегации (например, проникание, выталкивание, захват частиц) и объекты со специфической гидродинамикой дисперсной среды, в которых сегрегация является причиной действия либо одного из механизмов разделения, либо некоторого их сочетания. Например, основной причиной разделения частиц по размеру и плотности во вращающемся слое сыпучего материала может быть и проникание, просеивание, и различная плавучесть, и захват частиц и другие механизмы, а также всевозможные их сочетания. Эти обстоятельства, в общем случае, препятствуют рассмотрению объектов со специфической гидродинамикой среды в качестве оригинального процесса или механизма сегрегации.

Анализ механизмов сегрегации свидетельствует не только об их чрезвычайном многообразии, но и об отсутствии достаточно строгой классификации, составленной на основе принципиально разграниченных классификационных признаков.

В связи с этим, увеличение числа механизмов от одной классификации к другой зачастую не приводит к расширению знаний о сегрегации, но, более того, осложняет изучение названного явления. Некоторые из вновь обнаруживаемых механизмов являются результатом акцентирования внимания на отдельных элементарных актах более сложных механизмов. Например, механизм сегрегации «расслаиванием» по Williams вполне ассимилирует в себе сегрегацию выталкиванием и перемещением частиц по Enstad и является по отношению к ним более общим механизмом. В определенной степени сказанное относится и к механизму, обусловленному различной склонностью частиц к качению (по той же классификации Enstad), поскольку названный механизм может быть представлен как один из элементарных актов более сложного взаимодействия.

При этом важно отметить, что по определению Williams [7, 8] «расслаивание» является следствием различия частиц не только по размеру и плотности, но и зависит от комплекса физико-механических

свойств. Такой подход является, очевидно, более адекватным приближением к реальному процессу и позволяет учесть различную текучесть, т.е. различие в углах естественного откоса отдельных фракций дисперсной среды (еще один механизм по классификации Enstad).

Вместе с тем, здесь необходимо заметить, что в зависимости от условий взаимодействия неоднородных частиц, может доминировать то или иное их отличительное свойство, а, соответственно, тот или иной элементарный акт в их комплексном взаимодействии может стать определяющим. Эти обстоятельства обеспечивают формальные условия для рассмотрения таких элементарных актов в качестве отдельных механизмов сегрегации. Вместе с тем, это не мешает учитывать такого рода механизмы в составе механизмов более высокого порядка.

В связи с изложенным, актуальными являются исследования, имеющие своей целью выявление механизмов и кинетических закономерностей сегрегации для наиболее общих и практически значимых случаев течения зернистых сред.

Сдвиговое течение является наиболее общей формой движения дисперсных сред, сопровождающееся интенсивным перемещением частиц. Даже поршневое течение такого рода сред представляет собой не более как одну из идеализированных форм движения, которая на практике в той или иной мере сопряжена со сдвиговыми перемещениями частиц.

Среди сдвиговых течений зернистых материалов особое место занимают быстрые течения, которые широко распространены в природных явлениях (камнепады, лавины, сели, движение песков в дюнах и барханах и т.п.) и технологических процессах (течение на гравитационных спусках, в силосах, бункерах, вращающихся барабанах, трубах и т.п.) и сопровождаются ярким проявлением эффектов перемешивания и сегрегации неоднородных частиц. В большинстве случаев быстрые сдвиговые течения возникают под действием гравитационной силы, о чем свидетельствуют приведенные примеры такого рода течений. Эти обстоятельства служат объяснением того, что быстрые сдвиговые, и, в частности, быстрые гравитационные течения, являются основным объектом внимания настоящей работы.

## **1.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИИ В СДВИГОВЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКАХ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД**

Обзор подавляющего большинства работ, посвященных исследованию динамики сдвиговых гравитационных потоков, например [12 – 23], свидетельствует о том, что анализ эффектов взаимодействия частиц осуществляется без учета структурной неоднородности зерни-

стых сред в предположении их несжимаемости. С одной стороны это объясняется тем, что во многих случаях зернистые среды анализируются в работах преимущественно в условиях, не предполагающих существенной структурной неоднородности, а с другой стороны это связано с чрезвычайно ограниченными возможностями идентификации параметров структурной неоднородности зернистых сред для большинства практически важных случаев их течения [18, 23, 24].

Вместе с тем, во многих работах, например в [23 – 25], акцентируется внимание на необходимости использования достоверных и достаточно полных данных по динамике течения зернистых сред при анализе эффектов взаимодействия частиц. В отношении сказанного весьма показательны результаты обширного исследования эффектов сегрегации и перемешивания, выполненного в рамках работы [23].

Однако, даже при допущении структурной однородности сдвигового гравитационного потока математическое описание динамики сегрегации вызывает серьезные затруднения в связи с отсутствием единого суждения в отношении физического механизма процесса. Часто следствием этого является использование различных механизмов при описании сегрегации в гравитационных потоках частиц лишь только потому, что частицы различаются, например, в одном случае по плотности [21], а в другом – по размеру [22]. Для описания динамики сегрегации частиц различной плотности в работе [21] использован механизм плавучести, а в работе [22] сегрегация частиц по размеру описана с учетом неоднородного распределения литостатического давления между частицами мелкой и крупной фракций. При этом важно отметить, что в обоих случаях описание динамики сегрегации не учитывает зависимость скорости процесса ни от скорости сдвига, ни от концентрации твердой фазы. Это тем более важно, если учесть, что скорость сдвига и концентрация твердой фазы оказывают существенное влияние на скорость сегрегации [3], а значения названных параметров в объеме гравитационного сдвигового потока, в общем случае, изменяются в широком диапазоне [2].

С целью учета влияния скорости сдвига на процесс разделения неоднородных частиц в работе [23] проведено исследование динамики сегрегации частиц, различающихся по размеру и плотности, в быстрых сдвиговых потоках зернистых материалов. Динамика сегрегации проанализирована на базе различных вышеупомянутых ее механизмов для частиц, различающихся по размеру [22] и плотности [21]. Моделирование сегрегации по плотности проведено с использованием механизма плавучести [21], формально аналогичного таковому для всплытия тел, погруженных в жидкость. Кинетика сегрегации частиц по раз-

меру смоделирована на базе механизма разделения частиц под действием градиента литостатического давления, являющегося следствием гравитации [22]. В соответствии с этим механизмом напряжения, генерируемые гравитацией в сдвиговом потоке, некоторым образом распределены между частицами, различающимися по размеру, пропорционально некоторому индивидуальному коэффициенту парциального давления. При этом, в общем случае, значения этих коэффициентов не совпадают с относительной концентрацией частиц соответствующего размера. Предполагается [26], что частицы, для которых доля парциальных напряжений превосходит их локальную относительную концентрацию в смеси, перемещаются в область потока с более низким литостатическим давлением. Напротив, частицы, вследствие размера которых приходящаяся на них доля парциальных напряжений меньше их локальной относительной объемной концентрации в смеси, перемещаются в область потока с более высоким литостатическим давлением. Во всех названных работах эффект перемешивания частиц смоделирован с использованием квазидиффузионной модели.

В отсутствие теоретической базы для прогнозирования зависимости кинетических характеристик сегрегации и перемешивания от кинематических и структурных параметров потока в работах [21 – 23, 26] коэффициенты сегрегации частиц по размеру, плотности и коэффициент квазидиффузионного перемешивания аппроксимировались константами, которые определялись в процессе математического моделирования. Однако, результаты исследований, выполненных в ряде последующих работ, например [27 – 29], свидетельствуют о существенной зависимости перечисленных коэффициентов от скорости сдвига, которая, в общем случае, в объеме потока имеет высокую неоднородность. В этих же работах установлено, что учет зависимости коэффициентов сегрегации и квазидиффузии от скорости сдвига позволяет улучшить соответствие между экспериментальными и расчетными результатами. Однако, до настоящего времени не теряет актуальности задача определения зависимостей коэффициентов сегрегации и диффузии от параметров сдвигового потока [23].

Более того, как верно отмечено в работе [23], при всей гибкости разработанных математических моделей сегрегации [27 – 29], лежащие в их основе модельные представления не позволяют учесть эффекты разделения частиц вследствие неоднородности скорости сдвига и непосредственно связанной с ней температуры зернистой среды в сдвиговом потоке материала. О необходимости же учета эффектов разделения, вызванных пространственной неоднородностью параметров сдвигового потока зернистой среды, свидетельствуют результаты исследований, выполненных в работах [23, 24, 30 – 33].

В работах [23, 33] величина потока разделения частиц, различающихся по размеру, определена как величина, пропорциональная градиенту кинетической составляющей напряжений. При этом в локальных напряжениях, генерируемых в сдвиговом потоке зернистой среды, выделяются компоненты кинетических и контактных напряжений. Кинетическая составляющая напряжений при сдвиге рассматривается как результат переноса импульсов при флуктуации частиц. Предполагается, что разделение неоднородных частиц происходит вследствие различного распределения контактных и кинетических напряжений по компонентам зернистой среды, различающихся по размеру частиц. В результате развития названных модельных представлений на базе математических моделей сегрегации частиц по плотности [21] и размеру [22, 26] в работе [23] предложено математическое описание сегрегации подобного рода частиц в условиях пространственной неоднородности скорости сдвига в гравитационном потоке

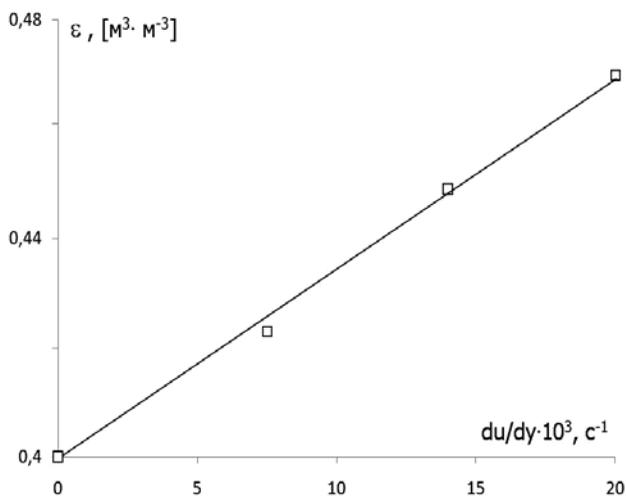
$$\rho^i (\mathbf{v}^{c,i} - \mathbf{v}) = \frac{(\psi^{c,i} - \psi^{k,i})}{c_D} \frac{\partial \sigma_{yy}^k}{\partial y} + \frac{(\phi_m^i - \psi^{c,i})}{c_D} \rho g \cos \zeta - D \frac{\partial \rho^i}{\partial y}, \quad (1.1)$$

где  $\rho$ ,  $\rho^i$  – локальное значение насыпной плотности смеси и компонента  $i$  в составе смеси, соответственно;  $g$  – гравитационное ускорение;  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{v}^i$  – осредненное значение локальной скорости смеси и ее компонента  $i$  в направлении сегрегации  $y$ , соответственно;  $\phi_m^i$  – локальное значение массовой концентрации  $i$ -го компонента;  $\psi^{c,i}$ ,  $\psi^{k,i}$  – коэффициенты парциальных контактных и кинетических напряжений для  $i$ -го компонента смеси, соответственно;  $\sigma_{yy}^k$  – локальное значение кинетической составляющей напряжений;  $\zeta$  – угол наклона сдвигового потока к горизонту;  $D$  – коэффициент квазидиффузионного перемешивания;  $c_D$  – коэффициент сопротивления сегрегации.

В соответствии с приведенным математическим описанием поток сегрегации компонента при сдвиговом течении сыпучего материала является результатом сопряжения элементарных потоков разделения и потока квазидиффузионного перемешивания компонентов. Элементарные потоки разделения представлены как результат неоднородного распределения контактной и кинетической составляющих напряжений по компонентам зернистой среды, непропорционального в отношении концентрации компонентов. При этом движущей силой потока разделения вследствие неоднородного распределения контактных напряже-

ний является гравитация. Поток же разделения, обусловленный неоднородностью распределения кинетической составляющей напряжения, определен как величина, пропорциональная градиенту кинетической составляющей напряжения. Таким образом, первый из потоков разделения является следствием локальной неоднородности среды, как смеси неоднородных частиц, а второй – пространственной неоднородности скорости сдвига в потоке материала.

При разработке предложенного описания динамики процесса сегрегации и анализе его прогностических свойств в работе [23] принято условие высокой концентрации твердой фазы при допущении ее однородного распределения в потоке. Однако, на фоне особого пристального внимания к эффекту неоднородности скорости сдвига в потоке такое допущение представляется необоснованным, поскольку изменение скорости сдвига в зернистой среде сопровождается значительными изменениями ее микроструктурных характеристик. Подтверждением наличия такой корреляции могут служить результаты экспериментального исследования структурно-кинематических характеристик в потоках несвязных неэластичных сферических частиц в условиях быстрого сдвигового течения на шероховатом скате [34] и квазипластических сдвиговых деформаций (рис. 1.1), полученные с использованием конвейерной сдвиговой ячейки в соответствии с методикой, изложенной в работе [35].



**Рис. 1.1.** Зависимость порозности от скорости сдвига в слое керамических сфер диаметром  $6,6 \cdot 10^3$  м в конвейерной сдвиговой ячейке [35]

Поскольку концентрация твердой фазы является важным фактором [24, 34, 35], определяющим динамику течения зернистых сред и эффекты взаимодействия частиц, то допущение о структурной однородности сдвигового потока, принятое в работе [23] при изучении динамики сегрегации, может быть одной из основных причин наблюдаемого авторами значительного количественного несоответствия теоретических и модельных результатов. Действительно, трудно предположить, что коэффициенты парциальных контактных и кинетических напряжений для компонентов смеси не изменяют своих значений в зависимости от структурных и кинематических характеристик потока.

Кроме того, с учетом различия выражений движущей силы для элементарных потоков разделения в уравнении (1.1), в общем случае, не следует рассчитывать на равенство в указанных потоках кинетических коэффициентов сегрегации, которые определяются как величины, обратные коэффициенту сопротивления ( $1/c_D$ ).

В дополнение к сказанному важно отметить, что по признанию авторов работы [23], отсутствие достоверной информации о структурных и кинематических параметрах сдвигового потока является сдерживающим фактором в развитии предложенных модельных представлений о динамике эффектов взаимодействия неоднородных частиц. Отсутствие соответствующей теоретической базы препятствует идентификации комплекса кинетических характеристик сегрегации и перемешивания и приводит к необходимости оперировать некоторыми подгоночными их константами, которых в соответствии с выражением (1.1) должно быть не менее трех. Вместе с тем очевидно, что названные кинетические характеристики не могут быть определены в зависимости только от скорости сдвига, и особенно в тех случаях, когда последняя неоднородна в потоке и некоторым образом коррелируется с концентрацией твердой фазы.

В работах [2, 30, 31, 36] динамика распределения неоднородных частиц в сдвиговых гравитационных потоках зернистых материалов описана как результат сопряжения потоков конвекционного переноса  $\vec{j}_c$ , сегрегации  $\vec{j}_s$ , обусловленной локальной неоднородностью среды, квазидиффузионного разделения (миграции) частиц  $\vec{j}_m$  вследствие пространственной неоднородности среды и квазидиффузионного перемешивания  $\vec{j}_d$ .

$$\frac{\partial(c\rho_b)}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{j}_c) = -\operatorname{div}(\vec{j}_s) - \operatorname{div}(\vec{j}_m) - \operatorname{div}(\vec{j}_d). \quad (1.2)$$

Для описания динамики сегрегации в условиях неоднородности структурных и кинематических параметров быстрого гравитационного

течения в работах [2, 30, 31, 36] использован механизм сдвигового поточного разделения, впервые и подробно изложенный ранее в работе [37]. Этот механизм позволяет определить кинетику сегрегации, обусловленной локальной неоднородностью зернистой среды, с учетом степени неоднородности ее состава, структурно-кинематических свойств потока и комплекса физико-механических свойств частиц (размера, плотности, шероховатости, упругости). Разделение же частиц вследствие пространственной структурной неоднородности сдвигового потока описано с использованием механизма взаимной диффузии (миграции), учитывающего различные значения скоростей квазидиффузионного перемещения неоднородных частиц.

Механизм сдвигового поточного разделения учитывает, что любая частица, отличающаяся по свойствам от частиц сдвигового потока условно однородной среды, при нахождении ее в таком потоке становится концентратором напряжений. Вблизи частицы-концентратора напряжения спорадически формируются агрегаты частиц, при взаимодействии с которыми под действием гравитационного сдвига частица приобретает поперечно направленный импульс. Следствием импульса является перемещение частицы-концентратора напряжения в направлении, обеспечивающем ослабление напряженного состояния в сдвиговом потоке.

Взаимодействие контрольной частицы с агрегатом происходит под действием гравитационного сдвига через контактные точки на ее поверхности, через которые проходит «мгновенная» ось поворота частицы в том или ином направлении. Расположение контактных точек на поверхности частицы определяется с учетом локального значения концентрации твердой фазы и в зависимости от соотношения диаметров контрольной частицы и частиц условно однородной среды, которые образуют агрегат. При этом необходимо заметить, что возможность формирования агрегата частиц под действием частицы-концентратора напряжения ограничена относительно высокими значениями концентрации твердой фазы ( $1 - \varepsilon \geq 0,25$ ). Это свидетельствует о том, что при высоких значениях порозности ( $\varepsilon > 0,75$ ) частицы потока находятся в условиях интенсивных хаотических перемещений и эффекты их взаимодействий (перемешивания и разделения) определяются преимущественно диффузионной кинетикой.

Таким образом, динамика перемещения контрольной частицы зависит не только от интенсивности гравитационного сдвига, размеров и физико-механических свойств взаимодействующих частиц, но и структурных характеристик потока. На базе механизма сдвигового поточного разделения кинетика сегрегации описана в форме общего кинетического закона процессов химической технологии. Соответст-

вующий поток сегрегации представлен в виде произведения коэффициента сегрегации  $K_s$  и движущей силы процесса  $\Delta M$

$$j_s = K_s c \rho_b \Delta M. \quad (1.3)$$

В качестве движущей силы сегрегации использован избыточный момент сил, действующих на частицу контрольного компонента относительно мгновенной оси ее поворота, проходящей через точки ее контакта с агрегатом частиц. Избыточный момент вычисляют как разность моментов сил, действующих на частицу контрольного компонента  $M$ , и частицу условно однородной среды  $M_0$  в аналогичных условиях их контакта с агрегатом частиц

$$\Delta M = M - M_0. \quad (1.4)$$

Моменты сил вычисляются с учетом сил тяжести  $M_G$ , трения  $M_T$  и ударных импульсов  $M_Y$ , возникающих под действием гравитационного сдвига условно однородной среды. Например, для частицы контрольного компонента суммарный момент сил определяется как

$$M = M_G + M_T + M_Y. \quad (1.5)$$

Расчетные зависимости для определения моментов сил тяжести, трения и ударных импульсов приведены в работах [2, 37]. Зависимости позволяют с использованием традиционных физико-механических характеристик взаимодействующих частиц (диаметров и плотностей частиц, коэффициентов трения, восстановления и редукции касательной компоненты скорости при ударе), концентрации твердой фазы и скорости сдвига определить величину избыточного момента сил – движущей силы сегрегации  $\Delta M$ . При этом модуль избыточного момента определяет интенсивность поперечного перемещения соответствующих частиц в сдвиговом потоке, а знак – направление перемещения. В случае отрицательного значения  $\Delta M$  частицы перемещаются в направлении основания гравитационного потока, т.е. в область наиболее высоких значений напряжения, а при положительном значении – в противоположном направлении.

Механизм разделения неоднородных частиц, обусловленный неоднородностью структурно-кинематических характеристик сдвигового потока, проанализирован в работах [2, 30] на базе основных положений диффузионной кинетики [38]. В результате выявлен поток квазидиффузионного разделения неоднородных частиц вследствие различных квазидиффузионных скоростей их перемещений в условиях структурной неоднородности сдвигового потока, названный миграци-

ей. В таких условиях частицы, имеющие высокую скорость хаотических перемещений (мелкие, менее плотные, гладкие и упругие), мигрируют в область потока с малой концентрацией твердой фазы, где существуют условия для флуктуаций частиц с большой длиной свободного пробега. Напротив, частицы, приобретающие при взаимных столкновениях в сдвиговом потоке относительно небольшие скорости флуктуаций, мигрируют в область потока с высокой концентрацией твердой фазы, где создаются условия для хаотических перемещений частиц с малыми длинами свободного пробега.

На основе изложенного механизма поток миграции, являющийся следствием взаимной квазидиффузии неоднородных частиц, определен как величина, пропорциональная разности скоростей их квазидиффузии и относительному значению градиента среднего расстояния между частицами. При этом наличие градиента среднего расстояния между частицами является необходимым условием существования миграции, определяющим величину и направление потока квазидиффузионного разделения. Такие свойства градиента позиционируют его как движущую силу миграции, которая и выражается как относительное значение градиента среднего расстояния между частицами

$$\frac{\Delta s}{s \Delta y} \cong \frac{1}{s} \frac{\partial s}{\partial y} = \frac{\partial \ln s}{\partial y}. \quad (1.6)$$

Среднее расстояние между частицами  $s$  определяется как функция порозности и среднего значения диаметра частиц  $\bar{d}$

$$s = \left( \frac{b}{b_0} - 1 \right) \bar{d}, \quad (1.7)$$

где  $b$  – геометрический параметр, вычисляемый в зависимости от порозности  $b = 3 \sqrt{\frac{\pi}{6(1-\varepsilon)}}$ ;  $b_0$  – значение параметра  $b$ , вычисленное при порозности  $\varepsilon_0 = 0,2595$ , соответствующей порозности наиболее плотной гексагональной укладки частиц.

В таком случае разность скоростей квазидиффузии неоднородных частиц в расчете на единицу движущей силы миграции (1.6) соответствует по своим признакам коэффициенту скорости миграции. Выражение для определения коэффициента миграции получено на основе феноменологического анализа явления с привлечением основных положений диффузионной кинетики, адаптированной для случая взаимодействия частиц, различающихся по размеру, плотности, упругости и шероховатости

$$D_m = \frac{\bar{m}(c)(\bar{V}')^2}{2Fk} \left( \frac{d_1^2 k_1}{m_1 \bar{d}^2} - \frac{d_2^2 k_2}{m_2 \bar{d}^2} \right), \quad (1.8)$$

где  $\bar{m}$ ,  $\bar{d}$ ,  $k$  – средние значения массы, диаметра и коэффициента восстановления при столкновении частиц, определяемые как средние объемные характеристики среды [31];  $d_i$  – средние значения диаметров частиц  $i$ -го компонента бинарной смеси;  $k_i$  – средние значения коэффициента восстановления для частиц  $i$ -го компонента, вычисленные с учетом столкновений однородных и неоднородных частиц [31];  $F = V'/s$  – частота столкновений частиц в условно однородной среде;  $\bar{V}'$  – скорость флуктуаций частиц в сдвиговом потоке условно однородной среды.

Скорость флуктуаций частиц  $\bar{V}'$  определяется [14, 31] как функция скорости сдвига исходя из условия сохранения энергии, генерируемой гравитационным сдвигом в потоке частиц в стационарном установившемся потоке. При вычислении скорости используется взаимосвязь между названной энергией и ее диссипацией при взаимодействии частиц в сдвиговом потоке. Энергия диссипации определяется на основе, предложенной в работе [31] комбинированной гипотезы косоугольного удара при столкновении частиц, которая позволяет объединить достоинства классических гипотез Рауса и Ньютона.

С учетом выражений (1.6) и (1.8) для движущей силы и коэффициента скорости процесса, соответственно, поток квазидиффузионного разделения частиц (миграции) в условиях пространственной неоднородности сдвигового потока записывается в следующем виде

$$j_m = D_m c \rho_b \partial \ln s / \partial y. \quad (1.9)$$

Поток перемешивания неоднородных частиц описан в предположении его квазидиффузионного механизма и в соответствии с основными положениями диффузионной кинетики представлен в следующем виде

$$j_d = -D_{dif} \rho_b \partial c / \partial y. \quad (1.10)$$

Коэффициент квазидиффузионного перемешивания  $D_{dif}$  вычисляется как

$$D_{dif} = sV'/2. \quad (1.11)$$

Поскольку скорость флуктуаций частиц  $V'$  и среднее расстояние между частицами  $s$ , входящие в выражение (1.11), вычисляются с учетом локальных значений скорости сдвига, физико-механических свойств частиц и концентрации твердой фазы, то формулировка (1.9) потока перемешивания отражает его зависимость от локальных значений комплекса структурно-кинематических характеристик сдвигового потока и свойств частиц.

С учетом выражений (1.3), (1.9) и (1.10) для потоков сегрегации, миграции и перемешивания, соответственно, уравнение динамики распределения контрольного компонента в двухмерном быстром сдвиговом гравитационном потоке зернистого материала (1.2) записывается в следующем виде

$$\frac{\partial(c\rho_b)}{\partial t} = -\frac{\partial(uc\rho_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho_b \left( D_{dif} \frac{\partial c}{\partial y} - cD_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} - K_s c \Delta M \right) \right]. \quad (1.12)$$

Уравнение (1.12) интегрируется численным методом при граничных условиях, отражающих отсутствие потоков частиц через основание и открытую поверхность гравитационного потока. Опыт использования уравнения (1.12) в исследовательской практике [2, 30, 31] и опытно-конструкторских работах свидетельствует о том, что для описания динамики распределения несвязных неэластичных сферических частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств, при их быстром гравитационном течении по шероховатому скату не требуется ни одного подгоночного коэффициента. Коэффициенты миграции  $D_m$ , перемешивания  $D_{dif}$  и движущая сила сегрегации  $\Delta M$  вычисляются в зависимости от локальных значений структурно-кинематических параметров потока, размера и физико-механических свойств частиц. Что же касается коэффициента сегрегации  $K_s$ , то его значение определяется экспериментально с использованием метода, изложенного в работах [2, 36]. Установлено, что в широком диапазоне параметров потока и свойств частиц коэффициент  $K_s$  соответствует требованиям, предъявляемым к кинетической константе ( $K_s = \text{const}$ ).

### 1.3. УПРАВЛЕНИЕ СЕГРЕГАЦИЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В подавляющем большинстве публикаций сегрегация рассматривается в технологическом аспекте как негативное явление, которое необходимо либо предотвращать на стадии разработки технологии,

регламентируя свойства перерабатываемых материалов, не допускающие интенсивной сегрегации, либо подавлять ее на различных этапах производственного процесса [1, 9, 11, 39 – 41]. В наиболее полном объеме и систематизированной форме методы управления сегрегацией в технологических процессах переработки сыпучих материалов представлены в работе [1]. При изложении методов управления сегрегацией в работе [1] сделан акцент на особой значимости этого вопроса при организации автоматизированных непрерывных технологий, предполагающих наличие технологических узлов с большими объемами материала, подлежащего длительному хранению.

В зависимости от объекта приложения воздействия, противодействующего сегрегации, методы управления сегрегацией разделяются на три категории:

- 1) методы, направленные на изменение свойств сыпучего материала с целью снижения склонности последнего к сегрегации;
- 2) методы, направленные на изменение условий взаимодействия частиц и их контакта с внешней средой и элементами конструкций технологического оборудования, т.е. условий переработки материалов;
- 3) воздействия, имеющие своей целью восстановление однородности сред, нарушенной под действием сегрегации.

Методы первой группы учитывают характеристики свойств частиц, вследствие которых доминирует тот или иной механизм сегрегации. В результате для снижения склонности материала к сегрегации предлагается целенаправленное изменение свойств частиц, оказывающих доминирующее влияние на сегрегацию.

В связи с этим особое внимание уделяется методам подавления склонности частиц к сегрегации, обусловленной их различием по размеру, поскольку в соответствии с большинством механизмов процесса такого рода неоднородность характеризуется доминирующим эффектом. Для снижения склонности к сегрегации частиц по размеру рекомендуется уменьшение размеров частиц до 0,1 мм и менее, уменьшение соотношения размеров крупных и мелких частиц путем агломерации мелкой и измельчения крупной фракции, а также регулирования их соотношения в материале.

В качестве одного из эффективных методов снижения склонности материалов к сегрегации в работе [1] представляется повышение связности частиц путем изменения их формы, структуры и адгезионных свойств поверхности. При этом для достижения цели среди наиболее доступных средств рекомендуется повышение влажности материала и введение связующих веществ.

Методы второй группы предполагают внесение изменений в условия переработки материалов в уже существующем оборудовании. В числе методов этой группы указываются изменение регламента технологических операций, их последовательности, объема партий перерабатываемого материала, скорости потока и его геометрии. Снижение склонности технологического потока к сегрегации рекомендуется путем его рассеяния за счет резкого изменения траектории, дробления потока на части с перекрестным перемещением частей. Следует отдавать предпочтение непрерывным процессам, а при наличии в технологии операции смешения ее целесообразно проводить с максимально возможной отсрочкой по времени, чтобы свести к минимуму число последующих внешних воздействий, инициирующих сегрегацию. В качестве одного из наиболее негативных и распространенных воздействий такого рода названо формирование сдвиговых гравитационных потоков на откосах, образование которых в процессах переработки сыпучих материалов необходимо избегать.

Методы третьей группы, описанные в работе [1], имеют своей целью восстановление однородности сред, нарушенной под действием сегрегации при выполнении технологических операций переработки сыпучих материалов. Особое внимание при этом уделено предотвращению формирования сегрегированных потоков в расходных бункерах. Среди основных методов этой группы указаны технические решения, предполагающие использование вместо проточных бункеров каналов интенсивного перемешивания с применением различного рода перемешивающих вставок, а также преобразование в бункерах режимов течения среды путем устройства токов с пониженными фрикционными свойствами. Для формирования подобного рода потоков необходимо предотвратить образование застойных зон и, соответственно, исключить условия для возникновения сдвиговых течений среды, сопровождающихся ее разрыхлением. Поскольку разрыхление зернистой среды создает благоприятные условия для сегрегации рекомендуются технические решения, направленные на формирование поршневых потоков в расходных бункерах. В качестве одного из эффективных способов восстановления однородности сегрегированной зернистой среды указываются технические решения, реализующие идею избирательного извлечения сегрегированных частей и их объединение в потоке с восстановленной однородностью.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Анализ механизмов сегрегации позволяет сделать вывод не только об их чрезвычайном многообразии, но и об отсутствии достаточно строгой классификации, составленной на основе принципиально раз-

граничных классификационных признаков. В связи с этим, увеличение числа механизмов от одной классификации к другой зачастую не приводит к расширению знаний о сегрегации, но, более того, осложняет изучение названного явления. В связи с этим актуальными являются исследования, имеющие своей целью изучение механизмов и кинетических закономерностей сегрегации для наиболее общих и практически значимых случаев течения зернистых сред.

Наиболее общей формой перемещения дисперсных сред является сдвиговое течение. Среди сдвиговых течений зернистых материалов особое место занимают быстрые гравитационные течения, которые широко распространены в природных явлениях и технологических процессах. Такие течения характеризуются высокой неоднородностью структурно-кинематических характеристик потока и сопровождаются ярким проявлением эффектов перемешивания сегрегации и миграции неоднородных частиц.

Обзор подавляющего большинства работ, посвященных исследованию динамики сдвиговых гравитационных потоков, свидетельствует о том, что анализ эффектов взаимодействия частиц осуществляется без учета структурной неоднородности зернистых сред в предположении их несжимаемости. Вместе с тем результаты исследований и их анализ свидетельствуют о том, что допущение структурной однородности гравитационных потоков препятствует разработке адекватных механизмов взаимодействия неоднородных частиц и ограничивает прогностические возможности соответствующих математических моделей динамики сегрегации.

Анализ литературных источников свидетельствует о доминировании одностороннего взгляда на сегрегацию как на явление, сопровождаемое множеством негативных последствий в технологиях, связанных с производством и переработкой зернистых материалов. В связи с этим первостепенное внимание в исследованиях уделяется методам предотвращения и подавления эффектов сегрегации. Однако, анализ технологически значимых эффектов сегрегации позволяет сделать вывод о том, что традиционное восприятие сегрегации в качестве только негативного явления является сдерживающим фактором в развитии способов ее технологического использования для организации гидромеханических и тепломассообменных процессов, протекающих с участием неоднородных зернистых материалов.

Целесообразность технологического использования эффектов сегрегации определяет необходимость разработки научно обоснованных способов не только подавления сегрегации, но и ее интенсифика-

ции. Решение такого рода задачи предполагает разработку научно обоснованных принципов управления сегрегацией на основе анализа кинетических закономерностей процесса с учетом движущих сил и сопротивлений в потоках разделения неоднородных частиц. Выполнен анализ кинетических зависимостей сегрегации, соответствующих механизмам протекания процесса в условиях локальной и пространственной неоднородности сдвигового потока зернистой среды. В результате анализа определены механизмы разделения (сегрегации и миграции) частиц и разработанные на их базе математические модели процесса, которые характеризуются необходимыми прогностическими свойствами, определяющими зависимость скорости процесса в зависимости от комплекса физико-механических свойств частиц, структурных и кинематических параметров сдвигового потока. Сделан вывод о целесообразности использования физических полей для управления структурно-кинематическими характеристиками сдвигового потока и эффектами сегрегации и миграции.

## **2. ЭФФЕКТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЧАСТИЦ В ПОПЕРЕЧНО ПРОДУВАЕМЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКАХ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

---

### **2.1. О МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Поперечно аэрированные потоки сыпучих материалов используются в технологиях для организации процессов тепло- и массопереноса, сепарирования и пневмотранспорта в открытых каналах. Достаточно обширные исследования, например, исследования, проведенные в работе [42], свидетельствуют о существенном влиянии поперечного аэрирования на динамику гравитационных течений сыпучих материалов, что проявляется в значительной зависимости скорости сдвига и порозности в потоке среды от интенсивности продувки. В соответствии с экспериментальными и аналитическими исследованиями, выполненными в работах [2, 30, 31, 43], значения скорости сдвига и порозности, а также характер их изменения в потоке являются определяющими факторами в развитии эффектов разделения (сегрегации) и перемешивания частиц в сдвиговых потоках зернистых сред.

Эффекты сегрегации и перемешивания в поперечно аэрированных гравитационных потоках зернистых материалов инициируют интенсивное взаимное перемещение частиц и существенно влияют на однородность зернистой среды, динамику ее течения и кинетику технологических процессов. Несмотря на очевидную практическую значимость решения задачи прогнозирования названных эффектов, в литературе практически отсутствует информация по исследованиям, направленным на изучение влияния на эти эффекты направления и интенсивности продувки. Настоящая глава посвящена исследованию процессов разделения и перемешивания в поперечно продуваемых быстрых гравитационных потоках зернистых материалов, частицы которых различаются по размеру и плотности. При этом под зернистым материалом следует понимать несвязные сыпучие материалы, в которых силы сцепления между частицами пренебрежимо малы по сравнению с инерционными, в том числе гравитационными силами. В связи с этим зернистые материалы отличаются от порошкообразных более крупным размером частиц, который в общем случае составляет величину, превышающую  $1 \cdot 10^{-4}$  м [1].

Для прогнозирования названных эффектов, очевидно, необходимо располагать информацией о структурных и кинематических характеристиках соответствующих потоков. Однако, анализ существующих методов аналитического описания профилей скорости и порозности быстрых сдвиговых гравитационных потоков зернистых материалов, приведенный в работах [34, 44], свидетельствует, что они имеют весьма ограниченные возможности и предсказывают существование стационарного режима только в узком диапазоне углов наклона гравитационного ската, что не соответствует действительности.

В числе основных причин названных недостатков моделей указаны отсутствие учета передачи импульса вследствие квазидиффузионного перемешивания частиц и зависимости эффективного коэффициента трения от концентрации твердой фазы, а также проблемы, связанные с формулировкой граничных условий.

Значительные трудности возникают и на пути экспериментального исследования быстрых гравитационных течений зернистых материалов. Основные из них, согласно работам [34, 45 – 49], обусловлены сложностью определения локальных значений скорости флуктуаций и поступательного перемещения частиц, а также концентрации твердой фазы вследствие чрезвычайной чувствительности быстрых сдвиговых течений к зондированию и наличия значительных граничных эффектов, препятствующих получению объективной визуальной информации в потоке в целом. В последнее время для исследования закономерностей быстрых сдвиговых течений все более широко применяются методы, основанные на использовании различного рода проникающих излучений, например методы рентгенографии и компьютерной томографии [45 – 49]. Однако и эта далеко неординарная техника не позволяет пока получить необходимый комплекс информации локальных структурных и кинематических характеристиках быстрого сдвигового потока и требует поиска дополнительных путей получения недостающей информации [43].

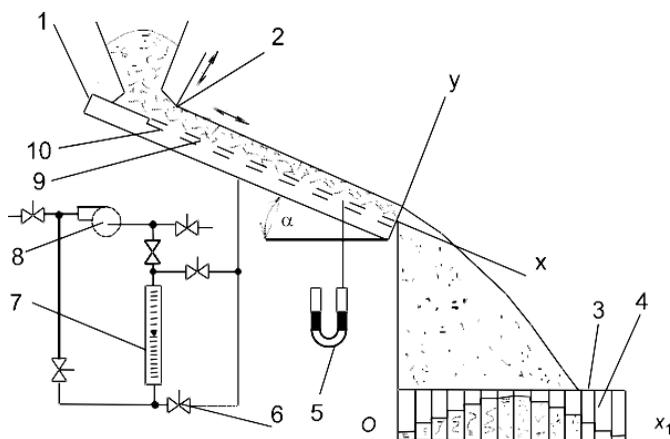
В связи с изложенным в настоящей работе для получения комплексной информации по динамике быстрого сдвигового гравитационного течения используется экспериментально-аналитический метод [30, 31, 34, 43], основанный на анализе фазы свободного падения частиц, покидающих порог ссыпания шероховатого ската. Метод характеризуется достаточно высокими прогностическими свойствами, что подтверждается результатами исследований, проведенных в работе [30, 36].

В настоящей работе названный метод адаптирован для решения задачи исследования динамики поперечно азрированных гравитацион-

ных потоков зернистых материалов и проявляющихся при этом эффектов разделения и перемешивания частиц, различающихся по размеру и плотности [50].

Экспериментальная установка (рис. 2.1) состоит [50] из открытого наклонного канала прямоугольного сечения, имеющего шероховатое основание. Под сыпным порогом ската на некотором расстоянии по вертикали установлена горизонтальная кювета, разделенная поперечными перегородками на ячейки, предназначенные для приема падающих частиц. В верхней части канала установлена ограничительная пластина, позволяющая регулировать длину движущегося слоя частиц. Зернистый материал дозируется с заданным расходом непосредственно в канал выше ограничительной пластины.

Основание канала изготовлено из двух параллельных стальных пластин, верхняя из которых имеет отверстия диаметром  $8 \cdot 10^{-3}$  м, занимающих 70% площади основания, а нижняя имеет перфорации диаметром  $2 \cdot 10^{-3}$  м при живом сечении 30%. Расстояние между пластинами эквивалентно половине диаметра крупных частиц зернистых материалов. Пластины закрыты снизу воздухораспределительным коробом. Вследствие такого исполнения перфорированное основание приобретает необходимую шероховатость, равную половине диаметра наиболее крупных частиц, и выполняет функцию воздухораспределителя.



**Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки:**

- 1 – шероховатый скат; 2 – пластина ограничительная; 3 – кювета;
- 4 – перегородки; 5 – дифференциальный микроманометр; 6 – кран запорный;
- 7 – ротаметр; 8 – вентилятор; 9, 10 – пластины перфорированные

Воздухораспределительный короб связан воздуховодами с системой продувки воздуха через слой, позволяющей изменять направление и интенсивность продувки. Система продувки снабжена ротаметром для измерения расхода воздуха и дифференциальным микроманометром для определения потерь напора при поперечном аэрировании потока частиц.

Исследование проведено в соответствии со следующей методикой. После установки необходимого угла наклона ската, его длины и интенсивности продувки зернистый материал дозируют в канал выше ограничительной пластины. До момента достижения режима стационарного течения сыпавшийся материал принимают в буферную емкость, а затем в течение определенного времени падающими частицами заполняют ячейки горизонтальной кюветы. Время наступления стационарного состояния определяют экспериментально путем исследования зависимости распределения частиц по ячейкам кюветы от длины ската и времени.

Содержимое ячеек взвешивают и определяют функцию распределения массы материала  $G(x_1)$  по горизонтальной координате  $Ox_1$ . Кроме того, измеряют высоту слоя на пороге сыпания  $h$ , время сыпания  $\tau$ , расстояние  $H$  между порогом сыпания и угол наклона канала  $\alpha$  (см. рис. 2.1).

Профили скорости  $u(y)$  и порозности  $\varepsilon(y)$  в слое частиц определяются с учетом взаимосвязи между локальными значениями порозности слоя  $\varepsilon(y)$ , скорости сдвига  $du/dy$ , модуля скорости  $u(y)$  и распределением частиц по горизонтальной координате  $G(x_1)$ . Модуль скорости  $u(y)$  и порозность слоя  $\varepsilon(y)$  в быстром гравитационном потоке зернистого материала на шероховатом скате связывают следующие уравнения:

$$|\bar{u}| = \frac{x_1 - y \sin \alpha}{\cos \alpha [(H + y \cos \alpha - (x_1 - y \sin \alpha) \operatorname{tg} \alpha) 2/g]^{1/2}}, \quad (2.1)$$

$$u(y, x_1) \rho (1 - \varepsilon(y)) = G(x_1), \quad (2.2)$$

Для образования замкнутой системы уравнений (2.1) и (2.2) дополняются уравнением состояния зернистой среды при быстром сдвиге

$$\rho(y) \bar{\varepsilon}(y) = \chi (du/dy)^2, \quad (2.3)$$

которое определяет формальное физическое подобие анализируемого объекта с плотным газом в виде взаимосвязи между давлением, сво-

бодным объемом и температурой. В уравнении (2.3)  $p(y)$  является аналогом гидростатического давления, вычисляемого как

$$p(y) = \int_{h-y}^h p(y)g \cos \alpha dy, \quad (2.4)$$

а  $\bar{\varepsilon}(y)$  представляет собой дилатансию (относительное увеличение объема слоя), определяемую как

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

где  $\varepsilon_0$  – порозность слоя неподвижных частиц в отсутствие сдвиговых деформаций.

В результате решения системы уравнений (2.1) – (2.4) методом последовательных приближений получают профили скорости  $u(y)$  и порозности  $\varepsilon(y)$ . При этом на первом шаге приближений полагают, что величина порозности в слое постоянна ( $\varepsilon(y) = \text{const}$ ).

## **2.2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ПОПЕРЕЧНО ПРОДУВАЕМОГО БЫСТРОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Исследование выполнено в режиме развитого установившегося сдвигового течения [42] вблизи границы с режимом расплескивающегося течения. Интерес к указанному режиму течения объясняется тем, что последний характеризуется условиями взаимодействия частиц, обеспечивающими высокую интенсивность сегрегации. Интенсивному протеканию сегрегации в таком режиме способствуют с одной стороны высокая скорость сдвига, а с другой стороны – высокие значения концентрации частиц. В отсутствие поперечного аэрирования такой режим существует при углах ската, близких углу естественного откоса материала [13]. Очевидно, что в поперечно аэрируемом потоке указанный режим течения достигается за счет соответствующего изменения угла ската. Подобие режимов течения при изменении интенсивности продувки достигалось путем такого изменения угла ската, в результате которого задержка частиц на скате оставалась неизменной и равной таковой для случая без продувки. Задержка оценивалась путем определения массы частиц, остающихся на шероховатом скате после завершения процесса ссыпания.

Кроме того, соблюдение названного подобия контролировалось методом, предложенным в работе [42]. Метод заключался в том, что согласно [42] минимальная толщина слоя скатывающихся частиц наблюдается в режиме течения, который соответствует границе между развитым сдвиговым и расплескивающимся течением.

В настоящем исследовании установлено, что аналогичная зависимость толщины слоя частиц от режима течения наблюдается в поперечно аэрированных гравитационных потоках с продувкой не только в направлении от основания слоя, но и в обратном направлении. Более того, установлено, что в таком режиме течения толщина слоя скатывающихся частиц практически не зависит от направления и интенсивности продувки, но является только функцией величины потока. В результате комплексного использования названных методов исследования обеспечивалась достаточно высокая надежность процедуры идентификации режима течения и его воспроизводимость при изменении условий аэрирования. Вследствие этого стало возможным обобщение результатов исследования в отношении условий поперечно аэрированного гравитационного течения зернистых материалов.

В исследовании использованы модельные смеси зернистых материалов (табл. 2.1), частицы которых различались либо по размеру, либо по плотности, а также зерновая смесь, состоящая из частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств (размеру, плотности, форме и др.). Результаты экспериментального исследования позволили установить зависимость между относительными значениями интенсивности продувки ( $w/w_{кр}$ , где  $w_{кр}$  – критическая скорость псевдооживления) при различных ее направлениях и угла ската ( $\sin\alpha/\sin\alpha_0$ , где  $\alpha_0$  – угол естественного откоса материала), соответствующих режиму установившегося сдвигового течения на границе с расплескивающимся течением.

На рисунке 2.2 представлены обобщенные результаты исследования, которые позволяют прогнозировать условия гравитационного течения, характеризующегося наиболее высокими скоростями сдвига при относительно низких значениях порозности. Результаты обнаруживают единую линейную зависимость между безразмерными значениями угла ската и скоростями аэрирования для противоположных направлений продувки. При обобщении использованы также экспериментальные данные, полученные в работе [42]. При этом отрицательные значения скорости соответствуют продувке в направлении от открытой поверхности слоя к его основанию, а положительные значения – продувке в противоположном направлении.

## 2.1. Характеристики смесей зернистых материалов

№	Наименование материала	$d \cdot 10^3, \text{ м}$	$p_b, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$\alpha_0, \text{ град}$	$w_{кр}, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
1	Силикагель (КСМ)	+3,5 – 3,75 – 50% +4,25 – 4,5 – 50%	1015	30	0,94
2	Суперфосфат	+2,2 – 2,5 – 50% +2,8 – 3,0 – 50%	1800	35	0,959
3	Керамика	5,5 – 50% 7,0 – 50%	2500	30,5	1,71
4	Суперфосфат-Силикагель (КСК)	+3,75 – 4,0 – 85% +3,75 – 4,0 – 15%	1800 785	35	1,18
5	Суперфосфат	+2,0 – 2,2 – 50% +2,6 – 2,8 – 50%	1800	35	0,88
6	Суперфосфат	+3,5 – 3,75 – 50% +4,0 – 4,25 – 50%	1800	35	1,27
7	Силикагель (КСМ)	+3,5 – 3,75 – 50% +4,0 – 4,25 – 50%	1015	30	0,919
8	Силикагель (КСК)-Силикагель (КСМ)	+4,0 – 4,25 – 10% +4,0 – 4,25 – 90%	785 1015	30	0,94
9	Ячмень-овсюг		660	36	1,02

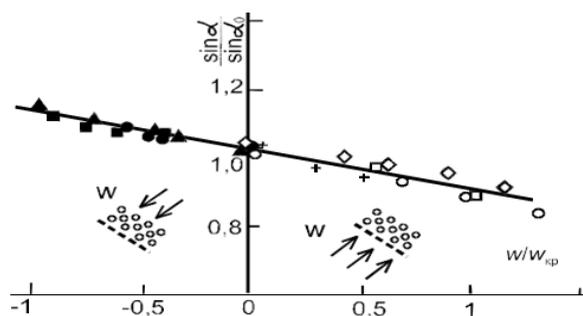


Рис. 2.2. Зависимость скорости продвки  $w/w_{кр}$  от угла наклона ската

$\sin \alpha / \sin \alpha_0$  для различных материалов (табл. 2.1):

○ – смесь 2; + – смесь 3; ◇ – смесь 4; ● – смесь 5; ■ – смесь 6;

◆ – смесь 7; □ – стеклянный бисер [42]

Для определения профилей скорости  $u(y)$ , порозности  $\varepsilon(y)$  и концентрации контрольных частиц  $c(y)$  в гравитационном потоке использован ранее изложенный экспериментально-аналитический метод. В настоящей работе этот метод адаптирован для условий поперечно продуваемого гравитационного потока. Адаптация проведена путем учета в уравнении состояния зернистой среды (2.3) составляющей гидродинамического давления  $p_d(y)$ . С учетом этой составляющей общее давление в зернистой среде  $p(y)$  вычисляется как алгебраическая сумма гидростатического  $p_s(y)$  и гидродинамического давлений. При относительно небольших скоростях аэрирующего воздуха для определения гидродинамического давления используется уравнение Козени–Кармана [51].

В результате суммарное давление в поперечно аэрируемом потоке зернистой среды выражается [50] в следующей интегральной форме:

$$p(y) = p_s(y) + p_d(y) = \int_{h-y}^h \rho(1 - \varepsilon(y))g \cos \alpha dy + \\ + \int_{h-y}^h \frac{\lambda}{\varphi d_c(y)} \frac{\rho_g w^2}{2} \frac{1 - \varepsilon(y)}{\varepsilon(y)^3} dy, \quad (2.5)$$

где  $\lambda$ ,  $\varphi$  – коэффициенты соответственно гидравлического сопротивления и формы частиц;  $d_c$  – эквивалентный диаметр каналов в слое частиц; Этот диаметр вычисляется как функция порозности и среднего диаметра частиц

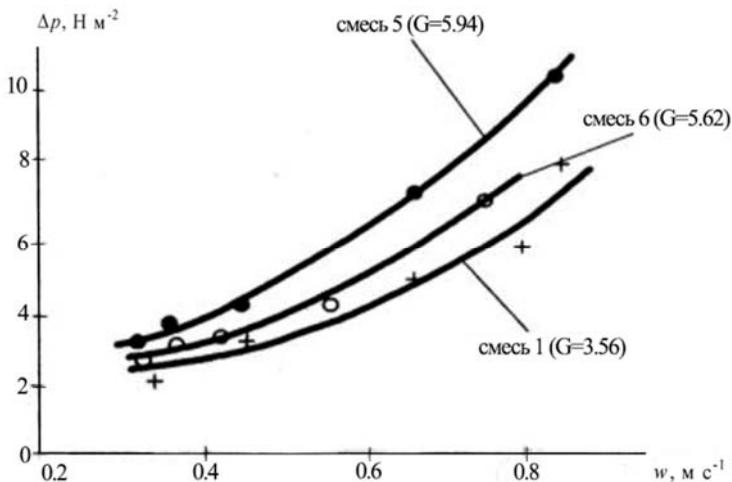
$$d_c(y) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left( \sqrt[3]{\frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon(y)}} \right)^2 \bar{d} - \bar{d}. \quad (2.6)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления выражен итерационным методом в виде следующей функции числа Re

$$\lambda = A \cdot \text{Re}^{-0,46}, \quad \text{Re} = 20 \dots 150, \quad (2.7)$$

где  $A = 5 \dots 8$ .

Использованная в работе итерационная процедура в основной своей части аналогична процедуре, подробно описанной в работе [34]. Эта процедура включает одновременное определение профилей скорости, порозности и концентрации контрольных частиц в поперечном сечении слоя и отличается от известной тем, что выполняется с учетом зависимости давления в слое от интенсивности его продувки. При этом для определения общего давления в слое составляющей используется экспериментально определяемая зависимость гидродинамического давления от интенсивности аэрирования (рис. 2.3).



**Рис. 2.3.** Зависимость общего гидродинамического сопротивления  $\Delta p$  от интенсивности аэрирования и в поперечно аэрируемом гравитационном потоке для различных смесей (табл. 2.1) при постоянной  $G$  (кг(м·с)<sup>-1</sup>)

В первом приближении величина коэффициента гидравлического сопротивления вычисляется путем решения обратной задачи на базе уравнения Козени–Кармана (второе слагаемое уравнения (2.3)) при допущении, что порозность слоя стабильна по высоте слоя ( $\varepsilon_1(y) = \text{const}$ ). Путем вычисления коэффициента  $\lambda$  для ряда значений числа  $Re$  строится график зависимости  $\lg \lambda_1 = f(\lg Re)$ , которая используется для выражения зависимости (2.7) в первом приближении.

Все дальнейшие приближения, в отличие от первого, учитывают изменение порозности по высоте слоя ( $\varepsilon_1(y) \neq \text{const}$ ). При этом учитывается определяющее влияние на общее гидравлическое сопротивление слоя его центральной, наиболее плотной части. На рисунке 2.4 приведены результаты исследования в виде зависимости  $\lg \lambda = f(\lg Re)$  для различных зернистых материалов.

Анализ результатов исследования позволяет сделать вывод, что уравнение (2.7) подобно уравнению Аллена [51] для случая обтекания сферы в переходном режиме. Однако, наблюдаемые отличия между уравнениями указывают на то, что исследуемая задача гидродинамики потока, омывающего частицы, обнаруживает свойства смешанной задачи гидродинамики, характерные для псевдооживленного слоя.

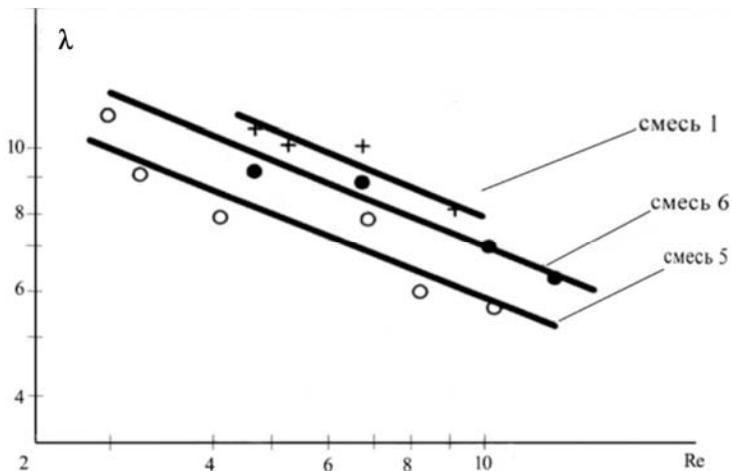


Рис. 2.4. Зависимость  $\lambda = f(\text{Re})$  для различных зернистых материалов (табл. 2.1)

### 2.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИИ И МИГРАЦИИ В ПОПЕРЕЧНО ПРОДУВАЕМОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТОКЕ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

Влияние поперечного азирования на сегрегацию в гравитационном потоке зернистых материалов (табл. 2.1) проанализировано путем определения распределения частиц контрольного компонента по высоте слоя на шероховатом скате (рис. 2.1) с использованием методики, описанной в разделе 2.1.

Для оценки величины эффекта сегрегации использован коэффициент вариации, который вычислялся как отношение стандартного (среднеквадратичного) отклонения концентрации к ее среднему значению, выраженное в процентах:

$$V = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n m_i (c_i - \bar{c})^2}{\sum_{i=1}^n (m_i (n-1))}}, \quad (2.8)$$

где  $\bar{c}$ ,  $c_i$  — концентрация контрольных частиц средняя и в  $i$ -й ячейке приемной кюветы (рис. 2.1), соответственно;  $m_i$  — масса частиц в  $i$ -й ячейке.

На рисунке 2.5 представлены результаты экспериментального исследования влияния интенсивности продувки в направлении от основания к открытой поверхности слоя зернистых материалов (табл. 2.1)

на шероховатом скате. Исследование, проведенное при высотах слоя, равных 6...8 диаметрам частиц, обнаруживает, что продувка способствует снижению эффекта сегрегации частиц по размеру (смеси 1, 2, 3) и его увеличению для частиц, различающихся по плотности (смесь 4). Однако, влияние продувки относительно невелико до тех пор, пока интенсивность продувки не достигнет значений, соответствующих скорости начала псевдооживления. Очевидно, это объясняется возрастанием роли пневматической сепарации при высоких скоростях продувки.

При продувке в направлении от открытой поверхности слоя к его основанию (рис. 2.6) эффективность сегрегации возрастает с увеличением интенсивности продувки до значения  $\approx 0,45w_{кр}$  и уменьшается при дальнейшем увеличении интенсивности. Такой характер влияния продувки на сегрегацию является общим для частиц, различающихся по размеру и плотности. При этом снижение эффективности сегрегации с увеличением интенсивности продувки наблюдается даже при скоростях продувки, превышающих критическую скорость псевдооживления.

Анализ результатов исследования свидетельствует о доминирующем влиянии сегрегации на распределение неоднородных частиц в гравитационном поперечно продуваемом потоке зернистого материала в широком диапазоне интенсивности аэрирования.

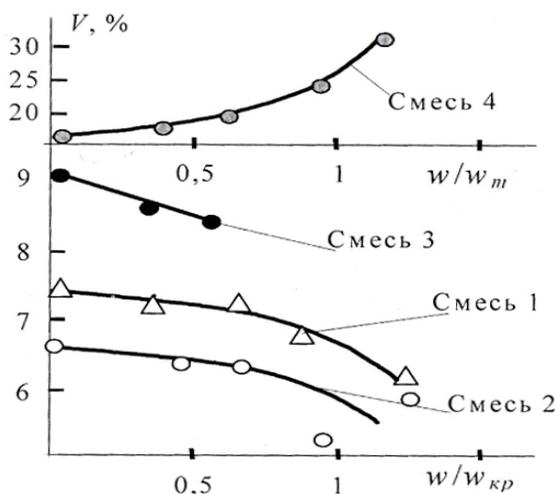
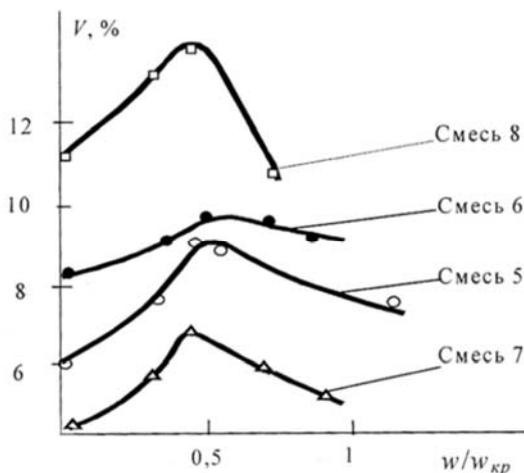


Рис. 2.5. Влияние интенсивности продувки в направлении от основания к открытой поверхности слоя на эффективность сегрегации смесей 1, 2, 3, 4 (табл. 2.1)

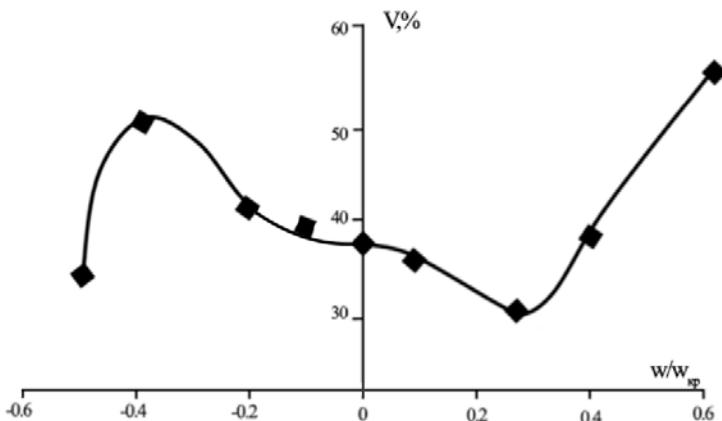


**Рис. 2.6. Влияние интенсивности продувки в направлении от открытой продувки поверхности слоя к его основанию на эффективность сегрегации смесей 5, 6, 7, 8 (табл. 2.1)**

Максимальная эффективность сегрегации частиц как по размеру, так и по плотности наблюдается при продувке в направлении от открытой поверхности слоя к его основанию со скоростью, равной  $0,45w_{кр}$ , и при угле ската  $\alpha$ , определяемом из условия  $\sin\alpha/\sin\alpha_0 = 1,055$ .

Известно, что размер и плотность частиц являются характеристиками частиц, которые в наибольшей степени определяют их склонность к сегрегации. Однако, значительное число зернистых материалов в сельском хозяйстве, пищевой и перерабатывающей промышленности содержат частицы, которые различаются не только по размеру или плотности, но и являются существенно неоднородными одновременно по комплексу физико-механических характеристик, включая форму, шероховатость, упругость и другие свойства.

В связи с этим определенным интересом представляет анализ влияния направления и интенсивности продувки на распределение неоднородных частиц в гравитационном потоке такого рода материалов. В качестве примера на рис. 2.7 приведены результаты исследования степени неоднородности распределения примеси овсяга в гравитационном потоке ячменя при различных режимах его аэрирования. Сравнение характера полученных зависимостей с ранее представленными на рис. 2.5 и 2.6, свидетельствует о наличии как значительной их аналогии, так и некоторых отличительных особенностей.



**Рис. 2.7. Эффективность сегрегации примеси семян овсяга в ячмене (смесь 9, табл. 2.1) в зависимости от скорости и направления продувки гравитационного потока**

Аналогия, в области малых скоростей продувки для альтернативных вариантов ее организации, объясняется доминирующим значением различия частиц по размеру. Изменения характера зависимостей с увеличением скорости продувки являются вполне закономерными, если принять во внимание различную парусность (форму и плотность) ячменя и овсяга. Кроме того, обращает на себя внимание то, что наиболее высокая неоднородность распределения частиц при продувке от открытой поверхности к основанию слоя наблюдается при интенсивности  $\bar{w}/w_{кр} \approx 0,45$ , в чем обнаруживается аналогия с результатами, полученными ранее с частицами различного размера и плотности (рис. 2.5 и 2.6).

Для объяснения наблюдаемых эффектов аэрирования проведен анализ профилей скорости  $u(y)$  и порозности  $\varepsilon(y)$  в гравитационных потоках смеси 7 (табл. 2.1) с продувкой и без нее. Профили получены с использованием экспериментальной установки и методики, описанной в разделе 2.1.

Результаты исследования влияния интенсивности продувки на профили скорости и порозности представлены на рис. 2.8 (продувка от основания к открытой поверхности слоя) и рис. 2.9 (продувка от открытой поверхности к основанию). Результаты показывают, что увеличение интенсивности продувки в направлении к открытой поверхности слоя (рис. 2.8) сопровождается увеличением крутизны (наполненности) профиля скорости.

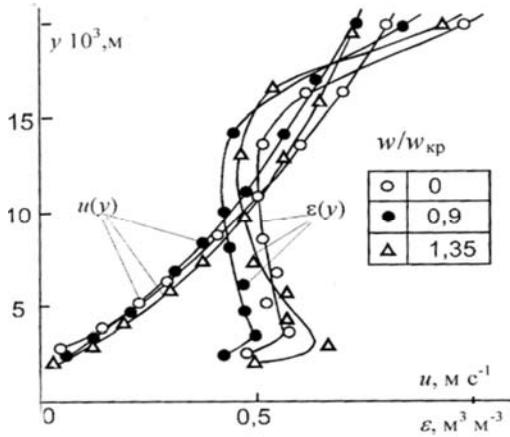


Рис. 2.8. Профили скорости  $u(y)$  и порозности  $\varepsilon(y)$  для смеси 7 (табл. 2.1) при различных скоростях продувки  $w/w_{кр}$  в направлении от основания к открытой поверхности слоя

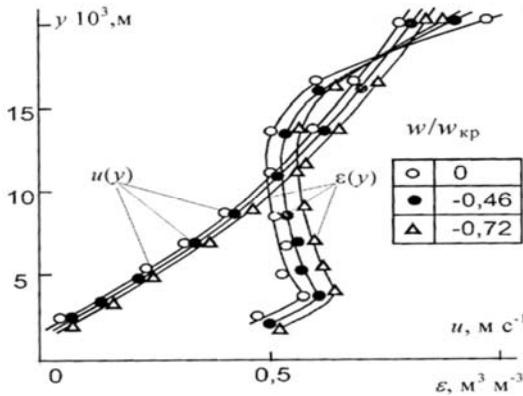


Рис. 2.9. Профили скорости  $u(y)$  и порозности  $\varepsilon(y)$  для смеси 7 (табл. 2.1) при различных скоростях продувки  $w/w_{кр}$  в направлении от открытой поверхности слоя к его основанию

Такое изменение профиля приводит к снижению скорости сдвига и порозности, вследствие чего снижается интенсивность сегрегации частиц по размеру (рис. 2.5). Некоторое повышение сегрегации частиц по плотности, очевидно связано с усилением миграции плотных частиц в центральную, более плотную часть слоя, уплотнение которой сопровождается увеличением градиента концентрации твердой фазы –

движущей силы миграции [30, 31] (см. раздел 1.2). При скорости воздуха  $w = w_{кр}$  наблюдаются эффекты сегрегации, которые очевидно связаны с усилением перемешивания частиц и пневматической сепарацией.

При продувке в направлении от открытой поверхности к основанию слоя (рис. 2.9) первоначальное увеличение скорости воздуха приводит к увеличению скорости сдвига при относительно небольшом изменении порозности. Такая эволюция структурно-кинематических характеристик потока способствует интенсификации сегрегации по механизму сдвигового поточного разделения. Дальнейшее увеличение скорости продувки выше значения  $w \approx 0,45w_{кр}$  сопровождается повышением порозности при незначительном изменении скорости сдвига. Такое изменение в характеристиках потока становится причиной интенсификации перемешивания частиц (рис. 2.6) за счет увеличения длины свободного пробега частицы и, как следствие, увеличения коэффициента квазидиффузионного перемешивания, величина которого вычисляется в соответствии с выражением (1.11) [43].

#### **2.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЧАСТИЦ В ПОПЕРЕЧНО ПРОДУВАЕМОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТОКЕ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА**

В целях прогнозирования влияния продувки на эффекты разделения и перемешивания неоднородных частиц в гравитационных потоках зернистых материалов и выявления основных физических механизмов этого влияния проведено математическое моделирование динамики сегрегации. Моделирование выполнено на базе ранее разработанного общего уравнения динамики сегрегации [30, 31], которое для случая двухмерного установившегося гравитационного течения имеет вид

$$\frac{\partial(c\rho_b)}{\partial t} = -\frac{\partial(uc\rho_b)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho_b \left( D_{dif} \frac{\partial c}{\partial y} - D_m c \frac{\partial \ln s}{\partial y} - K \Delta M c \right) \right). \quad (2.9)$$

Динамика распределения контрольных частиц в потоках  $c(x, y, t)$  описывается при этом с учетом потоков конвекции, квазидиффузионного перемешивания, сдвигового поточного разделения (сегрегации) и миграции и достаточно подробно проанализирована в разделе 1.2. Для случая быстрого сдвигового течения несвязных неэластичных

сферических частиц все кинетические параметры уравнения (2.9), за исключением коэффициента сегрегации  $K$ , вычисляются аналитически, как функции традиционных физико-механических свойств частиц и структурно-кинематических параметров потока [31, 36]. Коэффициент сегрегации определяется экспериментально как кинетическая константа с использованием метода, предложенного в работе [36].

При моделировании потока сегрегации необходимо вычислять движущую силу процесса, в качестве которой используется параметр неоднородности зернистой среды  $\Delta M$ . В условиях сдвигового потока без продувки  $\Delta M$  вычисляется (1.4) как избыточный суммарный момент сил тяжести, трения и ударных импульсов, действующих на контрольную частицу в конкретных условиях ее взаимодействия с частицами потока [36]. Однако, в случае поперечно аэрируемого потока избыточный момент  $\Delta M$  должен рассчитываться с учетом силы гидродинамического давления, действующей на частицы со стороны проникающего газа.

Момент силы гидродинамического давления вычисляется в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 2.10. На базе этой схемы, которая аналогична ранее использованной в работе [52], получено следующее выражение для определения момента силы гидродинамического давления:

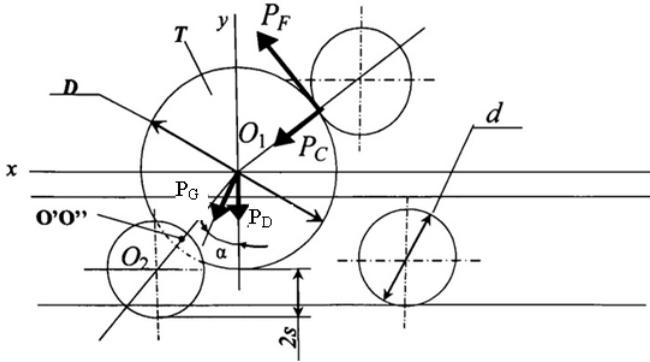
$$M_D = \frac{d(p_d(y))D^4}{dy} \frac{\pi((d+D)^2 - (d+s)^2)^{\frac{1}{2}}}{8(d+D)} \times \cos \left( \arcsin \frac{D-d+4s}{((d+D)^2 - (d+s)^2)^{\frac{1}{2}}} \right), \quad (2.10)$$

где  $p_d(y)$  – гидродинамическое давление, которое вычисляется в соответствии со вторым слагаемым уравнения (2.5).

С учетом зависимости (2.10) движущая сила сегрегации вычисляется в виде следующего избыточного суммарного момента сил:

$$\Delta M = M - M_0, \quad (2.11)$$

где  $M = M_G + M_F + M_C + M_D$  – суммарный момент сил тяжести, трения, ударных импульсов и гидродинамического давления, действующих на контрольную частицу относительно мгновенной оси ее вращения (рис. 2.10);  $M_0$  – аналогичный момент сил, действующих на частицу условно однородной среды при аналогичных условиях течения [52].



**Рис. 2.10.** Схема взаимодействия частиц в поперечно аэрируемом слое:  
*T* – контрольная частица; *O'O''* – мгновенная ось вращения  
 контрольной частицы

Математическое моделирование динамики концентрационного поля  $c(x, y, t)$  было проведено путем интегрирования уравнения (2.9) численным методом при начальном условии

$$c(x, y, 0) = c_0, \quad (2.12)$$

где  $c_0$  – средняя концентрация контрольных частиц в смеси.

Граничные условия сформулированы из условия отсутствия поперечных потоков частиц у основания и открытой поверхности слоя и равномерного распределения компонентов смеси в поперечном сечении слоя на его границе  $x = 0$

$$D_{dif} \frac{\partial c}{\partial y} = D_m c \frac{\partial \ln s}{\partial y} = K \Delta M c = 0, \quad \text{при } y = 0, h, \quad (2.13)$$

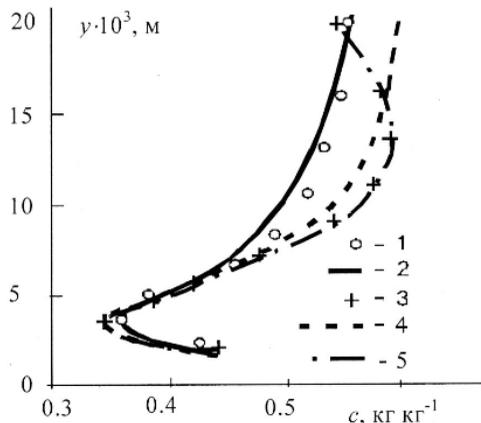
$$c(0, y, t) = c_0. \quad (2.14)$$

Необходимые для моделирования структурные и кинематические характеристики потока получены с использованием профилей скорости и порозности для смеси 7 (рис. 2.9). Полученные в результате моделирования концентрационные профили представлены на рис. 2.11 и 2.12 в сравнении с экспериментальными. Анализ полученных профилей свидетельствует об удовлетворительной адекватности расчетных и экспериментальных результатов. Среднее квадратичное отклонение составляет около 5%.

С целью выявления роли различных механизмов перераспределения частиц в потоках с продувкой в направлении к основанию слоя и без продувки использованы два варианта моделирования. В первом

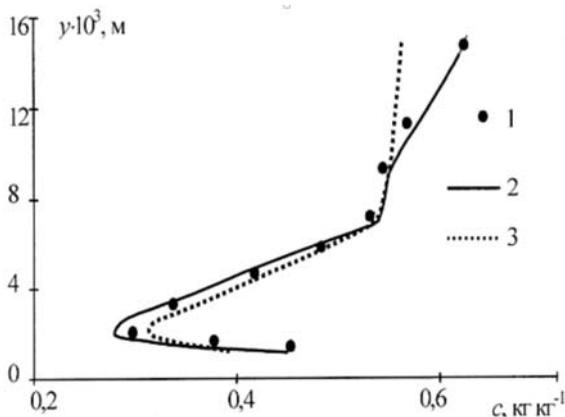
варианте моделирования учитывали все элементарные потоки, приводящие к перераспределению неоднородных частиц зернистой среды в полном соответствии с общим уравнением динамики сегрегации (2.9). Во втором варианте моделирования пренебрегали потоком миграции частиц, т.е. полагали, что коэффициент миграции  $D_m = 0$ .

В результате моделирования представилось возможным определить, что продувка приводит к изменениям структурно-кинематических характеристик гравитационного потока, которые существенно влияют на кинетику процессов переноса неоднородных частиц под действием различных механизмов. В частности, согласно результатам, приведенным на рис. 2.11, влияние миграции на распределение частиц в потоке без продувки является несущественным, в то время как в продуваемом слое роль миграции становится значительной. Кроме того, результаты моделирования свидетельствуют (рис. 2.11), что продувка способствует интенсификации процессов миграции в области потока, расположенной вблизи открытой поверхности слоя, и сдвигового поточного разделения (сегрегации) в центральной, наиболее плотной части слоя. Такие изменения в кинетике процессов переноса неоднородных частиц объясняется увеличением скорости сдвига по всему объему слоя и его разрыхлением вблизи открытой поверхности потока.



**Рис. 2.11. Профили концентрации в гравитационном потоке смеси 7 (табл. 2.1) при различных скоростях потока воздуха при продувке от открытой поверхности слоя к его основанию:**

- 1 –  $w/w_m = 0$  (эксперимент); 2 –  $w/w_m = 0$  (расчет при  $D_m = 0$ );  
 3 –  $w/w_m = -0,46$  (эксперимент); 4 –  $w/w_m = -0,46$  (расчет при  $D_m = 0$ );  
 5 –  $w/w_m = -0,46$  (расчет по уравнению (2.9))



**Рис. 2.12. Профили концентрации в гравитационном потоке смеси 5 (табл. 2.1) при скорости потока воздуха  $w/w_{кр} = -0,405$  при продувке от открытой поверхности слоя к его основанию:**

1 – эксперимент; 2 – расчет по уравнению (2.9); 3 – расчет по уравнению (2.9) без учета потока миграции ( $D_m = 0$ )

Для характеристики прогностических свойств математического описания концентрационного поля важно отметить, что моделирование процессов проведено с использованием единственной экспериментально определяемой кинетической характеристики – коэффициента сегрегации  $K$ , значение которого было единым ( $K = \text{const}$ ) для потоков с продувкой и без продувки.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Разработаны метод и экспериментальная установка для исследования структурно-кинематических характеристик и эффектов разделения и перемешивания частиц в поперечно продуваемом гравитационном потоке зернистых материалов на шероховатом скате. Метод предполагает использование экспериментально определяемого распределения частиц, падающих со ската и уравнения состояния зернистой среды при быстром сдвиге. Уравнение устанавливает взаимосвязь между давлением, скоростью сдвига и порозностью зернистой среды и в настоящем исследовании адаптировано для условий поперечно продуваемого гравитационного потока путем учета составляющей гидродинамического давления проникающего газа. Эта составляющая определена на базе уравнения Козени–Кармана в результате обобщения экспериментальных данных для расчета коэффициента гидравлического

сопротивления при аэрации быстрых сдвиговых потоков сферических частиц.

В результате исследования гидродинамики поперечно продуваемого установившегося развитого сдвигового гравитационного течения зернистой среды установлено наличие единой зависимости между относительными величинами угла ската ( $\sin\alpha/\sin\alpha_0$ ) и скорости продувки ( $w/w_{кр}$ ) для различных направлений продувки. Кроме того, установлено, что исследованная проблема гидродинамики по условиям обтекания отдельной частицы в наибольшей степени приближается к задаче обтекания частицы в псевдооживленном слое.

Исследованы профили скорости, порозности и распределения неоднородных частиц в поперечно продуваемых гравитационных потоках несвязных неэластичных сферических частиц, различающихся по размеру и плотности. Результаты исследования свидетельствуют, что интенсивность сегрегации частиц преимущественно возрастает, когда поток продувается в направлении от открытой поверхности слоя к его основанию. При этом обнаружено, что для различных смесей частиц наибольший эффект сегрегации наблюдается при одном и том же значении относительной скорости продувки, равной  $w/w_{кр} = 0,45$ . При продувке от основания к открытой поверхности слоя преимущественно интенсифицируется перемешивание частиц. Однако, для частиц, различающихся по плотности, продувка в указанном направлении усиливает разделение, что объясняется не только возрастающим вкладом пневмосепарации, но и доминирующей ролью эффекта миграции для такого рода частиц.

С целью адаптации общей модели динамики сегрегации для условий поперечно продуваемого гравитационного потока частиц предложен метод вычисления движущей силы сегрегации в соответствии с механизмом сдвигового поточного разделения. Движущая сила определяется как избыточный момент сил тяжести, трения, ударных импульсов и гидродинамического давления, действующих на контрольную частицу по отношению к моменту аналогичных сил, действующих на частицу условно однородной среды. В результате математического моделирования динамики сегрегации частиц различного размера в потоках с продувкой и без продувки проанализированы механизмы влияния поперечного потока воздуха на распределение неоднородных частиц. Установлено, что интенсификация сегрегации при продувке гравитационного потока в направлении от открытой поверхности слоя к его основанию происходит в результате усиления потоков миграции (квазидиффузионного разделения) и сдвигового поточного разделения.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ ГЛАВЕ 2

- $c$  – концентрация частиц контрольного компонента ( $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ )  
 $d$  – средний диаметр частиц (м)  
 $D$  – диаметр частиц контрольного компонента (м)  
 $d_c$  – эквивалентный диаметр канала (м)  
 $D_{dif}$  – коэффициент квазидиффузии ( $\text{м}^2\text{с}^{-1}$ )  
 $D_m$  – коэффициент миграции ( $\text{м}^2\text{с}^{-1}$ )  
 $g$  – ускорение свободного падения ( $\text{мс}^{-2}$ )  
 $h$  – высота слоя на скате (м)  
 $K$  – коэффициент сегрегации ( $\text{Н}\cdot\text{с}$ )<sup>-1</sup>  
 $M$  – момент сил, действующих на контрольную частицу ( $\text{Н}\cdot\text{м}$ )  
 $\Delta M$  – избыточный момент сил – движущая сила процесса сегрегации ( $\text{Н}\cdot\text{м}$ )  
 $p$  – общее давление ( $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$ )  
 $p_s$  – гидростатическое давление ( $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$ )  
 $p_d$  – гидродинамическое давление ( $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$ )  
 $s$  – среднее расстояние между частицами (м)  
 $u$  – средняя скорость частицы в направлении сдвига  $x$ ,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$   
 $V$  – коэффициент вариации (эффективность сегрегации) (%)  
 $w$  – скорость воздуха ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ )  
 $w_{кр}$  – критическая скорость псевдооживления ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ )  
 $x, y$  – Декартовы координаты (рис. 1)  
 $\alpha$  – угол наклона ската (град.)  
 $\alpha_0$  – угол естественного откоса материала (град.)  
 $\varepsilon$  – порозность слоя ( $\text{м}^3\cdot\text{м}^{-3}$ )  
 $\bar{\varepsilon}$  – дилатансия сдвигового потока ( $\text{м}^3\cdot\text{м}^{-3}$ )  
 $\varepsilon_0$  – порозность слоя при плотной упаковке частиц ( $\text{м}^3\cdot\text{м}^{-3}$ )  
 $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления  
 $\rho$  – плотность частиц ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ )  
 $\rho_b$  – насыпная плотность материала ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ )  
 $\rho_g$  – плотность газа ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ )

### **3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЙ УСЛОВИЙ ТЕЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕГРЕГАЦИИ И МИГРАЦИИ**

---

Эффективной базой для разработки способов интенсификации (торможения) процессов могут служить определяющие соотношения, устанавливающие взаимосвязь между физическими и технологическими параметрами с одной стороны и кинетическими характеристиками процесса с другой. Рассмотрим возможность использования с целью разработки способов интенсификации и торможения сегрегации при быстром сдвиговом течении зернистого материала общей модели динамики сегрегации (1.12). Согласно указанной модели динамика сегрегации определяется процессами сдвигового поточного разделения, квазидиффузионного перемешивания и миграции частиц. Кинетика перечисленных процессов во многом зависит от параметров гравитационного потока процессов и физико-механических свойств частиц. Анализ уравнений (1.3) – (1.5), (1.6) – (1.9) и (1.10) – (1.11), описывающих эти процессы, позволяет заключить, что необходимое воздействие на динамику сегрегации целесообразно осуществить посредством изменения скорости сдвига, порозности слоя и угла наклона плоскости ската. Это связано с тем, что возможности для изменения физико-механических свойств частиц и среды, заполняющей пространство между ними, в общем случае, чрезвычайно ограничены и в рамках настоящей главы рассматриваться не будут. Указанные параметры течения зернистого материала могут варьироваться в достаточно широком диапазоне с использованием разнообразных способов воздействия на них. Рассмотрим наиболее доступные из них [74].

#### **3.1. ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ПОВЕРХНОСТИ СКАТА К ГОРИЗОНТУ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭФФЕКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ**

Экспериментальные исследования свидетельствуют [13], что установившееся быстрое гравитационное течение зернистого материала по крутому скату, шероховатость поверхности которого равна по крайней мере половине диаметра частиц движущейся среды, существует в некотором диапазоне угла наклона его поверхности  $\alpha$  к горизонту. Очевидно это объясняется тем, что эффективный коэффициент трения, являющийся отношением сдвигового напряжения к нормальному, существенно зависит от концентрации частиц в объеме слоя.

С увеличением угла наклона плоскости ската скорость сдвига возрастает, в результате чего увеличивается энергия колебательных перемещений частиц и слой разрыхляется. Разрыхление слоя приводит к увеличению угла столкновения частиц и их поперечного (диффузионного) массопереноса, что сопровождается увеличением касательной составляющей напряжения. В результате, с возрастанием порозности слоя до величины  $\varepsilon \sim 0,75$  (для сферических частиц) [15, 52] эффективный (динамический) коэффициент трения, определяемый как отношение сдвигового и нормального напряжений), увеличивается. Увеличение динамического коэффициента трения обеспечивает сохранение динамического равновесия в потоке и стекание зернистого материала в режиме развитого установившегося сдвигового течения.

При дальнейшем увеличении угла наклона происходит проскальзывание слоя по поверхности ската, и формирование так называемого «расплескивающегося» ускоренного течения. В зависимости от «вязкостных» свойств зернистого материала и упругих свойств и геометрии шероховатостей поверхности ската это приводит к тому или иному изменению скорости сдвига и, как правило, сопровождается увеличением порозности слоя.

Таким образом, при относительно небольшом изменении угла наклона происходят существенные изменения в динамике быстрого гравитационного течения [13]. При относительно небольшом увеличении угла режим скатывания частиц изменяется от установившегося до расплескивающегося течения. Среди основных признаков, которыми различаются названные режимы течения, следует назвать профиль скорости (скорости сдвига) и порозность слоя. В соответствии с проведенным выше анализом общей модели сегрегации (см. раздел 1.2) названные параметры существенно влияют на коэффициенты сегрегации, квазидиффузионного перемешивания и миграции. Влияние угла наклона на указанные параметры течения чрезвычайно велико [36, 52] по сравнению с его влиянием на момент силы тяжести частиц, имеющим место при возникновении опорных контактов. В соответствии с исследованиями, проведенными в работах [31, 36, 52], момент силы тяжести изменяется пропорционально функции косинуса угла  $\alpha$ , в то время как последний может варьироваться в установившемся быстром гравитационном потоке только в узком диапазоне.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что характер зависимости динамики сегрегации от угла наклона поверхности ската к горизонту будет определяться происходящими при этом изменениями порозности и скорости сдвига в потоке зернистых частиц.

В целях изучения этого влияния проведено экспериментально-аналитическое исследование динамики течения и изменения однородности скатывающегося слоя в зависимости от угла наклона поверхности ската к горизонту. Исследования выполнены с использованием экспериментально-аналитического метода, описанного в главе 2.

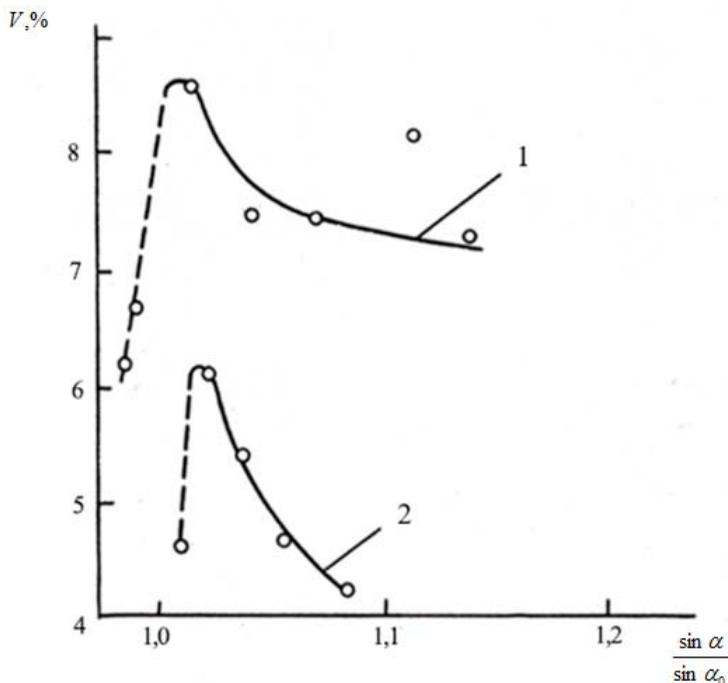
Оценку однородности слоя будем производить по параметру эффективности сегрегации, которая определяется следующим образом. После ссыпания и распределения смеси по ячейкам кюветы содержимое каждой ячейки взвешивалось и анализировалось с целью определения концентрации целевого компонента. Затем определялась общая масса ссыпавшегося материала и вычислялся его удельный расход в расчете на единицу длины сыпного порога с учетом ширины канала и времени ссыпания.

После определения средней концентрации целевого компонента в каждой из названных частей эффективность сегрегации выражалась в виде коэффициента вариации, который вычислялся в соответствии с выражением (2.8). Расход ссыпавшегося материала при различных углах наклона поверхности ската поддерживался постоянным. С учетом случайной природы явления сегрегации каждый опыт повторялся 5 раз. Статистическая оценка результатов осуществлялась с использованием критерия Стьюдента при 95%-ной доверительной вероятности.

Результаты исследования влияния угла  $\alpha$  поверхности ската на эффективность сегрегации при быстром гравитационном течении зернистых материалов представлены на рис. 3.1. Графики зависимостей  $V = f(\sin\alpha/\sin\alpha_0)$  (где  $\alpha_0$  – угол естественного откоса частиц), полученные экспериментально для различных материалов, обнаруживают общую закономерность, которая заключается в наличии двух характерных участков по величине угла  $\alpha$ .

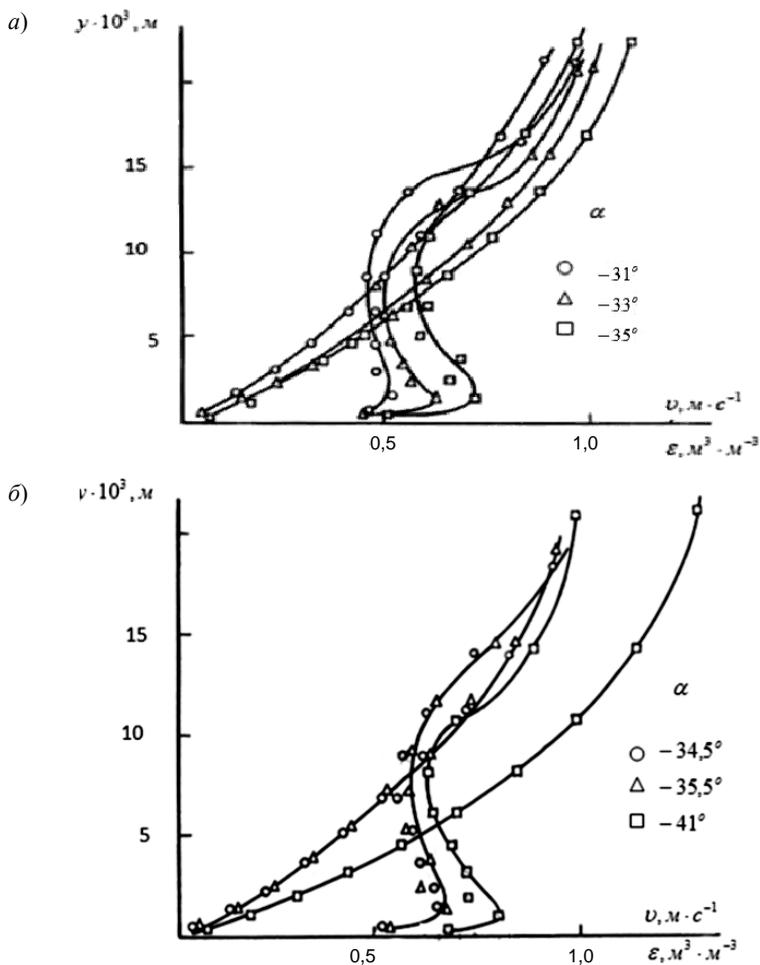
Первый участок характеризуется увеличением эффективности сегрегации с увеличением  $\alpha$ . Участок этот располагается вблизи угла естественного откоса частиц ( $\sin\alpha/\sin\alpha_0 \approx 1$ ). При дальнейшем увеличении угла наклона плоскости ската на втором участке происходит снижение интенсивности сегрегации.

Наблюдаемый характер зависимостей  $V = f(\sin\alpha/\sin\alpha_0)$  может быть объяснен [53] на основе анализа профилей скорости и порозности для быстрых гравитационных потоков частиц в условиях опытов по изучению влияния угла наклона поверхности ската на эффективность сегрегации (рис. 3.1).



**Рис. 3.1.** Эффективность сегрегации  $V$  при гравитационном течении гранул (смесь фракций +3,5 – 3,75 мм – 50% и 4,0 – 4,25 мм – 50%) по шероховатой наклонной плоскости в зависимости от угла ее наклона: 1 – двойной суперфосфат ( $\alpha_0 = 35^\circ$ ); 2 – силикагель КСМ ( $\alpha_0 = 30^\circ$ )

На рисунке 3.2, а, представлены профили скорости и порозности, которые наблюдаются при скатывании смеси фракции (+3,5 – 3,75 и +4,0 – 4,25 мм) гранул двойного суперфосфата при углах наклона поверхности ската 34,5, 35,5 и 41° ( $\alpha_0 = 35^\circ$ ). На рисунке 3.2, б изображены профили, имеющие место при гравитационном течении смеси аналогичных фракций гранул силикагеля при углах поверхности ската 31, 33, 35° ( $\alpha_0 = 35^\circ$ ). Таким образом результаты, полученные при углах наклона поверхности ската 34,5 и 35,5° с суперфосфатом и при углах 31 и 33° с силикагелем, соответствуют первому участку зависимости  $V = f(\sin \alpha / \sin \alpha_0)$ . Уже при углах наклона 41° в опытах с суперфосфатом и 35° в опытах с силикагелем профили соответствуют второму участку названной зависимости.



**Рис. 3.2. Профили скорости и порозности в гравитационных потоках гранул (смесь фракций +3,5 – 3,75 мм – 50% и 4,0 – 4,25 мм – 50%) на шероховатой наклонной плоскости при различных углах ее наклона  $\alpha$**   
*a* – двойной суперфосфат ( $\alpha = 35^\circ$ ); *б* – силикагель КСМ ( $\alpha_0 = 30^\circ$ )

Сравнение профилей, полученных при углах наклона в пределах первого участка показывает, что с увеличением угла наклона происходит практически равномерное увеличение скорости сдвига по всей высоте слоя. Это увеличение сопровождается соответствующим повышением порозности слоя и в итоге зависимости  $\varepsilon(y)$  для этих слу-

чаев располагаются эквидистантно, что свидетельствует о неизменном характере течения потока.

При дальнейшем увеличении угла наклона в пределах второго участка в наибольшей мере возрастает скорость сдвига у основания слоя. С возрастанием скорости сдвига увеличивается преимущественно порозность у основания слоя, вследствие чего коэффициент динамического трения в этой части потока увеличивается и достигает своего предельного значения примерно при  $\varepsilon \sim 0,75$  [15]. При достижении указанной порозности у основания слоя условия прилипания сменяются, по-видимому, на условиях проскальзывания.

Проскальзывание слоя на поверхности ската приводит к тому, что скорость сдвига в наиболее плотной центральной части слоя практически не изменяется, а порозность в некоторой степени увеличивается. Достаточно высокие значения порозности поддерживаются, очевидно, вследствие активного взаимодействия частиц слоя с подложкой и проникновения возникающих при этом флуктуаций в центральную его часть. Это обстоятельство и является причиной интенсивного перемешивания частиц в тонких слоях и, как следствие, наблюдаемого снижения эффективности сегрегации.

Таким образом, на втором участке изменения угла мы наблюдаем характерные признаки расплескивающегося гравитационного течения частиц [13], в то время как первый участок соответствует по своим свойствам режиму установившегося развитого сдвигового течения.

Приведенный экспериментальный результат подтверждает ранее сделанный прогноз о характере влияния величины угла наклона в области существования развитого гравитационного течения на динамику сегрегации. В названной области течения влияние угла на эффективность сегрегации не может быть оценено однозначно, поскольку изменения в динамике и геометрии структуры потока зернистого материала обусловлены множеством факторов. В числе этих факторов не только физико-механические характеристики частиц и условия их взаимодействия, но и аналогичные параметры, относящиеся к поверхности ската и граничным условиям, которые в настоящее время не поддаются адекватному определению [45].

Однако вполне определенно можно утверждать, что в области расплескивающегося течения увеличение угла наклона поверхности ската приводит к снижению эффективности сегрегации вследствие развития условий, способствующих значительной активизации квазидиффузионного перемешивания частиц на фоне менее существенных изменений в кинетике сегрегации.

Таким образом, угол наклона поверхности ската к горизонту возможно использовать в качестве параметра управления однородностью смеси зернистых материалов при ее скатывании по шероховатой наклонной поверхности в режиме расплескивающегося гравитационного течения. При этом с увеличением угла наклона повышается однородность смеси, а с уменьшением угла возрастает эффективность сегрегации.

### **3.2. ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОТОКА НА ШЕРОХОВАТОМ СКАТЕ НА ЭФФЕКТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ**

Анализ динамики гравитационного течения зернистых частиц по шероховатой наклонной плоскости, представленной на рис. 3.2, показывает, что по высоте слоя следует выделить три характерные области, отличающиеся значениями скорости сдвига и порозности. Первая область располагается в непосредственной близости и поверхности ската и занимает относительно небольшую часть потока, эквивалентную по толщине приблизительно  $\Delta h \sim (1 \dots 1,5)bd$ . Эта область характеризуется относительно высокими значениями скорости сдвига и, как следствие, низкой величиной концентрации твердой фазы. Возникновение этой области связано с реализацией граничного условия прилипания, при котором частицы нижнего элементарного подслоя потока, контактируя с шероховатой поверхностью ската, в значительной степени теряют свою подвижность и только вследствие флуктуационного характера взаимодействия частиц могут перемещаться в направлении сдвига. По этой причине зона наиболее активного сдвига располагается на расстоянии толщины элементарного подслоя поверхности ската.

Вторая область занимает место в центральной части слоя и представляет по сути ядро потока. Ядро потока характеризуется наиболее высокими значениями концентрации частиц. В этой области скорость сдвига в направлении к открытой поверхности потока остается относительно стабильной, а плотность слоя (концентрация твердой фазы) изменяется по его высоте с относительно невысокой интенсивностью.

И, наконец, третья область потока, расположенная вблизи открытой поверхности слоя, характеризуется интенсивным уменьшением скорости сдвига и концентрации твердой фазы в направлении открытой поверхности потока. Эта область носит название «облака» частиц.

Анализ отмеченных закономерностей изменения скорости сдвига и порозности слоя свидетельствует, что развитому гравитационному

течению зернистого материала по крутому скату характерны переменные параметры течения по высоте слоя. В связи с этим, очевидно, что наибольшая удельная величина потока частиц на единицу высоты слоя будет в верхней части ядра потока, граничащей с «облаком» частиц. Многочисленными экспериментами установлено, что около 70% от общего расхода материала приходится именно на эту часть потока. Поэтому влияние параметров течения в указанной части слоя на однородность смеси будет определяющим.

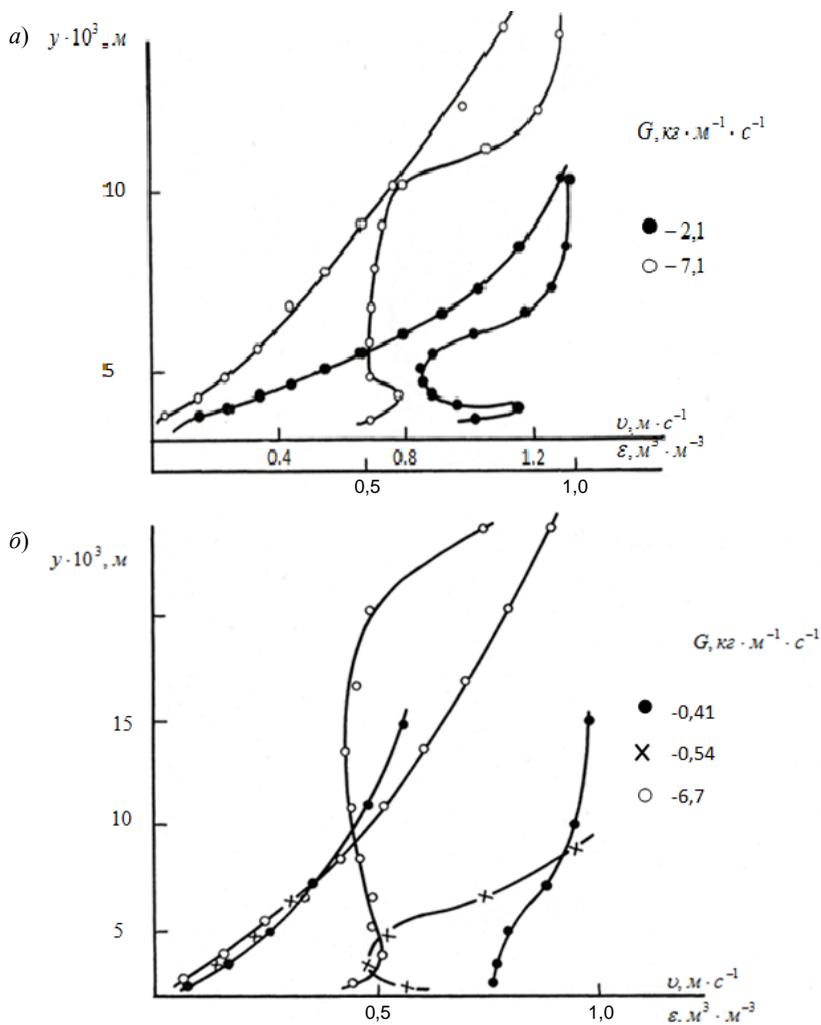
С изменением высоты слоя, вследствие изменения плотности потока на единицу длины сыпного порога гравитационного ската, очевидно, будет изменяться и доля объема, занимаемого каждой из трех названных областей потока. При этом можно утверждать, что при уменьшении толщины слоя будет уменьшаться доля его объема, приходящаяся на ядро потока. Вследствие уменьшения ядра потока в таких условиях можно предположить увеличение влияния граничных условий у поверхности ската на параметры течения в верхней части ядра потока. Изменение же параметров течения в этой части потока должно сопровождаться эволюцией соотношения интенсивностей процессов разделения и перемешивания неоднородных частиц, что определенным образом должно отразиться на однородности смеси.

Наглядный иллюстрацией достоверности приведенного анализа могут быть результаты исследования параметров течения сыпучих материалов при гравитационном их скатывании по шероховатой наклонности плоскости (рис. 3.3) в совокупности с экспериментальными данными по эффективности наблюдаемой при этом сегрегации частиц (рис. 3.4).

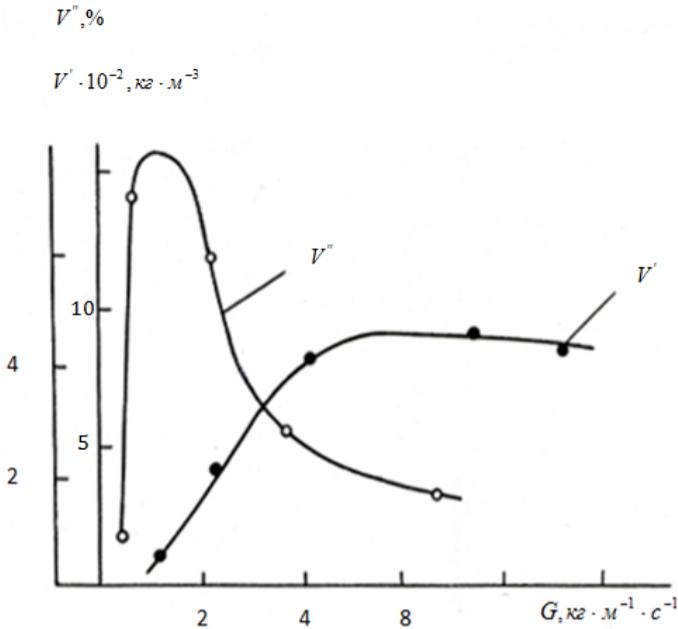
Исследования проведены с использованием двух смесей:

- 1) щебня фракции +5,0 – 10,0 мм, полученного путем дробления шлака силикамарганца, содержащего металлоконцентрат в количестве 30%;
  - 2) гранул силикагеля (+3,5 – 3,75 мм и 4,0 – 4,25 мм – 50%).
- В первой смеси имела место сегрегация частиц по плотности, а во второй – по размеру.

Параметры течения получены при различном удельном расходе частиц, скатывающихся по поверхности в расчете на единицу длины ее сыпного порога в режиме развитого гравитационного течения по методике, изложенной в разделе 2.1. Длина скатывающегося слоя в опытах поддерживалась настолько большой, чтобы достигалось равновесие в процессе сегрегации, т.е. с увеличением длины эффективность сегрегации не изменялась.



**Рис. 3.3. Профили скорости и порозности в гравитационных потоках смеси шлака силикамарганца и металлоконцентра фракций +5 – 10 мм (а) и смеси фракций +3,5 – 4,75 мм – 50% и 4,0 – 4,25 мм – 50% гранул силикагеля (б) на шероховатой наклонной плоскости при различном удельном расходе материала  $G$  в расчете на единицу длины сыпного порога**



**Рис. 3.4.** Эффективность сегрегации частиц по плотности ( $V'$ ) в смеси шлака силикамарганца и металлоконцентрата фракции +5 – 10 мм и по размеру ( $V''$ ) в смеси фракций +3,5 – 3,75 мм и 4,0 – 4,25 мм гранул силикагеля КСМ в зависимости от удельного расхода материала  $G$  на единицу длины ссыпного порога ската

Приведенные результаты свидетельствуют, что эффективность сегрегации существенно зависит от величины потока (высоты слоя) скатывающихся частиц. Анализ профилей скорости и порозности позволяет сделать вывод о том, что причиной таких изменений в эффективности сегрегации являются принципиальные изменения в динамике гравитационного течения.

Как следует из рис. 3.3 уменьшение величины потока сопровождается уменьшением области слоя, относящейся к ядру потока. Как следствие, часть потока, характеризующаяся наибольшим удельным расходом материала на единицу высоты слоя, располагается ближе к поверхности ската. При этом скорость сдвига и порозность в этой части потока возрастают. Причем, при больших величинах потока увеличение скорости сдвига происходит на фоне относительно небольшого изменения порозности. При малых же величинах потока уменьше-

ние последнего сопровождается резким увеличением порозности в ядре слоя. Визуальные наблюдения свидетельствуют, что такое состояние в гравитационном потоке частиц, в общем случае, наступает при толщине слоя, меньшей 3...4 средних диаметров частиц смеси.

Дальнейшее уменьшение величины потока сопровождается полным разрушением ядра, вследствие сильного разрыхления слоя при более активном взаимодействии частиц с шероховатой поверхностью ската. Концентрация частиц в наиболее плотной части потока приближается к «критической» (0,25...0,3), при которой условия формирования установившегося течения становятся качественно иными. Флуктуации скорости частиц, которые возникают вследствие их прямого взаимодействия с шероховатой поверхностью, распространяются при таких толщинах слоя практически на весь его объем. Условие «прилипания» на нижней границе слоя реализуется в таком случае в принципиально ином варианте, отличном от классического, поскольку при формулировке закона движения частиц, в независимости от их расположения в потоке, необходимо учесть условия их взаимодействия с поверхностью ската. Определяющее значение на динамику течения при этом приобретают физико-механические характеристики частиц, подложки и геометрические параметры шероховатостей поверхности ската. В зависимости от соотношения названных свойств разрыхление слоя при уменьшении величины потока может быть большим или меньшим, в связи с чем толщина слоя может либо уменьшаться, либо увеличиваться. В частности, в рассмотренном эксперименте увеличение толщины слоя при уменьшении величины потока частиц наблюдается при скатывании гранул силикагеля.

Как видно из рис. 3.4 функции  $V'(G)$  и  $V''(G)$ , построенные по результатам экспериментов, соответственно для смеси шлак-металлоконцентрат и гранул силикагеля, при полной их аналогии в области малых значений величин потока, существенно различаются в области больших значений. Наблюдаемое различие может быть объяснено преобладанием различных механизмов разделения в процессе сегрегации частиц в исследуемых смесях. Очевидно, что в случае течения смеси частиц шлака и металлоконцентрата, различающихся преимущественно по плотности, доминирующее влияние на разделение частиц оказывает миграция, движущей силой которой является градиент концентрации твердой фазы (1.9). Интенсивность же разделения гранул силикагеля, различающихся по размеру, определяется в основном механизмами сегрегации, величина эффектов которой повышается

с возрастанием скорости сдвига при высоких концентрациях твердой фазы [31, 36].

Сопоставление профилей порозности в потоках малой величины (рис. 3.3) с соответствующими значениями функций  $V(G)$  (рис. 3.4) позволяет заключить, что резкое снижение эффективности сегрегации происходит в этой области вследствие сильного разрыхления ядра скатывающегося слоя. При таких толщинах слоя эффекты перемешивания, имеющие место вблизи верхней и нижней границ потока, распространяются на весь объем слоя.

Таким образом, на основе результатов проведенного исследования можно утверждать, что за счет изменения величины потока (высоты слоя) частиц, движущихся в режиме развитого гравитационного течения, можно оказать существенное воздействие на кинетику процессов сегрегации и перемешивания. Для интенсификации перемешивания необходимо, чтобы высота слоя соответствовала условию  $h < 3d$ , а для повышения эффективности сегрегации целесообразно поддерживать высоту слоя, равной  $(4...5)d$ .

### **3.3. ЭФФЕКТ «ПРЫЖКА ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ» И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СЕГРЕГАЦИЮ И ПЕРЕМЕШИВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ЧАСТИЦ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТОКЕ**

Из теории быстрых сдвиговых течений известно [54], что при быстром гравитационном течении зернистого материала по наклонной плоскости в режимах, когда силы инерции превосходят по величине силы тяжести, т.е. при числах Фруда больших 1, возможно возникновение явления, носящего название «грануляционного прыжка». Сущность явления заключается в том, что при обтекании препятствия частицами слоя, движущегося в указанном режиме, происходит скачкообразное изменение свойств потока, причем эффект вносимого препятствием возмущения в дальнейшем сохраняется. В работе [54] отмечено, что в числе параметров течения, скачкообразно изменяющих свои значения при «грануляционном прыжке», в первую очередь следует назвать порозность и распределение скорости частиц в слое. В связи с этим представляется целесообразным использовать названное явление с целью воздействия на однородность смесей зернистых материалов при гравитационном их течении по наклонной плоскости. В рамках настоящего исследования оценка влияния названного эффекта на однородность проведена экспериментальным методом. Исследования

ние заключалось в определении эффективности сегрегации в потоке керамических шаров, представляющем собой смесь фракций 5,5 м – 50% и 7,0 – 50%, стекающих по шероховатой наклонной плоскости в режиме расплескивающегося течения при наличии эффекта «грануляционного прыжка» и без него. Режим расплескивающегося течения обеспечивался наклоном плоскости ската к горизонту, равным  $40^\circ$  (угол естественного откоса материала  $30,5^\circ$ ) при длине скатывания 1,0 м. Эффект «грануляционного прыжка» достигался путем закрепления на поверхности ската на расстоянии 0,15 м от сыпного порога преграды высотой 0,015 м. В результате названного эффекта наблюдалось увеличение толщины слоя на сыпном пороге с 0,042 до 0,07 м. Очевидно, что наблюдаемая дилатансия потока зернистой среды поддерживается за счет интенсификации хаотических перемещений частиц при возросших длинах свободного пробега. Таким образом, формируемые условия способствуют интенсификации квазидиффузионных эффектов взаимодействия частиц, к которым относятся эффекты квазидиффузионного перемешивания и разделения (миграции). Соотношение эффектов перемешивания и разделения неоднородных частиц, вызванных «прыжком зернистой среды», определялось экспериментальным методом.

Эффективность сегрегации, которая оценивалась по уже рассмотренной методике в соответствии с выражением (2.8), составила величину 4,76% в потоке с эффектом «грануляционного прыжка» и 9,81% – без него. Приведенный результат с учетом известных особенностей «грануляционного прыжка» [54] позволяет, в общем случае, прогнозировать повышение однородности смесей зернистых материалов при гравитационном их течении за счет интенсификации перемешивания в скатывающемся потоке, под воздействием названного эффекта. Доминирование квазидиффузионного перемешивания над эффектом квазидиффузионного разделения (миграции) достигается, очевидно, за счет дилатансии потока, сопровождающейся повышением структурной однородности потока.

### **3.4. УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТАМИ РАЗДЕЛЕНИЯ В ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКАХ ЧАСТИЦ, РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ПО РАЗМЕРУ И ПЛОТНОСТИ**

В соответствии с модельными представлениями, изложенными в первой главе (см. раздел 1.2), сегрегация частиц является результатом сопряжения эффектов разделения, вызванных локальной и про-

пространственной неоднородностями гравитационного потока. В настоящем разделе проводится сравнительный анализ влияния эффектов сегрегации и миграции, обусловленных соответственно локальной и пространственной неоднородностью сдвигового потока, на динамику распределения частиц, различающихся по размеру и плотности. Анализ выполнен с использованием результатов моделирования, полученных на базе общей модели динамики сегрегации (1.12). Исходными данными для моделирования являлись профили скорости и порозности в гравитационном потоке базового компонента модельных смесей зернистых материалов. В качестве базового компонента использована узкая фракция стеклянного бисера со средним размером частиц  $d_b = 3,4$  мм и плотностью  $\rho_b = 2500$  кг/м<sup>3</sup>. Модельные смеси формировались путем добавления к базовому компоненту контрольных частиц, отличающихся от него либо только по размеру, либо по плотности в количестве 12% массовых. С учетом относительно небольшой концентрации контрольных частиц в смеси и их ограниченного отличия от частиц базового компонента принималось допущение об инвариантности профилей скорости и порозности в потоках различных смесей.

Моделирование выполнено путем интегрирования уравнения (1.12) при начальном и граничных условиях (2.12) – (2.14) численным методом с использованием конечно-разностной схемы Кранка–Николсон. Соотношение размеров и плотностей частиц контрольного и базового компонентов варьировалось в широком диапазоне в областях значений как больших, так и меньших единицы.

С целью сравнительного анализа степени значимости различных механизмов разделения неоднородных частиц на распределение их концентрации в потоке моделирование выполнено по трем вариантам. Первый из вариантов предполагает, что разделение частиц является следствием сегрегации, обусловленной локальной неоднородностью среды. В соответствии со вторым вариантом моделирования разделение происходит под действием взаимной квазидиффузии неоднородных частиц – миграции, обусловленной пространственной неоднородностью среды. Третий вариант предполагает, что распределение неоднородных частиц в потоке является следствием комплексного проявления эффектов сегрегации и миграции, учитывающих локальную и пространственную неоднородность сдвигового потока зернистой среды. Профили распределения концентрации частиц, различающихся по размеру и плотности, полученные в соответствии с названными вариантами моделирования, представлены на рис. 3.5 и 3.6.

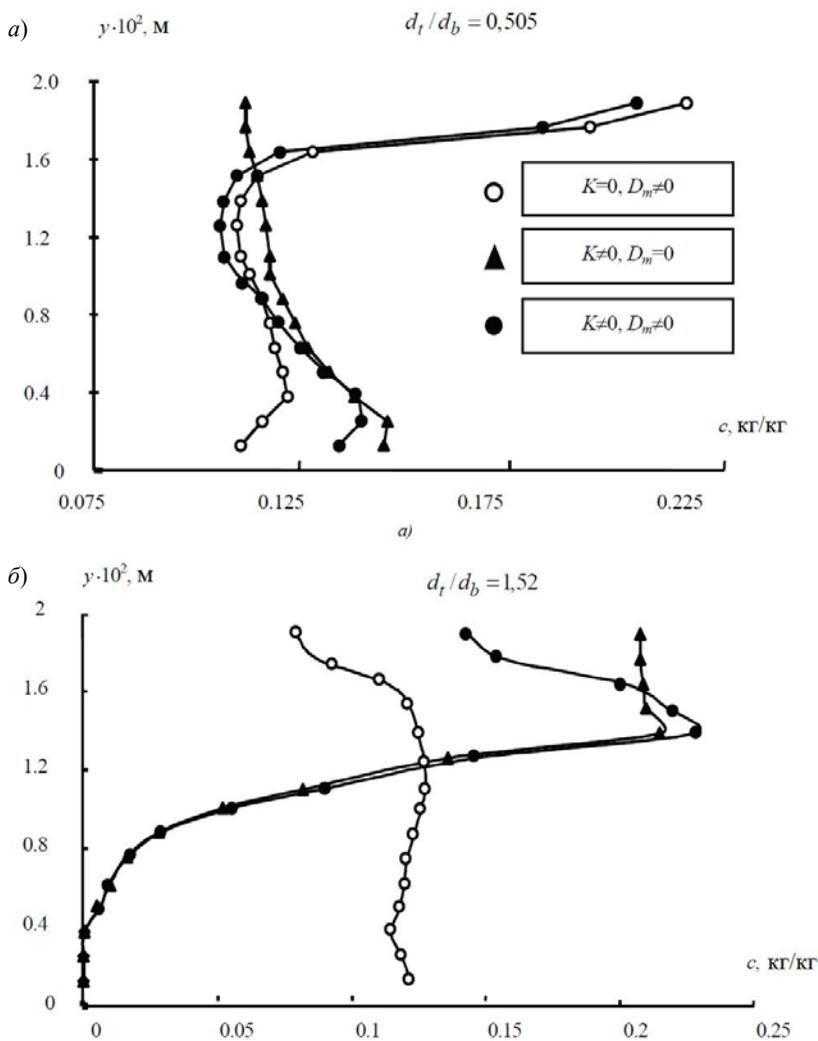
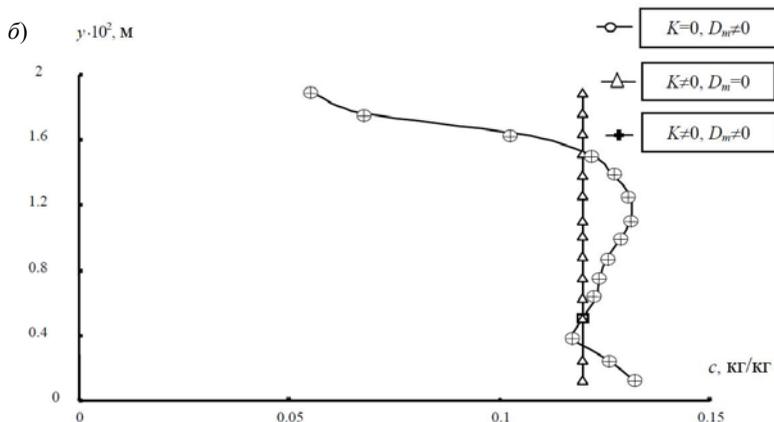
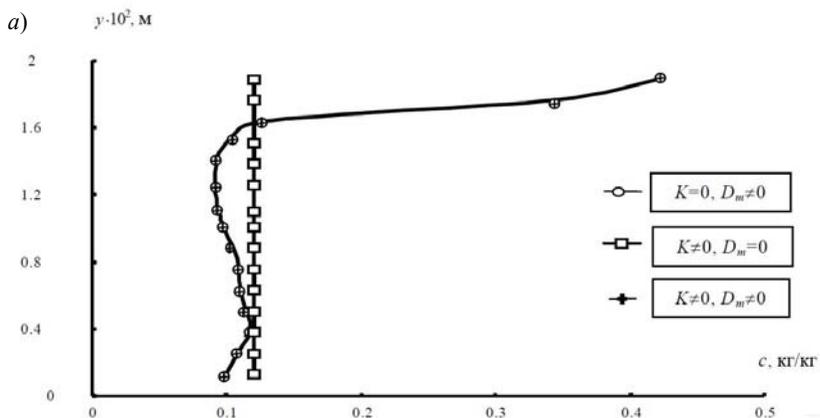


Рис. 3.5. Профили распределения концентрации контрольных мелких (а) и крупных (б) частиц при их содержании в количестве 12% в гравитационных потоках смесей частиц стеклянного бисера, содержащих 88% частиц базового компонента ( $d_b = 3,4 \text{ мм}$ ,  $\rho_b = 2500 \text{ кг/м}^3$ ):  
 а – для контрольных частиц диаметром  $d_t = 1,7 \text{ мм}$ ;  
 б – для контрольных частиц диаметром  $d_t = 5,1 \text{ мм}$



**Рис. 3.6. Профили распределения концентрации легких (а) и тяжелых (б) частиц при их содержании в количестве 12% в гравитационных потоках их смесей с частицами базового компонента – стеклянного бисера ( $d_b = 3,4 \text{ мм}$ ,  $\rho_b = 2500 \text{ кг/м}^3$ ):**  
 а – для контрольных частиц плотностью  $\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  
 б – для контрольных частиц плотностью  $\rho_l = 10\,000 \text{ кг/м}^3$

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о доминирующих механизмах разделения частиц по размеру и плотности в условиях неоднородности структурных и кинематических параметров быстрого гравитационного потока. Сравнение профилей распределения на рис. 3.6 убедительно свидетельствует о том, что доминирую-

щим механизмом разделения частиц различной плотности является миграция. Анализ же профилей, представленных на рис. 3.5, позволяет сделать вывод о том, что разделение частиц по размеру является результатом комплексного проявления эффектов сегрегации и миграции. Вместе с тем, результаты моделирования позволяют обнаружить признаки доминирования сегрегации в большей части потока, расположенной вне зоны приграничного поверхностного слоя.

С учетом наблюдаемого доминирования эффектов сегрегации и миграции и их кинетических закономерностей (1.3) и (1.9) представляется возможным определить способы управления процессами разделения частиц, различающихся по размеру и плотности.

Если принять во внимание, что движущей силой сегрегации является избыточный момент сил, величина которого пропорциональна скорости сдвига при условии достаточно высокой концентрации твердой фазы ( $1 - \varepsilon > 0,25$ ), то для управления процессом разделения частиц по размеру в сдвиговом потоке необходимо оказать воздействие на скорость сдвига. Кроме того, при оказании того или иного воздействия на скорость сдвига следует учитывать ее корреляцию с долей свободного объема в потоке среды, которая определяется выражением (2.3).

При управлении сегрегацией частиц по плотности целесообразно исходить из условия, что доминирующим механизмом разделения такого рода частиц является инициируемая их взаимной диффузией миграция. Поскольку необходимым условием для протекания миграции является наличие градиента среднего расстояния между частицами, который и определяет величину движущей силы квазидиффузионного разделения (1.9), то для управления эффектами разделения частиц по плотности следует воздействовать на структурные параметры потока. Для этого необходимо таким образом изменять условия течения, чтобы обеспечивать либо наиболее высокую неоднородность порозности (для интенсификации разделения), либо стремиться к высокой структурной однородности потока (для предотвращения разделения).

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Проанализировано влияние угла наклона шероховатого ската и удельной величины потока (высоты слоя) частиц на структурные и кинематические параметры быстрого гравитационного течения модельных зернистых материалов и эффекты разделения и перемешивания неоднородных частиц. Установлено, что с увеличением угла наклона выше угла естественного откоса материала происходит равно-

мерное увеличение скорости сдвига по всей высоте слоя. Это увеличение сопровождается повышением порозности слоя и в итоге профили порозности для этих случаев располагаются эквидистантно, что свидетельствует о неизменном характере динамики потока в области развитого сдвигового течения.

Дальнейшее увеличение угла наклона поверхности ската в области расплескивающегося течения приводит к снижению эффективности сегрегации вследствие развития условий, способствующих значительной активизации квазидиффузионного перемешивания и разделения частиц (миграции) на фоне менее существенных изменений в кинетике сегрегации. С увеличением угла наклона ската в этой области в наибольшей мере возрастает скорость сдвига у основания слоя, что сопровождается возрастанием в этой зоне порозности среды и, как следствие, повышением коэффициента динамического трения, который достигает своего предельного значения при  $\varepsilon \sim 0.75$ . При достижении указанной порозности у основания слоя и дальнейшем увеличении угла ската условия прилипания сменяются на условиях проскальзывания.

Проскальзывание слоя на поверхности ската приводит к тому, что скорость сдвига в наиболее плотной центральной части слоя практически не изменяется, а порозность в некоторой степени увеличивается вследствие активного взаимодействия частиц слоя с подложкой и проникновения возникающих при этом флуктуаций в центральную его часть. Это обстоятельство является причиной интенсивного перемешивания частиц в тонких слоях и, как следствие, наблюдаемого снижения эффективности сегрегации.

Установлено, что за счет изменения удельной величины потока (высоты слоя) частиц, движущихся в режиме развитого гравитационного течения, можно оказать существенное воздействие на кинетику процессов сегрегации и перемешивания. При достаточно большой величине потока, соответствующей высоте слоя, превышающей 5-6 диаметров частиц, уменьшение величины потока сопровождается уменьшением области слоя, относящейся к ядру потока, с возрастанием скорости сдвига на фоне относительно небольшого изменения порозности. При малых же величинах потока уменьшение последнего сопровождается резким увеличением порозности в ядре слоя. Исследования свидетельствуют, что такое состояние в гравитационном потоке частиц, в общем случае, наступает при толщине слоя, меньшей 3...4 средних диаметров частиц смеси.

Дальнейшее уменьшение величины потока сопровождается полным разрушением ядра, вследствие сильного разрыхления слоя при

более активном взаимодействии частиц с шероховатой поверхностью ската. Флуктуации скорости частиц, которые возникают вследствие их прямого взаимодействия с шероховатой поверхностью, распространяются при таких толщинах слоя практически на весь его объем, что сопровождается интенсификацией перемешивания в потоке частиц. Таким образом, для интенсификации перемешивания необходимо организовать тонкослойное течение зернистого материала, соответствующее условию по высоте слоя  $h \leq 3d$ , а для достижения высокой эффективности сегрегации целесообразно поддерживать высоту слоя, равной  $(4...5)d$ .

Методом математического моделирования определены способы воздействия на эффекты разделения частиц по размеру и плотности в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов. Установлено, что доминирующим механизмом разделения частиц по плотности является миграция, обусловленная взаимной квазидиффузией частиц в условиях структурной неоднородности потока. Для интенсификации разделения частиц по плотности необходимо повышать структурную неоднородность потока и, напротив, для подавления разделения – обеспечивать условия структурной однородности зернистой среды.

Разделение частиц по размеру в сдвиговом потоке происходит под действием эффектов сегрегации и миграции. Для управления эффектом сегрегации частиц по размеру в сдвиговом потоке необходимо оказать воздействие на скорость сдвига. Интенсификации сегрегации способствует повышение скорости сдвига при условии высоких значений концентрации твердой ( $1 - \varepsilon > 0,25$ ). Для подавления эффектов разделения частиц по размеру необходимо обеспечивать условия структурной однородности потока при высоких значениях его порозности.

## **4. СЕГРЕГАЦИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТОКЕ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ШЕРОХОВАТОМ ВИБРИРУЮЩЕМ СКАТЕ**

---

### **4.1. ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ НА ШЕРОХОВАТОМ СКАТЕ**

Для описания закономерностей сдвиговых течений зернистых материалов используются подходы, которые основаны либо на анализе поведения конечных элементов – отдельных частиц с учетом их взаимодействий, либо на анализе состояния совокупности конечных элементов как континуума [20, 35, 55 – 58]. Названные подходы вследствие принципиальных их отличий имеют свои области предпочтительного использования. Метод конечных элементов используется, преимущественно, для прогнозирования динамики структурных преобразований в зернистых средах и имитации экспериментального исследования в условиях, допускающих идеализацию факторов внутреннего и внешнего воздействия на отдельные частицы [20, 23]. Континуальные подходы используются для описания динамики потоков, формируемых в сложных граничных условиях, и основываются, как правило, на допущении о несжимаемости и однородности зернистых сред [57, 58]. Однако, в ряде работ, например [23, 59], посвященных анализу причин неадекватности континуальных моделей, сделан вывод о том, что для адекватного физического описания течений необходимо отказаться от осреднения параметров сдвигового потока в его поперечном сечении. Решению такого рода задачи могут способствовать [59] гидродинамические модели, основанные на феноменологическом подходе и учитывающие микроструктурные свойства зернистых сред, однако, разработка таких находится в самой начальной стадии [20, 60].

В рамках настоящей главы дальнейшее развитие получает феноменологическое описание взаимосвязи структурных и кинематических характеристик в быстром сдвиговом потоке зернистых сред, формируемом гравитационным воздействием на шероховатом скате [55], и в том числе в условиях вибрационного воздействия на поток со стороны ската [24]. При этом вибрационное воздействие анализируется как средство воздействия на структурные и кинематические характе-

ристики потока для управления эффектами взаимодействия его неоднородных частиц.

Предложенное феноменологическое описание устанавливает взаимосвязь динамических, структурных и кинематических характеристик в быстром гравитационном потоке зернистой среды. Описание предполагается к использованию для прогнозирования профилей скорости и порозности (концентрации твердой фазы) в сдвиговом потоке зернистой среды с привлечением либо дополнительной экспериментальной информации, либо в сочетании с классическими уравнениями сохранения импульса, энергии и вещества, используемых традиционно при моделировании динамики соответствующих течений [17, 56 – 60].

Предложенное описание взаимосвязи структурных и кинематических параметров потока предполагает наличие физической аналогии между зернистой средой в условиях быстрого сдвига и плотным газом. В соответствии с аналогией зернистая среда, находящаяся в состоянии газа твердых частиц, характеризуется параметрами состояния, которые формально аналогичны параметрам состояния плотного газа. При этом предполагается аналогия между дилатансией, кинетической энергией всех форм взаимных перемещений частиц и аналогом гидростатического давления зернистой среды, с одной стороны, и мольным объемом, температурой и давлением плотного газа – с другой. В результате для описания взаимосвязи структурных и кинематических параметров гравитационного потока зернистой среды на скате используется зависимость, формально аналогичная известному закону состояния плотного газа:

$$p\bar{\varepsilon} = \chi\theta, \quad (4.1)$$

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

– аналог гидростатического давления;

$$\bar{\varepsilon}(y) = \frac{\varepsilon(y) - \varepsilon_o}{1 - \varepsilon(y)};$$

– дилатансия зернистого материала;  $\varepsilon$  – порозность (доля свободного объема) среды;  $\varepsilon_o$  – порозность среды в условиях наиболее плотной укладки ее частиц (для однородных сферических частиц  $\varepsilon_o = 0,4$ );  $\chi$  – коэффициент уравнения состояния зернистой среды;  $y$  – координата, перпендикулярная поверхности ската;  $g$  – гравитационное ускорение;  $\alpha$  – угол наклона ската к горизонту;  $\theta$  – температура зернистой среды.

В отличие от традиционного позиционирования температуры зернистой среды [15, 17] как величины, пропорциональной осредненному значению квадрата скорости флуктуаций частиц, в рамках предлагаемой аналогии температура представляется как кинетическая энергия частиц, которой характеризуются совокупность различных форм их взаимных перемещений при сдвиге среды [24]. Следует заметить, что аналогичное представление о температуре зернистой среды как о кинетической энергии ее частиц характерно и для других работ, например [61].

В уравнении (4.1)  $\theta$  представляет собой кинетическую энергию частиц, которой они обладают вследствие взаимных перемещений в сдвиговом потоке, а произведение в левой части уравнения соответствует работе, совершаемой частицами при сдвиге зернистой среды и приводящей к ее дилатансии в расчете на единицу объема твердой фазы. Таким образом, коэффициент  $\chi$  может быть позиционирован как характеристика, отражающая соотношение между работой, затрачиваемой на дилатансию при гравитационном сдвиге зернистой среды, и кинетической энергией частиц, обусловленной их взаимным перемещением в потоке.

Определение температуры в сдвиговом потоке зернистой среды как кинетической энергии частиц в их взаимных перемещениях предполагает учет самых различных форм перемещений частиц в относительной системе координат, которая перемещается в направлении сдвига с осредненной скоростью частиц в том же направлении. Таким образом, можно оценить влияние на температуру среды различных форм внешнего воздействия (физических полей) на ее сдвиговой поток. В рамках настоящей работы объектом исследования является температура зернистой среды на шероховатом скате в условиях гравитационного воздействия и виброколебаний, а также связанные с ней эффекты структурных преобразований потока и взаимодействия неоднородных частиц, обусловленные названным комплексным воздействием.

В результате комплексного воздействия гравитации и вибрации температура зернистой среды будет определяться как суммарный эффект их воздействия на кинетическую энергию частиц, обеспечивающую их взаимное перемещение в потоке

$$\theta(y) = \theta_v(y) + \theta_g(y), \quad (4.2)$$

где  $\theta_v$  – кинетическая энергия, обусловленная вибрационным воздействием;  $\theta_g$  – кинетическая энергия, генерируемая гравитационным сдвигом.

Составляющая кинетической энергии частиц, которую они приобретают под воздействием гравитационного сдвига  $\theta_g$ , определена как комплексная величина, учитывающая элементарные формы взаимных перемещений частиц: вследствие различия их осредненных скоростей в направлении сдвига  $\theta_{sh}$ , хаотической флуктуации частиц  $\theta_{fl}$  и поперечного квазидиффузионного массопереноса  $\theta_{tr}$  [55]:

$$\theta_g = \theta_{sh} + \theta_{fl} + \theta_{tr}. \quad (4.3)$$

Компонента температуры зернистой среды, обусловленная наличием у частиц массой  $m$  относительной скорости в направлении сдвига, вычислена с учетом скорости сдвига  $du/dy$  и среднего расстояния между центрами масс частиц  $bd$  в следующем виде:

$$\theta_{sh} = \frac{1}{2} m (bd)^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2, \quad (4.4)$$

где  $b$  – геометрический параметр, вычисляемый в зависимости от порозности (объемной доли пустот) в слое материала:

$$b = [\pi / (6(1 - \varepsilon))]^{0,33}.$$

Температурная компонента, являющаяся следствием наличия у частиц хаотических перемещений в пространстве с некоторой средней скоростью флуктуаций  $V'$ , определена следующим образом

$$\theta_{fl} = \frac{1}{2} m (V')^2. \quad (4.5)$$

Сдвиговый поток частиц сопровождается их поперечным массопереносом [3], физический механизм которого формально аналогичен диффузионному массопереносу [24]. С учетом этого компонента температуры зернистой среды, обусловленная поперечным массопереносом, для случая двухмерного сдвигового течения определена как произведение коэффициента поперечной квазидиффузии частиц и скорости сдвига.

Поскольку коэффициент квазидиффузии пропорционален скорости флуктуаций частиц и среднему расстоянию между частицами  $s$  [43], то компонента температуры зернистой среды, являющаяся след-

ствием поперечного массопереноса, может быть представлена в следующем виде

$$\theta_{tr} = \frac{1}{4} ms V' \frac{du}{dy}, \quad (4.6)$$

где  $s = (b/b_0 - 1)d$  – среднее расстояние между частицами,  $b_0$  – значение геометрического параметра  $b = [\pi/(6(1 - \varepsilon))]^{0,33}$ , соответствующее наиболее плотной укладке частиц ( $\varepsilon = 0,2595$  – для однородных сферических частиц).

В выражениях (4.5) и (4.6) среднее значение скорости флуктуаций частиц  $V'$  вычисляется [3, 31] как функция скорости сдвига на основе энергетического баланса в условиях стационарного течения среды

$$V' = \varphi bd \frac{du}{dy}, \quad (4.7)$$

где  $\varphi$  – комплекс, отражающий влияние эффектов диссипации на скорость флуктуаций частиц, с учетом условий взаимодействия фаз в сдвиговом потоке. На основе баланса между энергией, генерируемой при сдвиге зернистой среды, и диссипацией энергии при взаимодействии частиц со средой, заполняющей пространство между частицами, и контактных взаимодействиях частиц друг с другом комплекс  $\varphi$  формулируется в следующем виде [3]

$$\varphi = \left[ \frac{(1+k)(0,05+0,08\mu)(1+s/d)}{[3sC/2d]\rho_f/\rho+k_E} \right]^{1/2}, \quad (4.8)$$

где  $k_E$  – доля кинетической энергии частиц, диссипируемой при их взаимодействии;  $C$  – коэффициент гидравлического сопротивления перемещению частиц в среде, заполняющей пространство между частицами [3].

В уравнении энергетического баланса использована предложенная в работе [31] комбинированная гипотеза соударения частиц, позволяющая объединить достоинства классических гипотез удара и преодолеть недостатки, характерные для гипотезы Раусса косоугольного удара, которая была использована ранее с аналогичной целью в работе [3]. В соответствии с предложенной гипотезой [31] доля кинетической энергии частиц, диссипируемой при их столкновении  $k_E$ , определяется в следующем виде

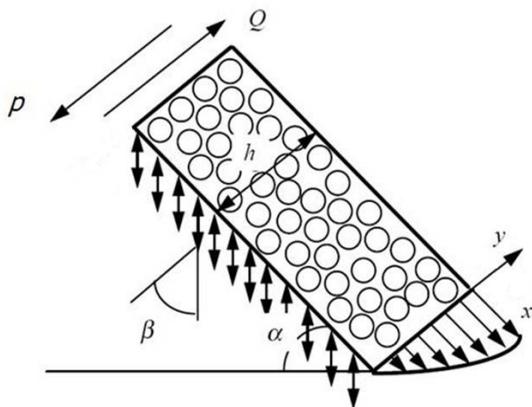
$$k_E = (1 - k^2) + \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{8}\mu^2(1 + k)^2 - \frac{1}{8}\lambda^2 + \frac{2}{\pi}\mu(1 + k) - \frac{2}{3\pi}\mu\lambda(1 + k), \quad (4.9)$$

где  $k$  – коэффициент восстановления при ударе;  $\lambda$  – коэффициент редукции касательной составляющей при столкновении частиц, который определяется с использованием методики, предложенной в работе [31];  $\mu$  – коэффициент трения.

Поскольку все составляющие относительной скорости частиц, принятые во внимание при формулировке выражений (4.4) – (4.6), являются производными от скорости сдвига и пропорциональны ее первой степени, то логично, что соответствующие компоненты температуры зернистой среды определяются в зависимости от квадрата скорости сдвига.

Вибрационная составляющая температуры зернистой среды  $\theta_v$  в выражении (4.2) (кинетическая энергия взаимных перемещений частиц, генерируемая вибрирующим скатом) определена в предположении о том, что в условиях быстрого сдвигового течения зернистая среда, состоящая из несвязных неэластичных сферических частиц, проявляет свойства эластичной сжимаемой системы. Такое допущение является следствием мезоскопических свойств сыпучих материалов, отдельные частицы которых имеют свойства твердых тел, а совокупность частиц в определенных условиях их пребывания может проявлять свойства, характерные для «газа твердых частиц» [17]. Для такой среды, движущейся по шероховатому вибрирующему скату, совершающему гармонические колебания, будут последовательно чередоваться периоды сжатия и дилатансии с частотой, соответствующей частоте колебаний ската. Период сжатия среды будет сопровождаться вводом в нее квазитепловой энергии, которая на следующем этапе колебаний будет приводить к дилатансии газа твердых частиц.

Составляющая кинетической энергии взаимных перемещений частиц  $\theta_v$ , являющаяся следствием воздействия на гравитационный поток зернистой среды вибрирующего ската, определена с использованием схемы, представленной на рис. 4.1. В соответствии со схемой квазитепловой поток  $Q$ , генерируемый вибрирующим скатом, направлен навстречу вектору гидростатического давления  $p$ . Очевидно, что интенсивность квазитеплового потока, направленного от основания к открытой поверхности слоя, пропорциональна величине гидростатического давления и зависит от параметров вибрационного воздействия (направления, частоты и амплитуды вибрации).



**Рис. 4.1. Схема расчета квазитеплового потока и температуры зернистой среды в гравитационном потоке на вибрирующем скате**

В тех случаях, когда ускорение вибрации превышает гравитационное ускорение, воздействие гравитационного ската на поток частиц периодически прерывается. При этом момент отрыва ската от движущегося слоя частиц наступает в момент наибольшей степени сжатия слоя. При таком условии момент времени, при котором  $y$  – координата поверхности ската соответствует минимальной толщине слоя, может быть определен следующим образом

$$t_0 = \frac{n + 0,25}{\omega}, \quad (4.10)$$

где  $n$  – порядковый номер периода вибрации;  $\omega$  – частота вибрации.

В соответствии с ранее озвученной аналогией между зернистой средой при быстром сдвиге и газом твердых частиц, как эластичной сжимаемой системой, после потери контакта со скатом среда переходит в состояние дилатансии до возобновления контакта. Воздействие ската на поток частиц возобновляется в точке столкновения поверхности вибрирующего ската со слоем зернистой среды, дилатансия которого протекает в соответствии с динамикой гравитационного воздействия на слой частиц и квазидиффузионного их взаимодействия в соответствии с представлением о зернистой среде при быстром сдвиге как о «газе твердых частиц» [17]. При таких условиях координата точки возобновления контакта и соответствующее время его восста-

новления  $t_c$  вычисляются путем решения системы двух уравнений, одно из которых описывает перемещение частиц, потерявших контакт со скатом, а другое – перемещение ската:

$$y_p = A \cos \beta - \left( V'(t - t_0) + g(t - t_0)^2 / 2 \right) \cos \alpha; \quad (4.11)$$

$$y_{ch} = A \sin(2\pi\omega t) \cos \beta. \quad (4.12)$$

Квазитепловой поток, обусловленный воздействием вибрирующего ската на движущийся слой зернистой среды в промежутке времени  $t_c \dots t_0$  их контакта, вычисляется как сумма нормальной  $Q_n(0)$  и касательной  $Q_t(0)$  составляющих потока:

$$Q(0) = Q_n(0) + Q_t(0). \quad (4.13)$$

Нормальная компонента квазитеплового потока вычисляется следующим образом:

$$Q_n(0) = \int_{t_c}^{t_0} \omega p_y(0) v_y(t) dt, \quad (4.14)$$

где  $v_y(t) = 2\pi A \omega \cos(2\pi t) \cos \beta$  – компонента скорости ската в направлении  $y$ .

Касательная компонента квазитеплового потока выражается в следующем виде:

$$Q_t(0) = \int_{t_c}^{t_0} \omega p_y(0) \mu(0) v_{x,rel}(0, t) dt, \quad (4.15)$$

где  $\mu(0)$  – динамический коэффициент трения между частицами потока у поверхности ската, определяемый как отношение касательного и нормального напряжений.

Относительная скорость между частицами в направлении сдвига у поверхности ската ( $y = 0$ ) вычисляется как величина, пропорциональная скорости сдвига ( $du/dy$ ) и среднему расстоянию между центрами масс соседних частиц ( $bd$ ), с учетом составляющей скорости виброколебаний поверхности ската в направлении  $x$  координаты:

$$v_{x,rel}(0, t) = du(0)/dy b(0) d(0) - v_x(t),$$

где  $b$  – геометрический параметр, являющийся функцией порозности слоя (4.6);  $d$  – средний диаметр частиц;  $v_x(t) = 2\pi A \omega \cos(2\pi\omega t) \sin \beta$  –

компонента скорости виброперемещений поверхности ската в направлении  $x$  координаты.

Величина квазитеплого потока, генерируемого вибрирующим скатом внутри слоя зернистой среды, находящегося в состоянии газа твердых частиц, определяется на основе постулата. В соответствии с постулатом величина квазитеплого потока пропорциональна температуре зернистой среды, концентрации частиц в расчете на единицу площади поверхности, перпендикулярной квазитепловому потоку ( $b^{-2}d^{-2}$ ), и частоте импульсов  $\omega$ , сообщаемых потоку материала вибрирующим основанием:

$$Q(y) = b^{-2}(y)d^{-2}(y)\theta_v(y)\omega. \quad (4.16)$$

Вместе с тем очевидно, что вследствие диссипации механической энергии при передаче импульсов частицами внутри слоя, величина квазитеплого потока уменьшается в направлении от основания к открытой поверхности слоя:

$$Q(y) = Q(0) - \int_0^y \Delta Q(t) dt, \quad (4.17)$$

где  $\Delta Q(t)$  – удельная энергия диссипации механической энергии в расчете на единицу объема потока зернистой среды. Эта энергия рассчитывается как доля кинетической энергии вибрирующих частиц, рассеиваемой при их столкновении, вследствие эффектов трения и упругости. В результате удельная объемная энергия диссипации определяется как величина, пропорциональная числу частиц в единице объема слоя ( $b^{-3}d^{-3}$ ), частоте столкновений частиц  $\omega$  и удельной энергии диссипации  $E(y)$  в расчете на одно столкновение частиц:

$$\Delta Q(y) = E(y)(b(y)d(y))^{-3}\omega. \quad (4.18)$$

Удельная диссипация механической энергии в расчете на одно столкновение частиц  $E(y)$  вычисляется следующим образом:

$$E(y) = \frac{1}{2}mk_E V'(y)^2 = k_E\theta_v(y), \quad (4.19)$$

где  $V'(y)$  – скорость флуктуации вибрирующих частиц;  $m$  – масса частицы;  $k_E$  – доля кинетической энергии частиц, рассеиваемой при их столкновении, которая рассчитывается с использованием комбиниро-

ванной гипотезы косо́го удара (4.9), позволяющей объединить достоинства классических гипотез удара Раусса и Ньютона.

С учетом выражений (4.16), (4.18) и (4.19) уравнение (4.17) может быть представлено в следующем виде

$$\begin{aligned} Q(y) &= Q(0) - \int_0^y k_E [b(t)d(t)]^{-3} \omega \theta_v(t) dt = \\ &= Q(0) - \int_0^y k_E [b(t)d(t)]^{-1} Q(t) dt. \end{aligned} \quad (4.20)$$

В результате преобразования уравнения (4.20) путем дифференцирования можно получить следующее соотношение:

$$\frac{dQ(y)}{dy} = -k_E [b(t)d(t)]^{-1} Q(t). \quad (4.21)$$

После разделения переменных в соотношении (4.21) и интегрирования левой и правой частей в пределах от  $Q(0)$  до  $Q(y)$  и от 0 до  $t$ , соответственно:

$$\int_0^y \frac{dQ(y)}{Q(y)} = \int_0^y -k_E [b(t)d(t)]^{-1} dt$$

представляется возможным получить зависимость, позволяющую прогнозировать динамику затухания квазитеплового потока  $Q(0)$ , генерируемого вибрирующим основанием в гравитационном потоке зернистого материала, в следующем виде:

$$Q(y) = Q(0) e^{-\int_0^y k_E (b(t)d(t))^{-1} dt}. \quad (4.22)$$

В результате совместного анализа выражений (4.9) и (4.22) можно указать на фундаментальную роль, которую играют физико-механические свойства частиц в процессе распространения энергии виброколебаний ската в быстром гравитационном потоке зернистого материала. Интенсивность поглощения энергии виброколебаний, обусловленного эффектами упругости и трения при столкновении частиц, определяется с использованием коэффициентов восстановления при ударе  $k$ , трения между частицами  $\mu$  и редукции касательной составляющей скорости при столкновении частиц  $\lambda$  с учетом переменных по высоте слоя структурных характеристик потока.

При известной закономерности изменения величины квазитеплового потока (4.22), генерируемого вибрирующим скатом, представляется возможным, воспользовавшись соотношением (4.16), выразить вибрационную составляющую температуры зернистой среды в зависимости от высоты слоя в следующем виде:

$$\theta_v(y) = Q(y)(b(y)d(y))^2 / \omega. \quad (4.23)$$

Для определения профиля температуры  $\theta_v(y)$  в соответствии с выражениями (4.22) – (4.23) необходимо располагать значениями геометрического параметра  $b(y) = [\pi / (6(1 - \varepsilon(y)))]^{0,33}$  и среднего объемного размера частиц

$$d(y) = (c(y)/\rho_1 d_1 + (1 - c(y))/\rho_2 d_2)(c(y)/\rho_1 + (1 - c(y))/\rho_2)^{-1},$$

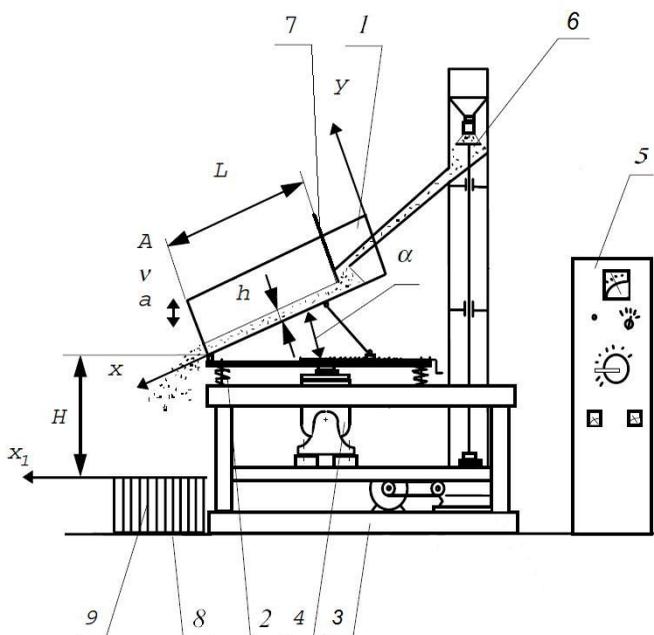
которые вычисляются с использованием профилей порозности  $\varepsilon(y)$  и распределения концентрации компонентов в потоке зернистой среды.

Однако, для определения профиля порозности на базе уравнения состояния зернистой среды (4.1) требуется информация о локальных значениях общей температуры в потоке, вычисляемой в соответствии с выражением (4.2). В рамках настоящего исследования профили порозности  $\varepsilon(y)$ , скорости  $u(y)$ , температуры  $\theta(y)$  и распределения неоднородных частиц  $c(y)$  в быстром гравитационном потоке зернистой среды на вибрирующем шероховатом скате определяются с использованием итерационной процедуры, лежащей в основе экспериментально-аналитического метода [24, 34, 43]. Метод основан на представлении о зернистой среде, находящейся в условиях быстрого сдвига, как о газе твердых частиц, параметры которого находятся во взаимосвязи, определяемой уравнением состояния зернистой среды (4.1), и предполагает использование дополнительной экспериментальной информации в виде распределения частиц, падающих с шероховатого ската, по горизонтальной координате.

## **4.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И СЕГРЕГАЦИИ В ПОТОКЕ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ВИБРИРУЮЩЕМ ШЕРОХОВАТОМ СКАТЕ**

В настоящей работе для прогнозирования профиля скорости и распределений твердой фазы и неоднородных частиц зернистой среды вследствие их сегрегации в гравитационном потоке на вибрирующем

скате используется уравнение взаимосвязи структурных и кинематических параметров потока (4.1) в совокупности с экспериментально определяемой функцией распределения ссыпающегося со ската материала вдоль некоторой горизонтали. Для исследования структурно-кинематических параметров и эффектов взаимодействия неоднородных частиц в быстром сдвиговом потоке зернистого материала на гравитационном скате использована экспериментальная установка, представленная схематически на рис. 4.2. Установка состоит из наклонного канала прямоугольного сечения, который крепится с помощью упругих опор на раме с возможностью регулирования угла наклона к горизонту. Канал имеет гладкие боковые стенки и шероховатое основание с размером шероховатостей, соответствующим половине диаметра наиболее крупных частиц зернистого материала. Под сыпным порогом канала на расстоянии  $H$  по отвесу установлена кювета, разделенная поперечными перегородками на ячейки одинакового размера.



**Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки:**

- 1 – канал; 2 – пружины; 3 – рама; 4 – вибрационный привод;
- 5 – панель управления виброприводом; 6 – дозатор;
- 7 – экран-задвижка; 8 – кювета; 9 – ячейки

Канал жестко связан с электрическим виброприводом, сообщаемым каналу вертикальные синусоидальные колебания с возможностью регулирования их амплитуды и частоты.

Экспериментальная часть метода заключается в дозировании зернистого материала непосредственно в наклонный канал при определенных параметрах его вибрации и заполнение ячеек кюветы падающими частицами в условиях стационарного режима течения.

Экспериментальные данные, достаточные для исследования профилей скорости, порозности и распределения неоднородных частиц в потоке, содержат высоту слоя  $h$ , высоту падения частиц со ската  $H$ , угол его наклона к горизонту  $\alpha$ , время заполнения кюветы  $t$  и функцию распределения сыпавшегося материала  $G(x_1)$  по ее ячейкам (по горизонтальной координате  $x_1$ ).

Уравнения, позволяющие на базе уравнения состояния зернистой среды (4.1) и функции распределения  $G(x_1)$  определить профили скорости  $u(y)$ , порозности  $\varepsilon(y)$ , давления  $p(y)$  и температуры зернистой среды  $\theta(y)$  в быстром гравитационном потоке на шероховатом скате, были получены в работе [43]:

$$|\vec{u}| = \frac{x_1 - y \sin \alpha}{\cos \alpha \sqrt{(H + y \cos \alpha - (x_1 - y \sin \alpha) \operatorname{tg} \alpha) \frac{2}{g}}}; \quad (4.24)$$

$$u(y(x_1))p(1 - \varepsilon(y)) = G(x_1). \quad (4.25)$$

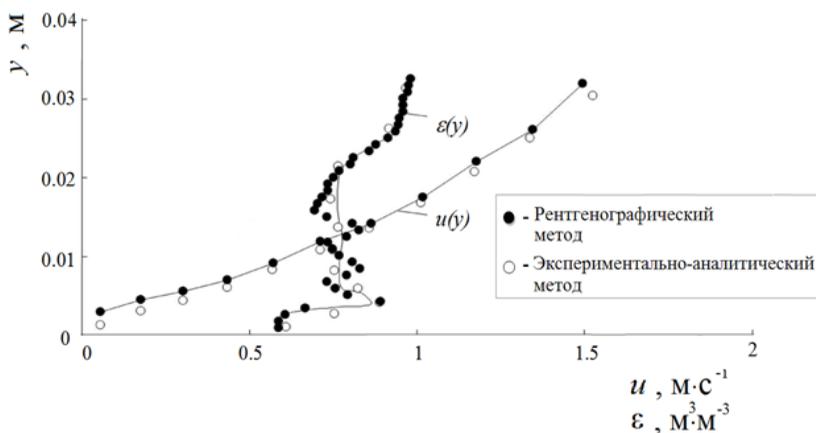
В приведенных уравнениях  $y(x_1)$  является  $y$  – координатой частицы в слое, определяемой в зависимости от ее координаты на горизонтали  $x_1$  после падения со ската (рис. 4.2). Уравнения (4.1) – (4.3), (4.23) – (4.25) образуют замкнутую систему уравнений в отношении профилей скорости  $u(y)$ , порозности  $\varepsilon(y)$ , давления  $p(y)$  и функции взаимосвязи  $y(x_1)$ . Система уравнений решается при граничном условии у основания потока, соответствующем условию прилипания его частиц к поверхности шероховатого ската:

$$u(0) = 0, \quad \text{при } y = 0. \quad (4.26)$$

Названное граничное условие предполагает отсутствие проскальзывания вдоль поверхности ската у частиц в том случае, когда коорди-

ната у их центра масс совпадает с координатой вершин шероховатостей ( $y = 0$ ), размер которых соответствует половине диаметра наиболее крупных частиц зернистого материала. Адекватность уравнения состояния зернистой среды (4.1) и изложенного метода его использования для прогнозирования комплекса параметров быстрого гравитационного потока подтверждена в работе [34] с применением метода рентгенографии. Результаты оценки адекватности представлены на рис. 4.3.

Замечательной особенностью метода является возможность получения информации о профилях распределения концентрации неоднородных частиц  $c(y)$  в сдвиговом потоке. При исследовании эффектов взаимодействия неоднородных частиц влияние случайного начального их распределения в потоке предотвращалось за счет достаточно большой длины шероховатого ската. Правомерность допущения о пренебрежимо малой величине силы сопротивления воздуха при определении траектории падающих частиц, а соответственно и взаимосвязи координат  $y(x_1)$ , подтверждалась экспериментально путем сравнения профилей  $c(y)$ ,  $u(y)$ ,  $\varepsilon(y)$  и  $p(y)$  для различных высот расположения ската над кюветой  $H$ . При реализации метода система уравнений (4.1) – (4.3), (4.23) – (4.26) решается численным методом с использованием метода последовательных приближений и первого приближения:  $\varepsilon(y) = \varepsilon = \text{const}$ .



**Рис. 4.3. Профили скорости  $u(y)$  и порозности  $\varepsilon(y)$  в быстром гравитационном потоке керамических шаров на шероховатом скате [34]**

Профили скорости, порозности и распределения концентрации неоднородных частиц в быстром гравитационном потоке зернистых материалов на шероховатом скате в отсутствие и при наложении вибраций исследованы с использованием экспериментально-аналитического метода, изложенного в предыдущем разделе. В качестве модельных зернистых материалов использованы смеси частиц, различающихся по размеру (смесь 1), плотности (смесь 2) и шероховатости (смесь 3), характеристики которых представлены в табл. 4.1.

В целях снижения случайной составляющей погрешности и обеспечения условий для статистической оценки ее значений все опыты повторялись трижды, результаты опытов проверялись на статистическую однородность при доверительной вероятности 95% с оценкой среднего квадратичного отклонения. Установлено, что результаты всех опытов статистически однородны при стандартном отклонении, не превышающем 12%. Экспериментально-аналитические профили скорости, порозности и распределений концентрации неоднородных частиц в быстром гравитационном потоке на шероховатом вибрирующем скате для смесей 1 – 3 представлены на рис. 4.4, *a – в*. При анализе результатов особое внимание обращает на себя высокая степень аналогии профилей скорости для различных смесей, имеющих параболическую форму. Эта особенность наблюдается при наличии принципиальных различий профилей распределений неоднородных частиц и представляется достаточно важной на фоне модельных представлений о сегрегации, изложенных в работе [23], в соответствии с которыми движущей силой процесса являются градиенты скорости сдвига и прямо связанных с ней параметров.

В соответствии с классификацией режимов гравитационных течений, приведенной в работе [13], полученные профили скорости в их основных аспектах характерны для развитого сдвигового течения. Такой режим течения наблюдается при углах наклона шероховатого ската, близких углу естественного откоса материала и несколько превышающих его значения. Функции распределения концентрации твердой фазы по высоте слоя, которые могут быть получены с использованием профилей порозности, как  $1 - \varepsilon(y)$ , свидетельствуют о том, что во всех случаях в центральной части потока наблюдаются максимальные значения концентрации частиц.

Вследствие снижения квазигидростатического давления в направлении к открытой поверхности потока наблюдается постепенное снижение концентрации частиц до нулевых значений на границе слоя. Концентрация частиц снижается и в противоположном направлении от центральной части потока.

#### 4.1. Характеристики смесей модельных зернистых материалов

Характеристики смесей	Смесь 1		Смесь 2		Смесь 3	
	Бисер стекло	Бисер стекло	Бисер стекло	Силикагель	Семена моркови	Семена пшенички
Материал частиц						
Размер частиц ( $10^{-3}$ ), м	+3,0...3,5	+5...5,5	+5...5,5	+5...5,5	1,5...2,2	1,5...2,2
Концентрация в смеси, кг·кг <sup>-1</sup> , шт·кг <sup>-1</sup>	—	0,2	0,95	0,05	—	—
	—	—	—	—	9,5·10 <sup>5</sup>	3700
Плотность частиц, кг·м <sup>-3</sup>	2500	2500	2500	1015	1150	1165
	26	26	26	31	41	31
Угол естественного откоса, град						

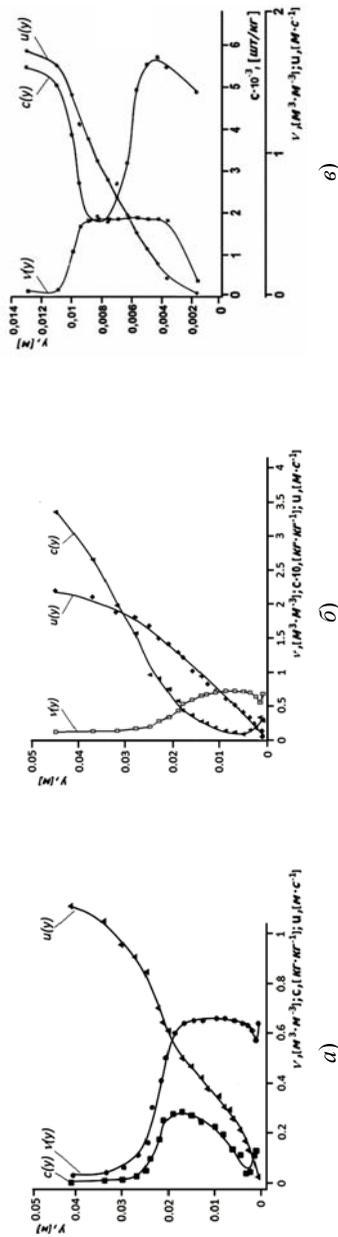


Рис. 4.4. Профили скорости  $u(y)$ , объемной доли твердой фазы  $v(y)$  и концентрации  $c(y)$  крупных (а), легких (б) и гладких (е) частиц, полученные экспериментально-аналитическим методом в быстрых гравитационных потоках частиц, отличающихся по размеру (а) ( $\alpha = 30^\circ$ ), плотности (б) ( $\alpha = 30^\circ$ ) и шероховатости (е) ( $\alpha = 43^\circ$ ) на шероховатом вибрирующем скате при вертикальной вибрации:  $\omega = 15$  Гц,  $A = 0,002$  м [24]

Однако, снижение концентрации по направлению к основанию слоя сменяется ее увеличением в непосредственной близости от поверхности ската, что объясняется отсутствием проскальзывания у частиц, координата центра масс которых соответствует координате вершин шероховатостей поверхности ската. Наблюдаемые особенности распределения концентрации частиц в быстром гравитационном потоке на скате с максимальным значением концентрации в центре слоя были описаны ранее в работах [13, 30, 31, 34] и объяснены образованием облака частиц в верхней части слоя и наличием области интенсивного сдвига в зоне, прилегающей к его основанию.

Вместе с тем, для потоков всех модельных материалов важно отметить яркое проявление аналогии профилей порозности и распределений концентрации неоднородных частиц. Очевидно, что наблюдаемая аналогия является следствием того, что разделение неоднородных частиц протекает в соответствии с механизмами, движущая сила которых в значительно большей степени коррелируется с градиентом концентрации твердой фазы чем с градиентом скорости сдвига. Действительно, с учетом преимущественно монотонного изменения скорости сдвига в потоках всех смесей неоднородные частицы распределяются в слое, явно обнаруживая при этом реакцию на изменение концентрации твердой фазы. Частицы смесей 1 – 3 (табл. 4.1), которые приобретают при взаимных столкновениях более высокие скорости флуктуаций (мелкие, менее плотные и гладкие), концентрируются в частях потока, имеющих высокую порозность. Напротив, крупные, плотные и шероховатые частицы, скорость флуктуаций которых в результате столкновений частиц смеси относительно невелика, сосредотачиваются в областях потока, отличающихся высокой концентрацией твердой фазы.

Физический механизм наблюдаемых перераспределений неоднородных частиц может быть объяснен с использованием математических моделей кинетики процессов разделения частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств, вследствие локальной и пространственной неоднородности сдвигового потока зернистой среды [24, 30, 31]. Потоки разделения, обусловленные локальной и пространственной неоднородностью потока, определены на базе общекинетических закономерностей процессов химических технологий, как произведение движущей силы и кинетического коэффициента.

Поток разделения, являющийся следствием локальной неоднородности частиц среды, формируется под действием механизма, характерного для процессов сегрегации. С целью отражения зависимо-

сти величины соответствующего потока от комплекса физико-механических свойств частиц предложено его описание с использованием механизма сдвиговой поточной сегрегации [43, 52]. В соответствии с этим механизмом движущая сила сегрегации определена как избыточный суммарный момент сил тяжести, трения и ударных импульсов  $\Delta M$ , действующих на частицу контрольного компонента в сдвиговом потоке условно однородной зернистой среды, характеристики частиц которой определяются как средние объемные [31, 36]. Такое выражение движущей силы процесса позволяет проводить количественную оценку степени влияния неоднородности частиц по комплексу свойств (размеру, плотности, шероховатости и упругости) на интенсивность сегрегации. Для определения коэффициента скорости процесса (сегрегации)  $K_s$  разработан метод, изложенный в работах [31, 36]. В этих же работах приведены результаты исследования, которые свидетельствуют о том, что для широкого диапазона параметров сдвигового течения и свойств частиц коэффициент сегрегации может быть принят за кинетическую константу. Этот факт можно рассматривать как косвенное подтверждение адекватности модельных представлений о механизме процесса. Результаты исследования позволяют выразить величину потока сегрегации в следующем виде (1.3):

$$\bar{j}_s = K_s c \rho_b \Delta M.$$

В соответствии с изложенными кинетическими закономерностями сегрегации представляется возможным объяснить форму профилей распределений концентрации неоднородных частиц в центральной зоне потока. Вследствие относительно высоких и однородных значений концентрации твердой фазы в центральной зоне потока доминирует эффект сегрегации. Поскольку в таких условиях для крупных, менее плотных и более крупных шероховатых частиц имеет место [31, 36] положительное значение избыточного момента сил  $\Delta M$  (1.4), то наблюдается (рис. 4.4, *a – в*) их перемещение в верхнюю часть центральной зоны с увеличением концентрации в направлении от основания к открытой поверхности потока.

Эффект разделения частиц, обусловленный пространственной неоднородностью потока зернистой среды, имеет квазидиффузионную природу и назван миграцией [30]. Физический механизм миграции формально аналогичен эффекту термо-бародиффузии в смеси газов [62], в соответствии с которым молекулы, имеющие высокие скорости флуктуаций, мигрируют в область, в которой существуют условия для

их хаотических перемещений с высокими длинами свободного пробега. Движущая сила и коэффициент скорости миграции определены с учетом ее физической природы как процесса квазидиффузионного разделения частиц, имеющих различную скорость хаотических перемещений, в условиях пространственной неоднородности структуры потока. Движущая сила миграции определена [30, 36] как темп изменения среднего расстояния  $s$  между частицами (1.6) в направлении  $y$  потока разделения:  $d(\ln s)/dy = (1/s) grads$ .

Коэффициент миграции выражен [30, 31] как величина результирующего квазидиффузионного потока частиц (1.8), различающихся по размеру, плотности, упругости и шероховатости, для случая, когда градиент потенциала переноса (изменения среднего расстояния  $s$  между частицами) равен 1. Для частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств, коэффициент миграции выражается в следующем виде (1.9):

$$j = D_m c \rho_b \frac{1}{s} grads = c \rho_b \frac{\overline{m}(c)(V')^2}{2Fk} \left( \frac{d_1^2 k_1}{m_1 \overline{d}^2} - \frac{d_2^2 k_2}{m_2 \overline{d}^2} \right) \frac{1}{s} grads.$$

В соответствии с приведенным кинетическим уравнением поток миграции частиц, приобретающих при взаимных столкновениях относительно высокую скорость хаотических перемещений (мелких, менее плотных, упругих и гладких), совпадает с направлением градиента среднего расстояния между частицами, т.е. направлен в области потока с высокой порозностью. Напротив, частицы, скорость флуктуаций которых относительно невелика (крупные, плотные, шероховатые и менее упругие), мигрируют в направлении, обратном градиенту среднего расстояния между частицами, т.е. перемещаются в области потока с высокой концентрацией твердой фазы. Аналогичная динамика распределения частиц, различающихся по размеру, плотности и шероховатости, наблюдается в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов на вибрирующем шероховатом скате (рис. 4.4,  $a - \nu$ ). Во всех случаях частицы, хаотические перемещения которых характеризуются высокими скоростями флуктуаций, мигрируют в направлении наиболее разреженных периферийных областей потока, обнаруживая минимальные значения концентрации в центральной части потока, имеющей наиболее высокую концентрацию твердой фазы.

В целях изучения влияния параметров вибрации на структурные характеристики быстрого гравитационного потока зернистого мате-

риала и эффекты взаимодействия неоднородных частиц проведено исследование профилей порозности и распределений концентраций контрольных частиц для модельных материалов. В качестве модельных материалов использованы смеси частиц, различающихся преимущественно по размеру (смесь 1), плотности (смесь 2) и шероховатости (смесь 3), характеристики которых приведены в табл. 4.1.

Профили порозности и распределений концентрации контрольных частиц исследованы для случаев высоко- и низкочастотных вертикальных колебаний шероховатого ската, а также в отсутствие виброколебаний. Выбор частот вибрации ската определялся исключительно техническими возможностями вибрационного привода при условии обеспечения виброускорения, равного  $2g$ .

Результаты исследования, представленные на рис. 4.5 – 4.7, позволяют обнаружить принципиальное различие виброреологических эффектов высокочастотных и низкочастотных колебаний в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов на шероховатом скате. Сравнение профилей порозности, полученных в потоках на вибрирующем и неподвижном скатах, свидетельствует о том, что для всех модельных материалов высокочастотные колебания ската способствуют повышению структурной однородности слоя. При этом эффект повышения структурной однородности достигается при относительно высоких значениях концентрации частиц в потоке. Напротив, низкочастотные колебания ската приводят к повышению структурной неоднородности потока при относительно высоких значениях порозности.

С учетом изложенных кинетических закономерностей эффектов сегрегации и миграции высокочастотные колебания формируют в потоке условия, способствующие интенсификации сегрегации, в соответствии с которой частицы разделяются преимущественно по размеру [31, 36, 43]. В то же время, низкочастотные колебания формируют в потоке условия для интенсивной миграции (квазидиффузионного разделения) частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств (размеру, плотности, шероховатости, упругости) без доминирующего влияния размера [30, 31].

Эти выводы подтверждаются формой профилей распределения концентрации контрольных частиц в потоках смесей 1 – 3 (кривые 2 и 3 на рис. 4.5 – 4.7). Интенсификация эффекта сегрегации особенно ярко проявляется для частиц, различающихся по размеру (рис. 4.5), когда под действием высокочастотных колебаний в потоке формируется относительно широкое плато высоких значений концентрации твердой фазы (кривая 2).

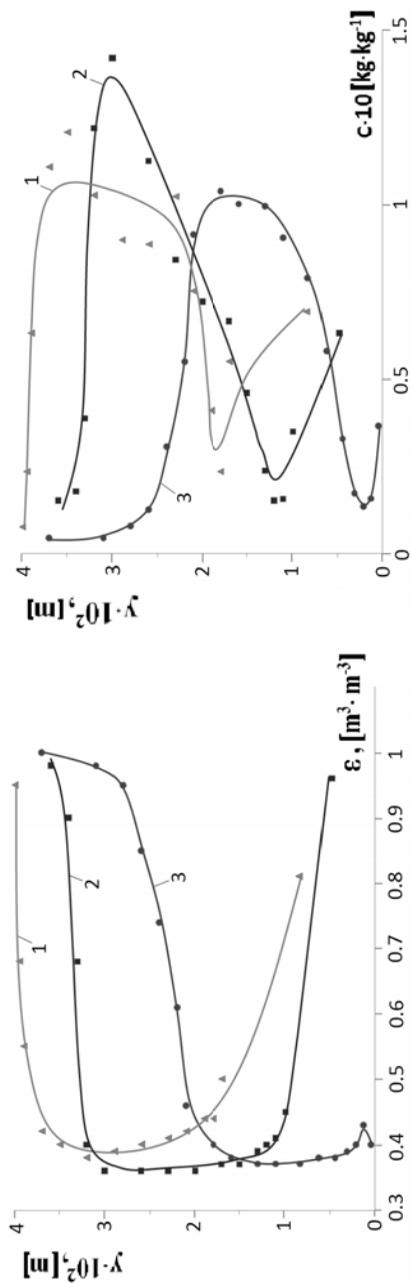


Рис. 4.5. Экспериментально-аналитические профили порозности  $\varepsilon(y)$  и распределения концентрации контрольных частиц  $c(y)$  в быстром гравитационном потоке бинарной смеси частиц, различающихся по размеру (смесь 1, табл. 4.1), на шероховатом вибрирующем скате ( $\alpha = 28,5^\circ, a_v = 2g$ ) при частотах вибрации: 1 – 15 Hz; 2 – 50 Hz; 3 – 0 Hz [24]

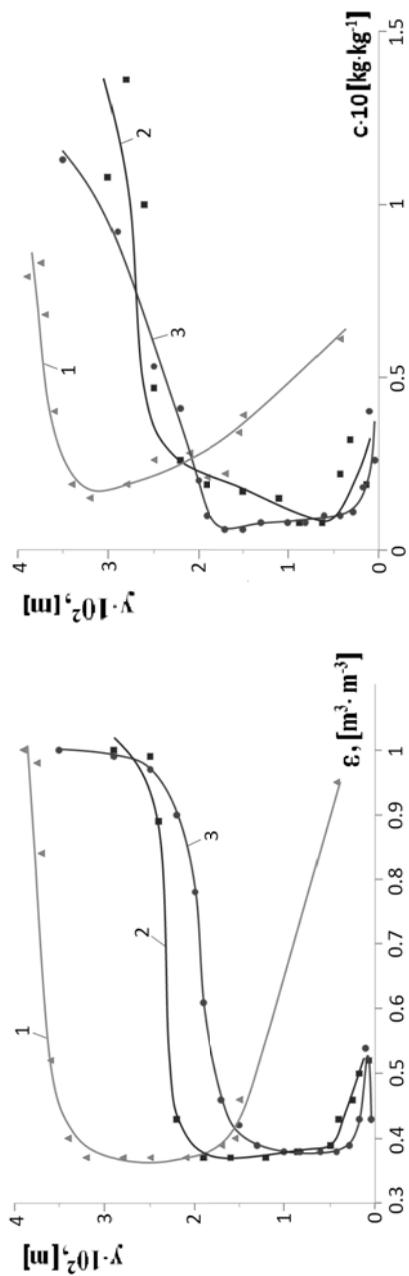


Рис. 4.6. Экспериментально-аналитические профили порозности  $\epsilon(y)$  и распределения концентрации контрольных частиц  $c(y)$  в быстром гравитационном потоке бинарной смеси частиц, различающихся по плотности (смесь 2, табл. 4.1), на шероховатом вибрирующем скаге ( $\alpha = 27^\circ$ ,  $a_v = 2g$ ) при частотах вибрации: 1 – 15 Hz; 2 – 50 Hz; 3 – 0 Hz [24]

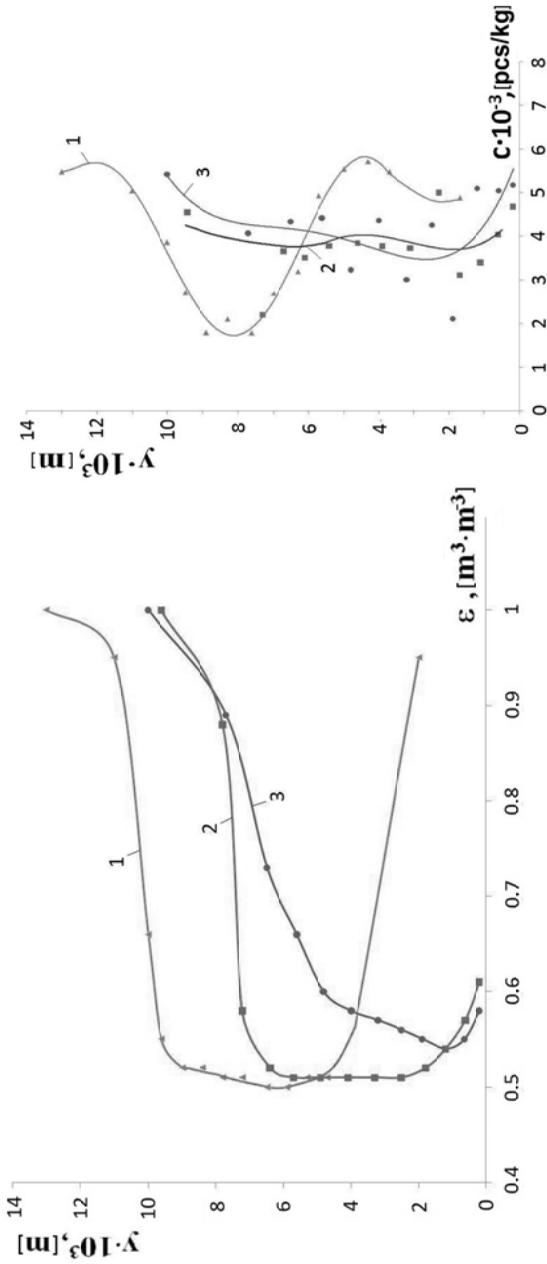


Рис. 4.7. Экспериментально-аналитические профили порозности  $\varepsilon(y)$  и распределения концентрации контрольных частиц  $c(y)$  в быстром гравитационном потоке бинарной смеси частиц, различающихся по шероховатости (смесь 3, табл. 4.1), на шероховатом вибрирующем скате ( $\alpha = 43^\circ$ ,  $a_v = 2g$ ) при частотах вибрации: 1 – 15 Hz; 2 – 50 Hz; 3 – 0 Hz [24]

Условия взаимодействия частиц в области плато способствуют интенсивной сегрегации и приводят к монотонному возрастанию концентрации крупных частиц в направлении к открытой поверхности слоя. Во многом аналогичный эффект усиления сегрегации под действием высокочастотных колебаний наблюдается и для смеси 2 (табл. 4.1), состоящей из частиц, различающихся преимущественно по плотности (кривая 2 на рис. 4.6). В этом случае, как и для частиц, различающихся по размеру, наблюдается интенсификация эффекта сегрегации в области плато концентрации твердой фазы, которое формируется под действием высокочастотных колебаний. Однако, вследствие менее интенсивной сегрегации частиц по плотности, чем по размеру, концентрация легких частиц увеличивается в области плато в направлении к открытой поверхности с относительно небольшой интенсивностью. Вместе с тем, в области потока, расположенной над плато и непосредственно прилегающей к открытой поверхности слоя, интенсивность разделения частиц по плотности резко возрастает. Это объясняется суммированием эффектов сегрегации и миграции (квазидиффузионного разделения) в указанной области потока, где частицы с малой плотностью мигрируют в направлении градиента среднего расстояния между частицами, которое совпадает с направлением их сегрегации.

В условиях низкочастотных колебаний шероховатого ската в потоках формируются профили распределений концентрации неоднородных частиц, которые характерны для случая доминирования эффекта квазидиффузионного их разделения (миграции). Основанием для такого вывода является то, что движущей силой миграции является градиент среднего расстояния между частицами, которое прямо зависит от порозности слоя. В связи с этим направление градиентов порозности и расстояния между частицами совпадает. В таком случае, наблюдаемая аналогия формы профилей порозности и распределений концентрации контрольных частиц (зеркальная для крупных частиц смеси 1 на рис. 4.5) может служить подтверждением вывода о доминировании эффекта миграции в условиях низкочастотных колебаний.

Очевидная аналогия формы профилей порозности и распределений концентрации легких и гладких частиц наблюдается также при низкочастотных колебаниях в потоках смесей 2 и 3 (кривые 3 на рис. 4.6 и 4.7). Наблюдаемая аналогия, которая была отмечена и ранее при анализе результатов, представленных на рис. 4.4, служит подтверждением квазидиффузионной природы эффекта разделения неоднородных частиц. Эффект заключается в противоточном переме-

щении частиц, имеющих различные скорости флуктуаций, в областях потока, которые характеризуются наличием градиента порозности (среднего расстояния между частицами). При этом частицы, приобретающие при взаимных столкновениях высокие скорости флуктуаций (маленькие, менее плотные и гладкие частицы), мигрируют в направлении градиента порозности. Напротив, частицы, скорости флуктуаций которых относительно невелики (большие, плотные и шероховатые частицы), перемещаются в направлении, противоположном направлению градиента порозности, т.е. в направлении градиента концентрации твердой фазы. Кроме того, важно отметить, что во всех исследованных случаях (рис. 4.4 – 4.7) наблюдаются альтернативные варианты поперечных перемещений неоднородных частиц, что свидетельствует об отсутствии прямой корреляции направления потоков разделения с направлением градиента скорости сдвига. Частицы в потоках смесей 1 – 3, различающиеся по размеру, плотности и шероховатости, могут перемещаться в потоке как в направлении градиента скорости сдвига, так и в противоположном направлении, что противоречит модельным представлениям о сегрегации, изложенным в работе [23].

Кроме того, важно отметить, что во всех исследованных случаях в быстрых гравитационных течениях наблюдаются значительные градиенты концентрации частиц твердой фазы в верхней и нижней частях потоков (рис. 4.3 – 4.6). Градиенты концентрации имеют место в потоках и при наложении и в отсутствие виброколебаний, но особенно ярко они проявляются в условиях низкочастотных колебаний. Образование зоны с высокой порозностью в нижней части потока объясняется экспоненциальным возрастанием температуры зернистой среды в направлении основания слоя в соответствии с зависимостями (4.22) и (4.23). Снижение же гидростатического давления в направлении открытой поверхности потока в соответствии с уравнением состояния (4.1) сопровождается дилатансией, что приводит к формированию зоны с высокой порозностью и вблизи открытой поверхности слоя. Поскольку в указанных зонах градиенты концентрации частиц твердой фазы имеют противоположное направление, то наблюдаются потоки квазидиффузионного разделения (миграции), направленные в противоположные стороны в верхней и нижней частях слоя. Этот вывод может быть гипотетическим ответом на вопрос «почему не все крупные и менее плотные частицы концентрируются на поверхности виброоживленного слоя?» и, в результате, послужить еще одним объяснением «обратной проблемы бразильского ореха» (Reverse Brazil Nuts Problem – RBNP) [63, 64].

Анализ обнаруженных явлений приводит к выводу о том, что миграция неоднородных частиц, обусловленная их взаимодействием и взаимной квазидиффузией в условиях неоднородного распределения концентрации твердой фазы, является основным физическим механизмом разделения частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств, в быстром тонкослойном гравитационном потоке зернистой среды на шероховатом вибрирующем скате при низкочастотных колебаниях.

#### **4.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЕГРЕГАЦИИ И МИГРАЦИИ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТОКЕ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ШЕРОХОВАТОМ ВИБРИРУЮЩЕМ СКАТЕ**

Комплекс информации о структурно-кинематических характеристиках потока, который представляется возможным получить с использованием разработанного метода, может быть использован для моделирования динамики эффектов взаимодействия неоднородных частиц при быстром гравитационном их течении на шероховатом вибрирующем скате. Моделирование динамики эффектов взаимодействия частиц, различающихся по комплексу физико-механических свойств (размеру, плотности, шероховатости, упругости), возможно [31] путем интегрирования дифференциального уравнения (1.12), описывающего взаимосвязь потоков переноса контрольного компонента смеси частиц под действием их конвекции, квазидиффузионного перемешивания (1.10), сегрегации (1.3) и миграции (1.9):

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

В уравнении динамики сегрегации коэффициент квазидиффузионного перемешивания  $D_{dif}$  вычисляется [24, 36, 43] в соответствии с молекулярно-кинетической теорией (1.11). Коэффициент миграции  $D_m$  вычисляется как функция свойств частиц и структурно-кинематических характеристик потока с использованием зависимости (1.8). Коэффициент сегрегации  $K_s$  является единственной кинетической характеристикой, которая определена экспериментально как константа с использованием метода, описанного в работе [36]. Движущая сила процесса сегрегации

$\Delta M$  – кинетический параметр, входящий в уравнение динамики сегрегации, вычисляется как избыточный момент сил (1.4), действующих на частицу контрольного компонента в сдвиговом потоке неоднородных частиц, в соответствии с зависимостями, приведенными в работе [52].

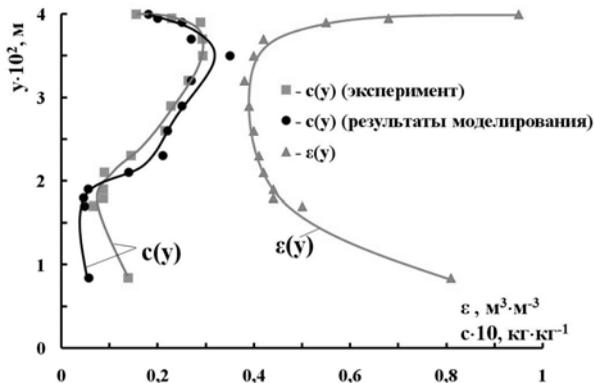
Граничные условия для уравнения динамики сегрегации формулируются из условия отсутствия поперечных материальных потоков на верхней ( $y = h$ ) и нижней ( $y = 0$ ) границах движущегося слоя частиц в виде

$$D_{dif} \frac{\partial c}{\partial y} = c D_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} = K_s c \Delta M|_{y=0,h} = 0. \quad (4.27)$$

Начальное условие в общем случае можно задать как

$$c(0, x, y) = f(x, y). \quad (4.28)$$

Уравнение динамики сегрегации с граничными (4.27) и начальным (4.28) условиями проинтегрировано численным методом с использованием разностной схемы Кранка–Николсон. На рисунках 4.8 – 4.11 приведены результаты моделирования профилей распределения концентрации контрольных компонентов в быстрых гравитационных потоках смесей частиц, различающихся по размеру (смесь 1, табл. 4.1) и плотности (смесь 2, табл. 4.1), на шероховатом вибрирующем скате. Моделирование выполнено при начальном условии, соответствующем однородному распределению компонентов смеси в потоке.



**Рис. 4.8.** Профили порозности  $\varepsilon(y)$  и распределения концентрации  $c(y)$  крупных частиц в гравитационном потоке смеси бисера, различающегося по размеру, на гравитационном скате при низкочастотных колебаниях ( $\omega = 15 \text{ Гц}$ ,  $a_v = 2g$ )

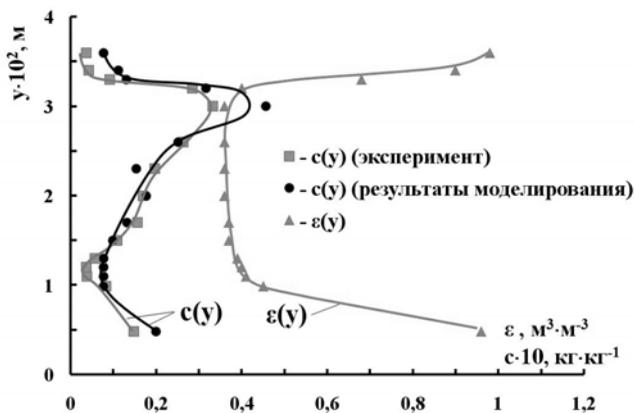


Рис. 4.9. Профили порозности  $\varepsilon(y)$  и распределения концентрации  $c(y)$  крупных частиц в гравитационном потоке смеси бисера, различающегося по размеру, на гравитационном скате при высокочастотных колебаниях ( $\omega = 50$  Гц,  $a_v = 2g$ )

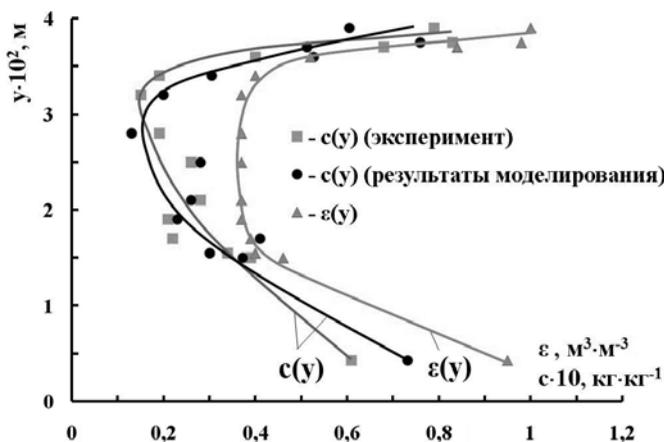
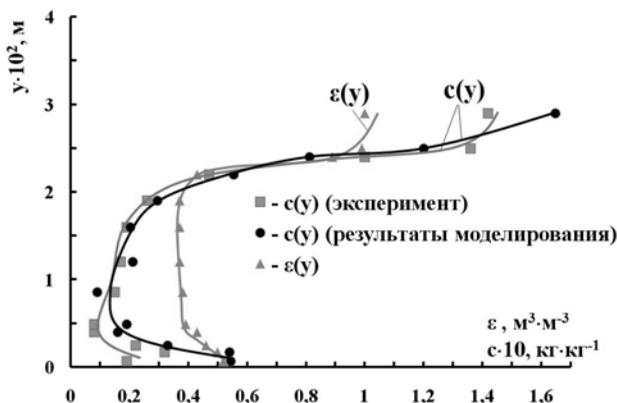


Рис. 4.10. Профили порозности  $\varepsilon(y)$  и распределения концентрации  $c(y)$  менее плотных гранул силикагеля в гравитационном потоке смеси однородных по размеру гранул бисера и силикагеля при низкочастотных колебаниях ската ( $\omega = 15$  Гц,  $a_v = 2g$ )

Результаты моделирования для случаев низко- и высокочастотных вибраций ската представлены на рисунках в сравнении с экспериментальными данными. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов во всех случаях свидетельствует об их адекватности.



**Рис. 4.11. Профили порозности  $\varepsilon(y)$  и распределения концентрации  $c(y)$  менее плотных гранул силикагеля в гравитационном потоке смеси однородных по размеру гранул бисера и силикагеля при высокочастотных колебаниях ската ( $\omega = 50$  Гц,  $a_v = 2g$ )**

Оценка адекватности выполнена при доверительной вероятности 95% путем анализа соотношения дисперсий адекватности и воспроизводимости с использованием F-критерия Фишера. Поскольку моделирование концентрационных профилей осуществляется на базе исходных данных, включающих профили скорости и порозности в потоках зернистых сред на вибрирующем скате, то адекватность смоделированных концентрационных профилей служит дополнительным подтверждением адекватности результатов определения структурно-кинематических параметров с использованием предложенного экспериментально-аналитического метода.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Проведено экспериментально-аналитическое исследование влияния виброколебаний на структурные и кинематические характеристики быстрого гравитационного потока зернистой среды на шероховатом скате. Исследование выполнено с использованием экспериментально-аналитического метода, позволяющего определять профили скорости, порозности или концентрации твердой фазы и распределений концентрации неоднородных частиц по высоте слоя на вибрирующем скате при быстром гравитационном течении зернистой среды. В основе метода лежит физическая аналогия между зернистой средой при быст-

ром сдвиге и плотным газом, в соответствии с которой зернистая среда позиционируется как «газ твердых частиц». С учетом названной физической аналогии устанавливается взаимосвязь между дилатансией, квазигидростатическим давлением и температурой зернистой среды. Температура зернистой среды определяется как составляющая кинетической энергии частиц, которая обусловлена наличием различных форм взаимных перемещений частиц. При определении температуры приняты во внимание четыре элементарные формы относительных перемещений частиц, которые являются следствием гравитационного и вибрационного воздействий: хаотические флуктуации; поперечный массоперенос; относительное сдвиговое и вибрационные перемещения.

Аналитическое описание температуры зернистой среды, генерируемой в быстром сдвиговом потоке вибрирующим шероховатым скатом, в зависимости от координаты высоты слоя получено путем определения энергии виброколебаний, поглощаемой зернистой средой и динамики ее диссипации в направлении от основания к открытой поверхности потока. При этом предложен постулат, в соответствии с которым квазитепловой поток, генерируемый внутри слоя вибрирующим основанием пропорционален температуре зернистой среды, обусловленной виброколебаниями, концентрации частиц и частоте вибраций. Установлено, что квазитепловой поток убывает в направлении от вибрирующего ската к открытой поверхности слоя по экспоненциальному закону с показателем экспоненты, пропорциональным линейной концентрации частиц в потоке и коэффициенту диссипации, который вычисляется как доля кинетической энергии частиц, рассеиваемой при их столкновениях в стесненных условиях.

В качестве модельных материалов использованы бинарные смеси частиц, различающихся по размеру, плотности и шероховатости. В результате исследования влияния виброколебаний на микроструктуру быстрого гравитационного потока зернистой среды на шероховатом скате установлен принципиально различный эффект низкочастотных и высокочастотных колебаний. Низкочастотные колебания приводят к повышению структурной неоднородности потока с расширением зон, характеризующихся высокими значениями градиентов концентрации твердой фазы, в нижней и верхней частях слоя. Этот эффект объясняется экспоненциальным повышением температуры зернистой среды по высоте слоя в направлении к его основанию и снижением квазигидростатического давления в обратном направлении. Неоднородность микроструктуры гравитационного потока становится причиной ини-

цирования в соответствующих его частях потоков квазидиффузионного разделения (миграции) неоднородных частиц по плотности, шероховатости, упругости и размеру без доминирующего значения последнего. Поскольку градиенты концентрации твердой фазы в верхней и нижней частях гравитационного потока имеют противоположное направление, то потоки миграции неоднородных частиц направлены либо в центральную часть слоя, либо в его периферийные области. В связи с этим экстремальные концентрации неоднородных частиц наблюдаются либо в центральной части слоя, либо одновременно вблизи его открытой поверхности и основания. Этот механизм формирования поля концентрации неоднородных частиц может быть использован в качестве гипотетического объяснения «обратной проблемы бразильского ореха» (Reverse Brazil Nut Problem – RBNP).

Напротив, в отличие от низкочастотных колебаний, высокочастотные виброколебания приводят к повышению однородности микроструктуры быстрого гравитационного потока на шероховатом скате при относительно высоких значениях концентрации твердой фазы. В результате, в потоке создаются условия, благоприятные для разделения неоднородных частиц в соответствии с механизмами сегрегации, которая протекает при доминирующем значении различия частиц по размеру.

## **5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТОВ СЕГРЕГАЦИИ И МИГРАЦИИ**

---

### **5.1. СПЕЦИФИКА ЭФФЕКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЧАСТИЦ В СДВИГОВЫХ ПОТОКАХ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Перспектива технологического использования эффектов разделения (сегрегации и миграции) в быстрых гравитационных потоках неоднородных зернистых материалов определяется, по крайней мере, двумя обстоятельствами. Во-первых, спонтанное проявление названных эффектов при гравитационном перемещении перерабатываемых материалов создает благоприятные условия для совмещения и интенсификации гидромеханических и тепломассообменных процессов [2]. Во-вторых, согласно кинетическим закономерностям эффектов разделения, исследованных в работах [30, 31, 36, 43, 52, 65 – 67] и описанных в рамках главы 1, обнаруживаются специфические их особенности, открывающие новые технологические возможности в организации процессов переработки зернистых материалов методами разделения. В числе таких особенностей, в первую очередь, следует указать на наличие зависимости кинетики эффектов сегрегации и миграции от комплекса физико-механических свойств частиц, что указывает на возможность организации процессов их разделения не только по размеру и плотности, но и по шероховатости, упругости и форме.

Результаты исследований [30, 31, 36, 43, 52, 65 – 67], в том числе и результаты, представленные в предыдущих разделах монографии (см., например, раздел 2.4), свидетельствуют о принципиальном отличии физической природы и кинетических закономерностей сегрегации и миграции. Вследствие названных отличий проявляются оригинальные технологические характеристики процессов разделения в быстром гравитационном потоке, позволяющие расширить технологические возможности процессов, используемых традиционно для разделения неоднородных частиц сыпучих материалов. Движущей силой сегрегации является избыточный момент сил, действующий на частицу контрольного компонента в сдвиговом потоке условно однородной среды. Несмотря на то, что избыточный момент сил зависит от комплекса отличительных свойств частиц (размера, плотности, шероховатости и

упругости), доминирующее влияние на его величину оказывает различие частиц по размеру. Это обстоятельство указывает на целесообразность использования эффекта сегрегации для организации процессов калибровки и фракционирования зернистых материалов.

С учетом того, что избыточный момент сил, действующий на частицу контрольного компонента, возрастает с увеличением скорости сдвига и убывает с уменьшением концентрации частиц твердой фазы, процессы калибровки и фракционирования материалов целесообразно организовывать в гравитационных потоках, стекающих по шероховатому скату в режиме установившегося развитого сдвигового течения (см. гл. 3). При этом для поддержания высоких значений скорости сдвига в режиме установившегося развитого сдвигового течения его следует поддерживать в фазе, граничащей с режимом расплескивающегося течения [53, 68].

Согласно результатам исследований, приведенным в главах 2 и 4, достижение высоких значений движущей силы сегрегации возможно путем увеличения скорости сдвига при ограниченном росте порозности в гравитационном потоке материала. Ограничение роста порозности возможно обеспечить путем «полевого» воздействия, противодействующего дилатансии гравитационного потока (гидродинамических сил поперечно фильтруемого потока, вибрации, электромагнитного поля и др.).

Эффект миграции, обусловленный взаимной квазидиффузией неоднородных частиц, проявляется при условии структурной неоднородности сдвигового потока. В однородном по микроструктуре потоке взаимная квазидиффузия неоднородных частиц, имеющих различные скорости хаотических перемещений, сопровождается выравниванием их концентрации. В соответствии с результатами исследований, представленными в разделе 1.2, движущей силой миграции является относительное значение градиента среднего расстояния между частицами, который возникает вследствие неоднородного распределения концентрации твердых частиц в гравитационном потоке. Таким образом, для интенсификации процесса миграции необходимо формировать гравитационные потоки с высокими градиентами порозности. Согласно результатам исследований, представленным в главах 2 – 4, эффективными способами преобразования структурных характеристик гравитационных потоков зернистых материалов на шероховатом скате могут быть управляющие воздействия физических полей (гравитационного, гидродинамических сил и вибрации).

Коэффициент же скорости миграции определяется как разность скоростей хаотических квазидиффузионных перемещений неоднород-

ных частиц, которые они приобретают в результате взаимных столкновений, в расчете на единицу движущей силы процесса.

Анализ выражения (1.8), определяющего величину коэффициента миграции в зависимости от структурно-кинематических характеристик потока и комплекса физико-механических свойств частиц, позволяет провести сравнительную оценку степени влияния на интенсивность процесса различия частиц по тому или иному параметру. Согласно указанному выражению причиной различия скоростей квазидиффузионных перемещений неоднородных частиц является их различие по размеру, плотности, упругости и шероховатости.

Хотя показатели шероховатости частиц прямо не входят в выражение (1.8), различие частиц по шероховатости учитывается коэффициентами восстановления при их столкновении, что подтверждается результатами исследования, представленными в работе [31]. В связи с этим важно заметить, что коэффициенты восстановления при столкновении как однородных, так и неоднородных частиц должны быть определены для скоростей соударения, имеющих место при скоростях сдвига в гравитационном потоке. Установлено [31], что при скоростях соударения частиц, характерных для быстрых гравитационных течений, особенно ярко проявляется зависимость коэффициентов восстановления при ударе от шероховатости их поверхности.

Сравнительная оценка степени влияния различия частиц по отдельным физико-механическим параметрам на интенсивность миграции в соответствии с выражением (1.8), позволяет сделать вывод об отсутствии доминирующего влияния на кинетику процесса различия частиц по размеру. В равной степени на интенсивность миграции влияют различия частиц по плотности, упругости и шероховатости. Такой вывод представляется чрезвычайно важным в технологическом аспекте, поскольку позволяет определить технологические возможности совокупности эффектов разделения неоднородных частиц в гравитационном потоке вследствие их сегрегации и миграции.

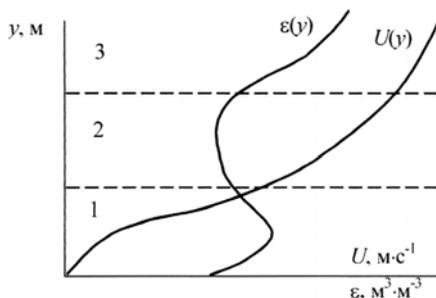
## **5.2. КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ СЕГРЕГАЦИИ И МИГРАЦИИ В БЫСТРОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТОКЕ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ СЕПАРАЦИИ ЧАСТИЦ, РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ПО КОМПЛЕКСУ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Анализ кинетических закономерностей эффектов сегрегации и миграции в быстром гравитационном потоке неоднородных зернистых материалов, проведенный в предыдущем разделе главы, позволил про-

вести оценку технологических аспектов названных эффектов. В частности, установлено, что благоприятными условиями для сегрегации являются высокие значения скорости сдвига и концентрации частиц, а доминирующее значение для эффекта разделения имеет различие частиц по размеру. Напротив, благоприятные условия для миграции создаются при высоких значениях порозности и ее градиентов в потоке, а эффект разделения неоднородных частиц проявляется без доминирующего влияния на него различия частиц по размеру.

Таким образом, принимая во внимание характерные особенности типовых профилей скорости и порозности в быстром сдвиговом гравитационном потоке на шероховатом скате (см. главу 3 и рис. 5.1), можно сделать вывод о формировании благоприятных условий для проявления сегрегации в центральной области потока и для доминирования миграции – в периферийных его частях, прилегающих к открытой поверхности и к основанию слоя.

Вследствие этого в центральной области потока (область 2 на рис. 5.1) взаимодействие частиц сопровождается их разделением преимущественно по размеру (калибровкой) с перемещением крупных частиц в верхнюю, а мелких – в нижнюю часть слоя. Откалиброванные по размеру частицы в периферийных верхней и нижней частях слоя разделяются при взаимодействии в соответствии с механизмом миграции по плотности, шероховатости и упругости. При этом частицы, приобретающие при взаимодействии относительно малые скорости хаотических перемещений (плотные, шероховатые и малоупругие частицы), мигрируют в центральную область потока. Частицы же с противоположными свойствами (менее плотные, более гладкие и упругие), имеющие относительно высокие скорости флуктуаций, мигрируют в направлении от центральной области к основанию и открытой поверхности потока.



**Рис. 5.1. Профили скорости  $U(y)$  и порозности  $\varepsilon(y)$  в быстром гравитационном потоке зернистого материала**

В результате происходит обогащение центральной части потока плотными, шероховатыми и малоупругими частицами, крупные из которых располагаются над мелкими. Менее плотные, более гладкие и упругие частицы концентрируются в периферийных областях потока, причем крупные из них оказываются сосредоточенными у открытой поверхности слоя, а мелкие – у его основания. Таким образом, при комплексном проявлении эффектов сегрегации и миграции неоднородные по размеру частицы сепарируются в быстром гравитационном потоке по плотности, шероховатости и упругости.

Однако эффекты разделения (сегрегации и миграции) частиц в сдвиговом потоке сопровождаются их квазидиффузионным перемешиванием, которое препятствует достижению абсолютных значений эффективности разделения. Для достижения технологически значимых показателей эффективности разделения зернистых материалов предложена [2] технология многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц. В соответствии с этой технологией на поверхности шероховатого ската формируется быстрый гравитационный поток с параметрами течения, аналогичными с изображенными на рис. 5.1. Параметры течения способствуют проявлению эффектов сегрегации и миграции с образованием областей преимущественного концентрирования неоднородных частиц.

Вдоль порога ссыпания шероховатого ската формируется ряд ступеней сепарации. На каждой ступени поток ссыпающихся частиц разделяется по высоте на три части, соответствующие областям 1 – 3 потока (рис. 5.1). Эти части потока, обогащенные частицами с различной плотностью, шероховатостью и упругостью перемещают вдоль ссыпного порога ската на смежные ступени сепарации при противоточном перемещении центральной и периферийных частей (рис. 5.2). На смежных ступенях сепарации перемещенные части потока участвуют в формировании гравитационного потока, вновь организуемого на скате. Здесь, как и на соседних ступенях сепарации, гравитационное течение сопровождается проявлением эффектов сегрегации и миграции с образованием аналогичных областей преимущественного концентрирования неоднородных частиц. Потоки ссыпающегося со ската материала разделяется по высоте на три части в соответствии с областями концентрирования неоднородных частиц, которые перемещаются противоточно на смежные ступени сепарации.

Таким образом, на множестве ступеней сепарации организуется противоточное перемещение потоков зернистого материала, которые при контакте друг с другом обмениваются неоднородными частицами.

В результате, каждый из потоков при переходе от ступени к ступени обогащается частицами определенного свойства, концентрация которых достигает предельных значений у торцевых кромок шероховатого ската.

Технология многоступенчатой сепарации при комплексном использовании эффектов сегрегации и миграции позволяет осуществлять процесс сепарации частиц неоднородного размера по плотности, шероховатости и упругости. Такого рода технологические задачи имеют достаточно широкое распространение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. В частности, представленная технология использована для выделения концентрата силикомарганца из шлаков электрометаллургического производства, семенного зерна злаковых культур с наиболее высокой биологической активностью из зернового вороха, очистки и калибровки семян мелкосеменных овощных культур.

***Выделение немагнитного металлоконцентрата из шлаков металлургического производства.*** Шлаки, получаемые в процессе металлургического производства, утилизируют после их охлаждения, измельчения, разделения на фракции (5...10; 10...20; 20...40 и 40...70 мм) и извлечения металлоконцентрата, используя в качестве строительного щебня. Особую проблему при этом представляет выделение немагнитных металлоконцентратов (ферросплавов, цветных металлов) из крупных (20...70 мм) фракций щебня. Среди традиционных методов наиболее технологичным методом выделения такого концентрата следует признать отсадку узких фракций щебня в воде. Однако, с учетом региональных природных условий, использование метода связано с большими капитальными затратами. В связи с этим, для выделения металлоконцентрата целесообразно использовать методы сухой сепарации. Этот вывод подтверждается результатами промышленного внедрения предложенной технологии многоступенчатой сепарации зернистых материалов по плотности с использованием эффектов сегрегации и миграции в быстром гравитационном потоке на шероховатом скате.

Технология многоступенчатой сепарации при комплексном использовании эффектов сегрегации и миграции реализована на базе аппарата с вращающимся барабаном. При этом барабан, снабженный подъемными лопастями, выполняет функцию дозатора, формирующего быстрый гравитационный поток зернистого материала на шероховатом скате, который устанавливается неподвижно под поднимающимися лопастями барабана. Расположение ската в барабане и скорость

вращения последнего определяются исходя из необходимости достижения регламентных параметров течения материала, обеспечивающих комплексное проявление эффектов сегрегации (в центральной части слоя) и миграции (в периферийных частях слоя).

Под действием эффекта сегрегации частицы шлака разделяются преимущественно по размеру с перемещением крупных частиц в направлении открытой поверхности слоя, а мелких – в направлении основания слоя. В периферийных частях слоя под действием эффекта миграции частицы, относительно выровненные по размеру, разделяются по плотности. При этом более плотные частицы металлоконцентрата мигрируют в направлении градиентов концентрации твердой фазы, которые направлены навстречу другу вблизи открытой поверхности слоя и у его основания. В результате этого центральная часть потока, имеющая наиболее высокую концентрацию твердой фазы, обогащается металлоконцентратом, в то время как частицы шлака, не содержащие металлоконцентрат, концентрируются в периферийных частях слоя.

В целях усиления эффектов сегрегации и миграции используется принцип многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц. Для реализации принципа под нижней кромкой ската установлены три параллельными продольными рядами отклоняющие элементы. Отклоняющие элементы первого и третьего рядов направлены к одному из торцов барабана и предназначены для продольного перемещения падающих со ската частиц из периферийных частей слоя. В центральном ряду отклоняющие элементы направлены в противоположную сторону и предназначены для транспортирования частиц, падающих со ската из центральной части слоя. Загрузка исходного материала осуществляется в центральную часть барабана.

Совокупность смежных элементов, принадлежащих различным рядам, и соответствующая им часть шероховатого ската образуют ступень сепарации. В итоге по длине барабана формируется некоторое число ступеней сепарации, через которые навстречу друг другу перемещаются потоки материала. Один из потоков при переходе от ступени обогащается металлоконцентратом, а из другого – металлоконцентрат исчерпывается. Наиболее высокое содержание металлоконцентрата достигается у торца барабана, в направлении которого осуществляется многоступенчатое перемещение центральной части скатывающегося слоя частиц. Минимальное содержание металлоконцентрата наблюдается у противоположного торца барабана, в направлении

которого отклоняющимися элементами перемещаются частицы из периферийных частей слоя скатывающихся частиц.

Промышленное испытание барабанного сепаратора металлоконцентрата в производстве щебня из шлаков силикомарганца позволило установить достаточно высокие показатели его эффективности. При использовании сепаратора для выделения металлоконцентрата из крупных фракций шлака (20...70 мм), содержащих около 8% массовых силикомарганца, получен металлоконцентрат с концентрацией металла, превышающей 75%, и выходом целевого продукта, достигающим 95%.

***Выделение семян сельскохозяйственных культур с повышенной биологической ценностью.*** Одним из важнейших условий повышения урожайности зерновых культур является повышение качества семенного фонда. В сельском хозяйстве существует проблема выделения качественного посевного материала для воспроизводства зерновых, крупяных, бобовых, масличных и технических культур. Достаточно сказать, что по данным Госсеминаспекции низкое качество семян приводит к недобору урожая в среднем на 20...25% и становится причиной избыточных энерго- и трудозатрат.

Одной из важнейших характеристик качества семян является масса тысячи зерен. Целевая фракция продукта должна содержать наиболее вызревшие (выполненные) семена с наибольшей массой тысячи зерен, которые характеризуются высокими показателями всхожести и энергии прорастания [69]. В соответствии с традиционными технологиями на первой стадии подготовки семенного материала исходное сырье разделяют ситовым методом на определенное число фракций по размеру частиц и затем выделяют семенную фракцию путем сепарирования фракционированного зерна по плотности с использованием методов пневмо- или пневмо-вибросепарации. Такая поэтапная подготовка материала сопровождается потерями целевой фракции и травмированием семенного зерна, снижающими класс его посевного стандарта.

Изложенная ситуация указывает на актуальность разработки технологии подготовки семян путем одновременной калибровки зерна по размеру и плотности при минимальной его травмируемости с целью выделения посевного материала с повышенными показателями всхожести и энергии прорастания [69, 70]. В предыдущем параграфе изложена технология многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц, основанная на комплексном использовании эффектов сегрегации и миграции в быстром гравитационном потоке. Соглас-

но приведенному примеру реализации технологии последняя обеспечивает возможность разделения смесей материалов различной плотности, состоящих из неоднородных по размеру частиц. Технология учитывает, что при комплексном воздействии сегрегации и миграции плотные частицы концентрируются в центральной части гравитационного потока на шероховатом скате (рис. 5.1).

В аспекте решения проблемы выделения семенного материала с наибольшей массой тысячи зерен важно обратить внимание на то, что в центральной части потока формируются условия, благоприятные для проявления эффекта сегрегации. Под действием сегрегации плотные частицы центральной части потока разделяются преимущественно по размеру, в результате чего самые крупные плотные частицы дислоцируются над плотными мелкими. Вследствие этого частицы с наибольшей массой концентрируются в центральной части быстрого гравитационного потока вблизи ее границы с верхней периферийной частью потока.

Таким образом, изложенная в разделе 5,1 технология после ее адаптации может быть использована для выделения семенной фракции с наибольшей массой тысячи зерен. Адаптация предполагает определение условий гравитационного течения зерна по шероховатому скату, при которых обеспечивается интенсивное концентрирование частиц с наибольшей массой в зоне, прилегающей к верхней, неоднородной по структуре части потока.

Технология многоступенчатой сепарации зерна с его калибровкой одновременно по размеру и плотности реализована в аппарате с вращающимся барабаном, устройство и принцип действия которого формально аналогичны с изложенными для сепаратора металлоконцентрата (раздел 5.1). Единственным отличием реализации ранее изложенной технологии для решения задачи выделения наиболее продуктивных семян является специфическое перераспределение характерных частей гравитационного потока для их противоточного многоступенчатого перемещения в сепараторе. В связи с необходимостью выделения фракции наиболее крупных и плотных частиц отбор частиц в целевую фракцию (в центральный ряд отклоняющих элементов) осуществляется из зоны потока, расположенной в центральной его части вблизи границы с верхней разрыхленной частью потока.

Технология обеспечивает оперативную возможность выделения семенной фракции наиболее высокого качества при калибровке семян одновременно по размеру и плотности в быстром гравитационном потоке. При этом предельно снижаются потери сильных (наиболее

продуктивных) семян на стадии фракционирования и практически исключается травмируемость зерна.

Апробация технологии на базе аппарата с вращающимся барабаном диаметром 1,2 м производительностью 2500 кгчас<sup>-1</sup> полностью подтверждает приведенную ее характеристику. Установлено, что использование описанной технологии позволяет выделить семена злаков (ячменя, пшеницы и др.), показатели качества которых существенно превышают аналогичные показатели для семян, полученных по традиционной технологии. В частности, с применением предложенной технологии представляется возможным увеличить массу тысячи зерен семенного зерна с 43 до 47 г и повысить всхожесть семян с 93 до 98%.

***Подготовка зернового сырья пивоваренного производства с повышенной экстрактивностью.*** Важнейшим показателем качества пивоваренного зерна является его экстрактивность. Под экстрактивностью понимают долю сухих веществ, способных перейти из размоленного зерна в водный раствор в результате ферментализации под действием ферментов, содержащихся в солоде. Высокое содержание экстрактивных веществ в пивоваренном ячмене позволяет получить сусло с высокой плотностью, что обеспечивает либо повышение качества пива, либо более высокий его выход [71]. Экстрактивность зерна зависит, в основном, от содержания в нем крахмала, который переходит после гидролиза в водный раствор, и непосредственно определяет качество пива и его сортовую принадлежность. В связи с изложенным, в пивоваренных производствах особое внимание уделяется способам повышения экстрактивности, как одного из важнейших показателей качества зернового сырья.

Высокие показатели экстрактивности пивоваренного солода достигается путем использования передовых агротехнических приемов выращивания сортового ячменя. Среди агротехнических факторов, непосредственно влияющих на экстрактивность пивоваренного ячменя, основными являются густота посева, климатические условия и внесение удобрений [72].

Большое число исследований, например, [73, 74], подтверждают наличие существенной зависимости экстрактивности солода от физико-механических свойств исходного зернового сырья. Установлено, что экстрактивность прямо коррелируется с размером и плотностью зерен ячменя. Это обстоятельство указывает на целесообразность использования в качестве комплексного показателя технологических свойств пивоваренного зерна массу 1000 зерен. Чем больше масса зерна, тем больше содержание в нем питательных веществ и тем

в большей степени в составе зерна доминирует эндосперм. Вследствие этого, зерно с наибольшей массой имеет более высокие технологические свойства при использовании его в пивоваренном производстве.

Выделение зерна с наибольшей массой с использованием традиционной пневмоситовой сепарации осуществляется путем двухстадийного фракционирования зернового сырья по размеру и плотности. Такая технология приводит к снижению выхода целевой фракции и травмированию зерна, особенно на стадии его виброситовой сепарации. Названных недостатков во многом лишена технология многоступенчатой сепарации зернистых материалов одновременно по размеру и плотности (массе), изложенная в разделе 5.1. Разделение частиц по массе осуществляется в быстром сдвиговом гравитационном потоке зернистого материала на шероховатом скате при комплексном использовании физических эффектов сегрегации и миграции на шероховатом скате, являющихся результатом взаимодействия неоднородных частиц. Последнее условие во многом способствует снижению травмируемости зерна при его сепарации. Исследования показывают, что сегрегация доминирует в условиях высокой концентрации частиц и приводит к их разделению преимущественно по размеру [36]. Миграция же проявляется в большей степени в условиях низкой концентрации частиц [31] и сопровождается их разделением по плотности и другим свойствам (без доминирования размера). С учетом этого для разделения зерна одновременно по размеру и плотности в потоке материала на шероховатом скате создают [75, 76] условия, при которых сопрягаются эффекты сегрегации и миграции. Технологическое использование названных эффектов становится возможным на основе принципов управления сегрегированными технологическими потоками [77, 78].

Для выделения из зернового сырья (ячмень сорта «Гонар») фракции с наиболее высокой массой тысячи зерен в работе [74] использован принцип многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц, который реализован в аппарате с вращающимся барабаном [79, 80]. Установлено, что выделенная фракция превосходит исходное сырье по всем показателям, регламентируемым для пивоваренного ячменя. С увеличением массы зерна на 14,7% наблюдается повышение энергии прорастания на 1,7%, всхожести на 1,8% и экстрактивности на 20,4%. Таким образом, фракционирование зерна одновременно по размеру и плотности позволяет либо обеспечить выполнение регламентных требований по качеству пивоваренного сырья, либо снизить нормы его расхода на производство пива заданного качества.

**Калибровка и очистка семян мелкосеменных овощных культур.** Анализ литературы [70, 81] позволяет сделать вывод об актуальности научного поиска эффективных решений по организации процессов очистки и калибровки семян мелкосеменных овощных культур. Семена таких культур представляют собой мелкозернистые среды, которые во многих случаях характеризуются значительными эффектами связности частиц. Это свойство в совокупности с неправильной формой частиц, большим диапазоном изменения их размера и плотности, большим содержанием трудноотделимых примесей, в том числе семян карантинных растений, во многих случаях не позволяет обеспечить необходимые показатели качества семян с использованием традиционных методов и технических средств организации процессов очистки и калибровки. В связи с этим, актуальной является задача разработки технологий и оборудования для тонкой очистки и калибровки семян мелкосеменных культур с использованием редко применяемых и малоизученных физических эффектов. Это подтверждается экспертной оценкой состояния развития аграрной науки в России [70]: «в стране засилье сортов и семян овощных культур иностранной селекции. А причина кроется в том, что у нас нет системы семеноводства, полностью отсутствует техника для уборки и подготовки семян».

Результаты исследований [24, 75] свидетельствуют о перспективах использования для очистки и калибровки семян мелкосеменных культур физических эффектов сегрегации и миграции в быстром гравитационном потоке зернистого материала на шероховатом скате. Перспективы связаны с принципиально различными физическими и кинетическими закономерностями названных физических эффектов.

Сегрегация является следствием гравитационного сдвига, когда в процессе взаимного сдвигового перемещения частиц формируются условия для их поперечного перемещения. В случае однородных частиц вероятность их поперечного перемещения в альтернативных направлениях одинакова. Вероятность же поперечного перемещения неоднородных частиц в том или ином направлении зависит от комплекса их отличительных физико-механических свойств, которые прямо влияют на величину движущей силы сегрегации. В соответствии с механизмом сдвигового поточного разделения, изложенным в разделе 1.3, движущей силой сегрегации является суммарный избыточный (положительный или отрицательный) момент сил тяжести, трения и ударных импульсов, действующих на частицу контрольного

компонента со стороны частиц сдвигового потока. Если избыточный момент имеет положительное значение, например, для крупной частицы, то частица перемещается в направлении, обратном направлению силы тяжести. В случае отрицательного избыточного момента сил, например, для мелкой частицы, частица перемещается в направлении силы тяжести. Доминирующим отличительным признаком при сегрегации является размер частиц. Это свойство сегрегации указывает на целесообразность использования ее эффекта для организации процесса калибровки по размеру.

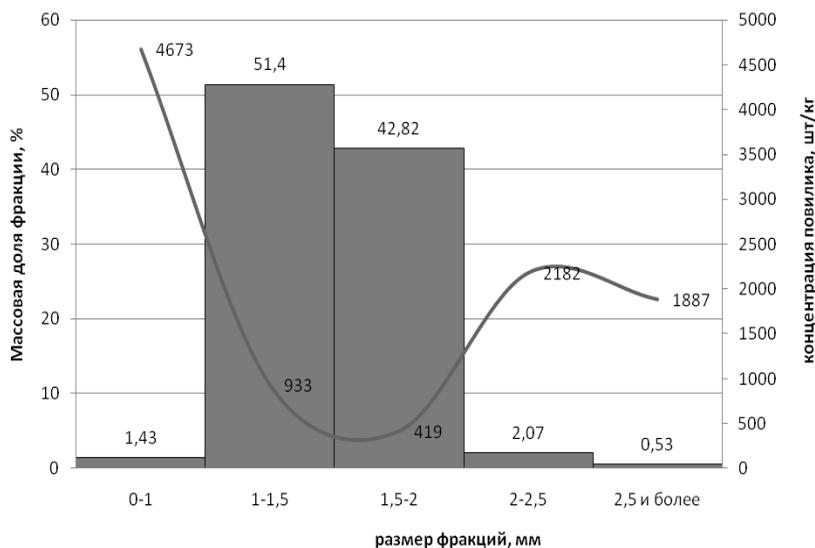
Эффект миграции по своей сути является квазидиффузионным разделением частиц, приобретающих при взаимных столкновениях различные скорости хаотических перемещений. Необходимым условием для миграции является наличие градиента среднего расстояния между частицами, например, вследствие градиента концентрации твердой фазы или порозности. Частицы с высокими скоростями флуктуаций (мелкие, менее плотные, гладкие и упругие) перемещаются в области потока, имеющие высокую порозность. Напротив, частицы с низкими скоростями флуктуаций (крупные, плотные, шероховатые и малоупругие) мигрируют в направлении областей потока с высокой концентрацией твердой фазой. Миграция протекает без доминирующего влияния на скорость процесса размера частиц. Однако, масса частиц, как очевидная корреляция с их размером и плотностью, является одним из наиболее значимых отличительных признаков частиц в процессе их миграции. В таком случае, процесс миграции в потоке выровненных по размеру частиц будет сопровождаться их разделением по комплексу физико-механических свойств (плотности, шероховатости, упругости).

Одной из овощных культур, производство семян которой остро нуждается в совершенствовании технологии, является морковь. Ее семена имеют неправильную форму, характеризуются высокой связностью частиц, неоднородностью размера, плотности и большим содержанием семян трудноотделимых сорных, в том числе карантинных растений. Наибольшую проблему при подготовке семян моркови представляет их очистка от семян повилики, которая является карантинным растением. В случае высокой засоренности семенного материала достижение необходимых показателей качества семян с использованием традиционных методов и технических средств для очистки и калибровки оказывается чрезвычайно проблематичным. Такая ситуация инициирует поиск малоизученных и малоприменяемых физиче-

ских эффектов для организации процессов разделения неоднородных частиц. К такого рода эффектам относятся эффекты разделения, возникающие при взаимодействии частиц (сегрегации и миграции) в сдвиговом потоке семян.

Кинетические закономерности эффектов сегрегации и миграции, изложенные в разделе 1.2, позволяет предположить, что комплексное использование эффектов обеспечит возможность сепарации семян по комплексу физико-механических свойств, а также для их калибровки одновременно по размеру и плотности с выделением семенного материала с наибольшей массой тысячи зерен.

Результаты исследования фракционного и компонентного состава исходного семенного материала (морковь сорта «Роте Ризен») методом ситового анализа с использованием стандартного набора сит с круглыми отверстиями свидетельствуют (рис. 5.2) о чрезвычайно сложном составе смеси. Смесь характеризуется широким диапазоном размеров семян целевого компонента, совпадающим с таковым для карантинного растения. Это свойство смеси с учетом отсутствия различия плотности ее компонентов позволяет отнести ее к категории трудносепарируемых смесей.



**Рис. 5.2. Гистограмма фракционного состава семян с распределением концентрации повилика**

В связи с этим, для решения технологической задачи – полного исключения из семенного материала семян карантинного растения – с использованием технологии многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц на базе эффектов сегрегации и миграции необходима предварительная калибровка семян. Принимая во внимание неправильную форму частиц и высокую ее неоднородность (длины, ширины, толщины) для калибровки смеси целесообразно воспользоваться возможностями названной технологии при ее реализации с использованием эффекта сегрегации.

Для организации процесса калибровки использована технология многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц «Мультисег» [2]. Смысл предложенной технологии заключается в подаче исходной смеси частиц на шероховатый наклонный скат, установленный под углом, близким углу естественного откоса материала. Угол ската и удельный расход материала задаются из условия достижения интенсивного сдвига, высокой концентрации твердой фазы и ее однородного распределения по высоте слоя. Подача исходной смеси осуществляется в центральной части ската между его торцевыми кромками. На скате образуются быстрый сдвиговый гравитационный поток с максимальной скоростью у открытой его поверхности и минимальной – у основания. Взаимодействие частиц в сдвиговом потоке с такого рода характеристиками сопровождается эффектом сегрегации с разделением частиц преимущественно по размеру. В результате сегрегации крупные частицы перемещаются к открытой поверхности слоя, а мелкие – к его основанию.

В соответствии с технологией «Мультисег» для организации процесса калибровки (фракционирования) вдоль кромки ссыпания ската формируется некоторое число ступеней сепарации. На каждой ступени поток частиц, покидающих скат, разделяется по высоте слоя на две части, которые противоточно перемещаются на соседние ступени сепарации. На каждой такой ступени противоточно перемещенные потоки смешиваются и транспортируются на соответствующий участок шероховатого ската. Здесь предварительно сепарированная смесь подвергается повторной сепарации, а продукты разделения перемещаются противоточно на смежные ступени сепарации. Каждый из встречных потоков при переходе от ступени к ступени обогащается частицами соответствующего размера. Максимальная концентрация однородных по размеру частиц достигается вблизи торцевых кромок ската.

Описанная технология реализована на базе аппарата с вращающимся барабаном, снабженным подъемными лопастями. Детальный анализ геометрических характеристик семян во фракциях, полученных в результате калибровки, свидетельствует, что калибровка семян в сдвиговом гравитационном потоке с использованием эффекта сегрегации обеспечивает достижение технологически важных результатов. Семена целевого компонента, имеющие неправильную форму, калибруются одновременно по комплексу геометрических параметров: длине, ширине и толщине, что позволяет с наименьшими потерями выделить наиболее ценную его фракцию.

При решении аналогичной задачи традиционным путем требуется последовательное использование круглого сита для калибровки по ширине, щелевого сита для калибровки по толщине и триера для калибровки по длине. Такая поэтапная обработка семян сопровождается потерей ценного семенного материала и его интенсивной травмируемостью.

Технологические возможности использования технологии многоступенчатой сепарации (сегрегации) для организации процесса калибровки семян по размеру продемонстрированы на рис. 5.3. На рисунке представлена функция продольного распределения приведенного (обобщенного) размера семян моркови по ступеням сепарации (длине барабана). Приведенный размер семян определялся как корень кубический из произведения их осредненных линейных размеров.

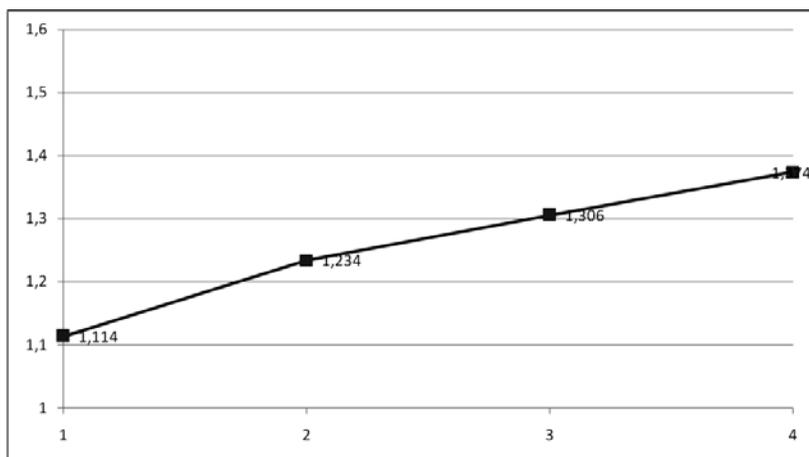
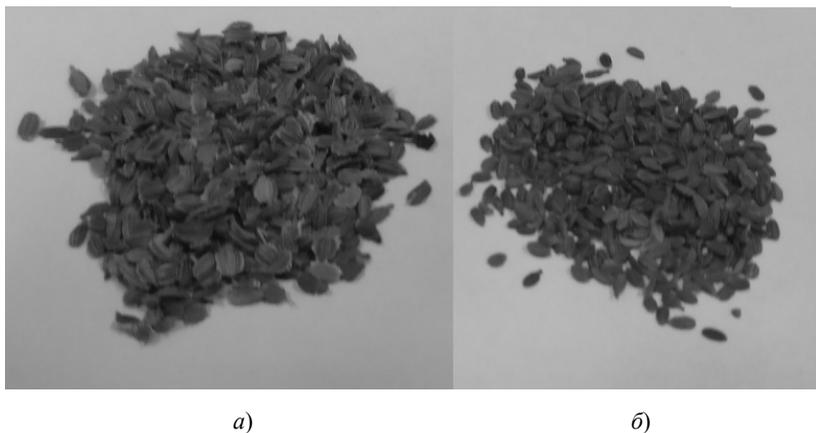


Рис. 5.3. Продольное распределение семян моркови по размеру в барабане

Таким образом, приведенный размер прямо коррелируется с объемом семян и в определенной степени косвенно отражает их биологическую ценность. Важно отметить, что представленный на рис. 5.3 результат свидетельствует о возможности использования метода многоступенчатой сепарации для организации процесса фракционирования семян неправильной формы на более чем две фракции.

Гистограммы распределений частиц по размерам в крупной и мелкой фракциях калиброванного семенного материала, полученные методом ситового анализа на ситах с круглыми отверстиями, показывают, что средний размер частиц в названных фракциях различается в 1,5 раза (рис. 5.4). Аналогичное соотношение наблюдается и для среднего значения массы тысячи зерен во фракциях (1,2 и 0,8 г). Семена карантинного растения распределились в крупной и мелкой фракциях семенного материала примерно в равных долях и в соответствии с симметричным их распределением в исходном семенном материале (рис. 5.2).

Для организации процесса сепарации крупной и мелкой фракций семенного материала с целью их очистки от семян карантинного растения комплексно использованы эффекты сегрегации и миграции. Благоприятные условия для комплексного проявления эффектов сегрегации и миграции обеспечиваются в быстром гравитационном потоке на шероховатом вибрирующем скате в соответствии с результатами исследования, представленными в главе 4.



**Рис. 5.4. Крупная и мелкая фракции семян моркови после калибровки с использованием эффекта сегрегации**

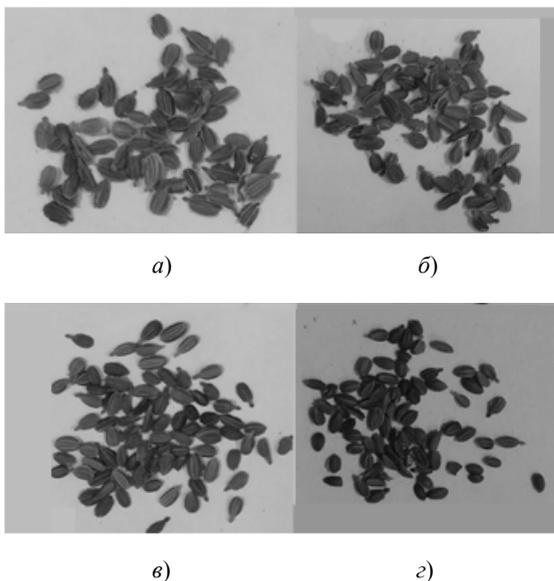
Сущность предложенной технологии заключается в подаче исходной смеси частиц на шероховатый наклонный скат, установленный под углом, близким углу естественного откоса материала. Угол ската, удельный расход материала и параметры вибрации задаются из условия достижения в потоке интенсивного сдвига, высокой концентрации твердой фазы в центральной части слоя и высоких градиентов концентрации в его периферийных частях (рис. 5.1). Подача исходной смеси осуществляется в центральной части ската между его торцевыми кромками. Взаимодействие частиц в центральной части потока сопровождается эффектом сегрегации с разделением частиц преимущественно по размеру. В результате сегрегации крупные частицы перемещаются к открытой поверхности слоя, а мелкие – к его основанию. В периферийных частях слоя взаимодействие частиц сопровождается эффектом миграции, приводящим к разделению крупных частиц в верхней части и мелких частиц в нижней части слоя по комплексу свойств. При этом частицы, приобретающие при взаимных столкновениях низкие скорости флуктуаций, мигрируют в центральную часть слоя, а частицы, имеющие высокие скорости флуктуаций, концентрируются в периферийных частях слоя.

В соответствии с технологией многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц для организации процесса сепарации (очистки) вдоль кромки сыпания ската формируется некоторое число ступеней сепарации. На каждой ступени поток частиц, покидающих скат, разделяется по высоте слоя на три части. Центральную часть слоя и его периферийные части противоточно перемещают на соседние ступени сепарации, на которых они возвращается на шероховатый скат. Здесь материал после скатывания подвергается повторной сепарации, с противоточным перемещением сепарированных частей по уже описанной схеме. Каждый из встречных потоков при переходе от ступени к ступени обогащается частицами того или иного компонента смеси. Максимальная концентрация компонентов достигается у торцевых кромок ската.

Технология сепарации семян моркови, основанная на комплексном использовании эффектов сегрегации и миграции, реализована в барабане вибросепараторе (рис. 5.5). Полученные в результате калибровки крупная и мелкая фракции семенного материала подвергнуты процессу сепарации с разделением каждой из них в соотношении 1:1. В результате получены четыре фракции семенного материала, которые существенно отличаются друг от друга по массе частиц (рис. 5.6).



**Рис. 5.5. Опытный образец промышленного аппарата вибросепаратора**



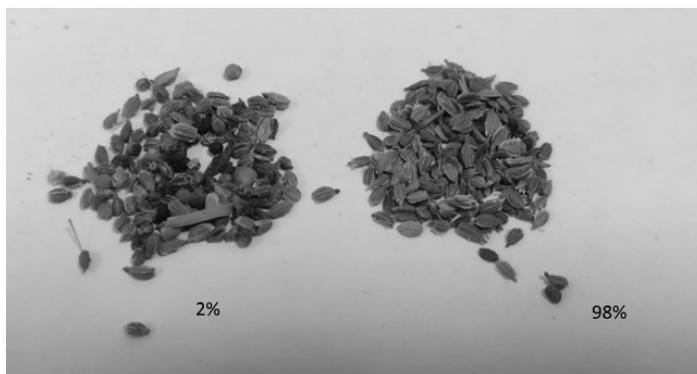
**Рис. 5.6. Продукты сепарации откалиброванных по размеру крупной и мелкой фракций семян моркови:**

*a* – крупные тяжелые; *б* – крупные легкие; *в* – мелкие тяжелые;  
*г* – мелкие легкие

Детальный анализ геометрических и физико-механических характеристик семян во фракциях свидетельствует, что калибровка семян с использованием эффектов сегрегации иммиграции в сдвиговом гравитационном потоке на шероховатом вибрирующем скате обеспечивает достижение технологически важных результатов. Семена целевого компонента, имеющие неправильную форму, калибруются одновременно по размеру и плотности, что позволяет с наименьшими потерями выделить семенную фракцию, имеющую наиболее высокую биологическую ценность.

На основе визуальной информации (рис. 5.6) и результатов анализа характеристик продуктов сепарации откалиброванного семенного материала сделан вывод о высокой аналогии свойств крупной легкой ( $\beta$ ) и мелкой тяжелой ( $\epsilon$ ) фракций. В названных фракциях семена имеют примерно одинаковую массу 1000 зерен (0,8...0,9 г) при содержании семян карантинного растения 300...450 кг<sup>-1</sup>. Анализ фракционного состава названных фракций, проведенный с использованием стандартного набора сит с круглыми отверстиями, свидетельствует об абсолютном доминировании в составе фракций частиц с размерами +1,0...1,5 мм (95...100%). Аналогия распространяется также и на распределения семян во фракциях по толщине. Толщина рассматривается при этом как ключевой геометрический параметр семян, обеспечивающий возможность их отделения от семян карантинного растения по форме с использованием ситовой классификации. Указанная аналогия свойств крупной легкой и мелкой тяжелой фракций является основанием для их объединения и формирования на их основе единой фракции семян. Таким образом, сепарация обеспечивает возможность получения из ранее откалиброванных по размеру фракций семенного материала трех фракций семян с существенным различием по массе тысячи зерен (1,6; 0,9 и 0,7 г). Содержание семян карантинного растения в этих фракциях изменяется от 300 кг<sup>-1</sup> (во фракции с массой 1000 зерен 0,9 г) до 1600 кг<sup>-1</sup> (во фракции с массой 1000 зерен 0,7 г).

Исследование состава и свойств мелкой легкой фракции семян (фракция  $\epsilon$ ) на рис. 5.6) свидетельствует об их низком качестве, не соответствующем требованиям ГОСТ на классные семена по большинству важнейших параметров. В первую очередь это относится к низкой массе тысячи зерен (0,7 г) и большому содержанию пылевидной фракции, колотых, обрушенных семян (более 20%) и семян карантинного растения (1500...1600 шт/кг). Перечисленные свойства указывают на целесообразность утилизации этой фракции как отходов производства.



**Рис. 5.7. Крупная тяжелая фракция семян моркови (масса 1000 зерен 1,6 г) и ее отходы (2%) после классификации на сите 1,2×20**

Визуальное исследование параметров семян целевой культуры и карантинного растения в товарных фракциях семенного материала позволило установить, что в каждой из товарных фракций толщина семян моркови меньше толщины семян повилики. Этот отличительный признак позволяет отделить семена карантинного растения сходом с сита, величина щелевых отверстий в котором больше толщины семян моркови, но меньше толщины семян повилики. Эффективность этого варианта очистки подтверждена экспериментально для фракции семян с наибольшей массой тысячи зерен. Использование в этом случае стандартного сита с щелевыми отверстиями 1,2×20 мм позволило полностью отделить семена карантинного растения с выходом семян целевой культуры, достигающим 98% (рис. 5.7). Содержание семян повилики, в отходах достигло значений 27 000 кг<sup>-1</sup>.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

Проанализированы кинетические закономерности эффектов сегрегации и миграции в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов в аспекте зависимости кинетики от физико-механических свойств частиц. Вследствие принципиального отличия физической природы сегрегации и миграции как эффектов гидромеханического и квазидиффузионного разделения, соответственно, обнаруживается различная степень влияния неоднородности частиц по тому или иному свойству (размеру, плотности, шероховатости, упругости) на скорость протекания эффектов разделения. В связи с названными отличиями

комплексное технологическое использование эффектов обеспечивает разработку технических решений с оригинальными технологическими возможностями при организации процессов переработки, сыпучих материалов методом разделения.

Достижение высоких значений движущей силы сегрегации возможно путем увеличения скорости сдвига при ограниченном росте порозности в гравитационном потоке материала. Ограничение роста порозности возможно обеспечить путем «полевого» воздействия, препятствующего дилатансии гравитационного потока (гидродинамических сил поперечно фильтруемого потока, вибрации, электромагнитного поля и др.). Доминирующее влияние на интенсивность сегрегации оказывает различие частиц по размеру. Это обстоятельство указывает на целесообразность использования эффекта сегрегации для организации процессов калибровки и фракционирования зернистых материалов. При этом особые перспективы открываются при использовании такого рода процессов для обработки материалов, частицы которых имеют неправильную форму.

Эффект миграции, обусловленный взаимной квазидиффузией неоднородных частиц, проявляется при условии структурной неоднородности сдвигового потока. Для интенсификации миграции необходимо формировать гравитационный поток с высокими градиентами порозности в большей его части. Эффективными способами преобразования структурных характеристик гравитационных потоков зернистых материалов на шероховатом скате могут быть управляющие воздействия физических полей (гравитационного, гидродинамических сил и вибрации). В равной степени на интенсивность миграции влияют различия частиц по размеру, плотности, упругости и шероховатости.

Характер зависимости кинетики сегрегации и миграции от физико-механических свойств частиц указывает на целесообразность комплексного использования эффектов для обработки смесей полидисперсных сыпучих материалов, частицы которых различаются по плотности, шероховатости, упругости. При этом комплексное использование эффектов возможно по одному из альтернативных вариантов организации процесса разделения. При относительно большом различии частиц смеси по размеру целесообразно последовательное поэтапное использование эффектов разделения. Для этого на первом этапе организуют калибровку частиц смеси по размеру с использованием эффекта сегрегации, а на втором – полученные фракции подвергают сепарации для отделения компонентов смеси при комплексном использова-

нии сегрегации и миграции. При относительно небольшом различии частиц по размеру обработка смеси может быть организована в один этап, на котором смесь разделяется в сдвиговом гравитационном потоке при одновременном воздействии на частицы эффектов сегрегации и миграции, протекающих в смежных объемах потока.

Проанализированы технические решения, базирующиеся на комплексном использовании эффектов сегрегации и миграции в гравитационных потоках зернистых материалов, для организации процессов:

- выделения немагнитного металлоконцентрата из шлаков металлургического производства;
- в производстве семян сельскохозяйственных культур с повышенной биологической ценностью;
- калибровки и очистки семян мелкосеменных овощных культур;
- подготовки сырья пивоваренного производства с повышенной экстрактивностью.

Представлены результаты исследования эффективности названных технических решений и их промышленной апробации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В монографии проведен анализ явления сегрегации в сдвиговых потоках и виброоживленных слоях зернистых сред с обсуждением его механизмов и эффектов проявления в технологических процессах. В результате анализа обосновано принципиальное различие физических механизмов сегрегации и миграции. Сегрегация в сдвиговом потоке является результатом гидромеханического взаимодействия частиц в условиях гравитационного воздействия. Миграция является следствием квазидиффузионного хаотического перемещения неоднородных частиц, приобретающих при взаимных столкновениях различные скорости флуктуаций, и может протекать и в отсутствие гравитационного воздействия. Необходимым условием для миграции неоднородных частиц является наличие градиента среднего расстояния между частицами, например вследствие градиента концентрации твердой фазы.

Проанализированы достоинства и недостатки существующих методов математического описания динамики распределения неоднородных частиц в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов и сделан вывод о необходимости учета при моделировании неоднородности структурных и кинематических характеристик сдвигового потока. Допущение о структурной однородности и несжимаемости зернистых сред в гравитационных потоках препятствует разработке адекватных механизмов взаимодействия неоднородных частиц и ограничивает прогностические возможности соответствующих математических моделей динамики сегрегации.

Анализ литературных источников свидетельствует о доминировании одностороннего взгляда на сегрегацию как на явление, сопровождаемое множеством негативных последствий в технологиях, связанных с производством и переработкой зернистых материалов. Традиционное одностороннее восприятие сегрегации в качестве только негативного явления является сдерживающим фактором в развитии способов ее технологического использования для организации гидромеханических и тепломассообменных процессов, протекающих с участием неоднородных зернистых материалов.

Для технологического использования эффектов сегрегации необходима разработка научно обоснованных способов не только подавления сегрегации, но и ее интенсификации на основе анализа кинетиче-

ских закономерностей процесса с учетом движущих сил и сопротивлений в потоках разделения неоднородных частиц. Выполнен анализ кинетических зависимостей сегрегации, соответствующих механизмам протекания процесса в условиях локальной и пространственной неоднородности сдвигового потока зернистой среды. В результате анализа определены механизмы сегрегации частиц и разработанные на их базе математические модели процесса, которые характеризуются необходимыми прогностическими свойствами, определяющими зависимость скорости процесса в зависимости от комплекса физико-механических свойств частиц, структурных и кинематических параметров сдвигового потока. Сделан вывод о целесообразности использования физических полей для управления структурно-кинематическими характеристиками сдвигового потока и, как следствие, эффектами сегрегации. Определены эффекты воздействия на структурные и кинематические параметры сдвигового потока, приводящие к интенсификации сегрегации и миграции.

Приведены результаты исследований эффективности управления структурными и кинематическими характеристиками гравитационных потоков на шероховатом скате и, как следствие, эффектами сегрегации и миграции с использованием поперечной аэрации, гравитационного и вибрационного воздействий. В результате исследования гидродинамики поперечно продуваемого установившегося развитого сдвигового гравитационного течения зернистой среды установлено наличие единой зависимости между относительными величинами угла ската и скорости продувки для различных ее направлений. Установлено, что, в общем случае, интенсивность сегрегации частиц возрастает при продувке потока в направлении от открытой поверхности слоя к его основанию. При этом обнаружено, что для различных смесей частиц наибольший эффект сегрегации наблюдается при одном и том же значении относительной скорости продувки, равной  $w/w_{кр} = 0,45$ . При продувке от основания к открытой поверхности слоя, как правило, интенсифицируется перемешивание частиц. Однако, для частиц, различающихся по плотности, продувка в указанном направлении усиливает разделение, что объясняется не только возрастающим вкладом пневмо-сепарации, но и доминирующей ролью эффекта миграции для такого рода частиц.

Проведен анализ влияния угла наклона шероховатого ската и удельной величины потока (высоты слоя) частиц на структурные и кинематические параметры быстрого гравитационного течения

модельных зернистых материалов и эффекты разделения и перемешивания неоднородных частиц. Определены диапазоны изменения относительных значений угла наклона ската и высоты слоя скатывающихся частиц, при которых обеспечиваются благоприятные условия для сегрегации, миграции и перемешивания.

Методом математического моделирования определены способы воздействия на эффекты разделения частиц по размеру и плотности в быстрых гравитационных потоках зернистых материалов. Установлено, что доминирующим механизмом разделения частиц по плотности является миграция, обусловленная взаимной квазидиффузией частиц в условиях структурной неоднородности потока. Для интенсификации разделения частиц по плотности необходимо повышать структурную неоднородность потока и, напротив, для подавления разделения – обеспечивать условия структурной однородности зернистой среды. Размер частиц является доминирующим отличительным признаком при разделении частиц в соответствии с механизмом сегрегации. Для интенсификации процесса сегрегации необходимо обеспечивать условия интенсивного сдвига при высокой концентрации твердой фазы и однородности ее распределения в потоке.

Проведено экспериментальное и аналитическое исследование влияния виброколебаний на структурные и кинематические характеристики и эффекты разделения неоднородных частиц в быстром гравитационном потоке зернистой среды на шероховатом скате. Установлена взаимосвязь между дилатансией, квазигидростатическим давлением и температурой зернистой среды. Температура зернистой среды определена как составляющая кинетической энергии различных форм взаимных перемещений частиц, обусловленных действием гравитационного сдвига и виброколебаниями ската. Исследовано влияние виброколебаний на микроструктуру быстрого гравитационного потока зернистой среды на шероховатом скате и выявлен принципиально различный эффект низкочастотных и высокочастотных колебаний. Низкочастотные колебания приводят к повышению структурной неоднородности потока с расширением зон, характеризующихся высокими значениями градиентов концентрации твердой фазы, в нижней и верхней частях слоя. Неоднородность микроструктуры гравитационного потока становится причиной инициирования в соответствующих его частях потоков квазидиффузионного разделения (миграции) неоднородных частиц по плотности, шероховатости, упругости и размеру без доминирующего значения последнего. Напротив, в отличие

от низкочастотных колебаний, высокочастотные виброколебания приводят к повышению однородности микроструктуры быстрого гравитационного потока на шероховатом скате при относительно высоких значениях концентрации твердой фазы. В результате, в потоке создаются условия, благоприятные для разделения неоднородных частиц в соответствии с механизмами сегрегации, которая протекает при доминирующем значении различия частиц по размеру.

С учетом специфики эффектов сегрегации и миграции неоднородных частиц в гравитационных потоках зернистых сред проанализированы результаты и перспективы их технологического применения в металлургии, химической промышленности и агропромышленном комплексе.

Проанализированы механизмы и кинетические закономерности эффектов разделения (сегрегации и миграции) в быстрых гравитационных потоках неоднородных зернистых материалов. Определены базовые принципы управления эффектами разделения частиц, различающихся по размеру, плотности шероховатости и упругости, в гравитационных потоках на шероховатом скате. Проанализированы возможности интенсификации эффектов сегрегации и миграции с использованием поперечной аэрации, гравитационного и вибрационного воздействий.

Монография предназначена для научных работников, аспирантов и магистрантов, а также инженерно-технического персонала, специализирующихся в области механики зернистых сред, разрабатывающих технологии и эксплуатирующие оборудование для производства и переработки сыпучих материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Bates, L.** User Guide to Segregation / L. Bates. – British Materials Handling Board, Elsinore house, United Kingdom, 1997. – 134 p.
2. **Долгунин, В. Н.** Сегрегация в зернистых средах: явление и его технологическое применение / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 180 с.
3. **Bridgwater, J.** Interparticle Percolation: Equipment Development and mean Percolation Velocities / J. Bridgwater, M. H. A. M. Cooke, Scott // Trans. I Chem. E. – 1978. – P. 157 – 167.
4. **Brown, R. L.** The Fundamental Principles of Segregation / R. L. Brown // J. Inst. Fuel. – 1939. – V. 13. – P. 15 – 19.
5. **Bagnold, R. A.** Experiments on a Gravity Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear / R. A. Bagnold // Proc. Roy. Soc. – London, 1954. – A 225. P. 49 – 63.
6. **Stephens, D. J.** The Mixing and Segregation Cohesionless Particulate Materials: Part I. Failure Zone Formation ; Part II. Microscopic Mechanisms for Particles Differing in Size / D. J. Stephens, J. Bridgwater // Powder Technology. – 1978. – V. 21. – P. 17 – 44.
7. **Williams, J. C.** Segregation of Powders and Granular Materials / J. C. Williams // Fuel Society Journal. – 1963. – 14. – P. 29 – 34.
8. **Williams, J. C.** The Segregation of Particulate Materials / J. C. Williams // Powder Technology, 15, 1976. – P. 245.
9. **Enstad, G. G.** Segregation of Powders and its Minimization in Kalman H. Ed. / Enstad, G. G. // The 2-nd Israel Conference for Conveying and Handling of Particulate Solid. Proceedings. – Jerusalem, 1997. – P. 11 – 52.
10. **Shinohara, K.** Some Segregation Mechanisms and their Prevention. Proc. Int. Sump. Reliable flow of Particulate Solids / K. Shinohara, G. G. Enstad. – Oslo, 1993. – P. 819.
11. **Shinohara, K.** Mechanism of Density Segregation of Particles in Filling Vessels / K. Shinohara, S. Miyata // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 23(3). – 1984. – P. 423.
12. **Goodman, M. A.** Two Problems in the Gravity Flow of Granular Materials / M. A. Goodman, S. C. Cowin // J. Fluid Mech. – 1971. – 45. – P. 321 – 339.
13. **Savage, S. B.** Granular Flows Down Rough Inclines – Review and Extension / S. B. Savage // Mechanics of Granular Materials. – Elsevier Science Publishers. – Amsterdam, 1983. – P. 261 – 282.
14. **Shen, H. H.** Constitutive Relationships for Fluid-solid Mixture / H. H. Shen, N. L. Ackermann // Div. Eng. Mech. ASCE, 1982. – 108. – P. 748 – 763.
15. **Campbell, C. S.** Computer Simulation of Shear Flows of Granular Materials. In Mechanics of Granular Materials / C. S. Campbell, C. E. Brennen ;

ed. J. T. Jenkins and M. Satake), Elsevier Science Publishers. – Amsterdam, 1983 – P. 313 – 326.

16. **Gidaspow, D.** Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description / D. Gidaspow. – Academic press, San Diego, 1994. – 467 p.

17. **Brennen, C. E.** Fundamentals of Multiphase Flows / C. E. Brennen. – Cambridge University Press, 2005. – 410 p.

18. **Jesuthasan, N.** Use of Particle Tracking Velocimetry for Measurements of Granular Flows: Review and Application / N. Jesuthasan, B. R. Baliga, S. B. Savage // Particle Tracking Velocimetry for Granular Flow Measurements Kona, 2006. – 24. – P. 1 – 9.

19. **Woodhouse, M. J.** Rapid Granular Flow Down Inclined Planar Chutes. Part 2. Linear Stability Analysis of Steady Flow Solutions / M. J. Woodhouse, A. J. Hogg // J. Fluid. Mech. 652. – 2010. – 461.

20. **Windows-Yule, C. R. K.** Numerical Modelling of Granular Flows: a Reality Check / C. R. K. Windows-Yule, D. R. Tunuguntla, D. J. Parker // Computational Particle Mechanics. – 2016. – No. 3(3). – P. 311 – 332.

21. **Khakhar, D. V.** Radial Segregation of Granular Mixtures in Rotating Cylinders / D. V. Khakhar, J. J. McCarthy, J. M. Ottino // Phys. Fluids. – 1997. – 9. – 3600.

22. **Gray, J.** Particle-size Segregation and Diffusive Remixing in Shallow Granular Avalanches / J. Gray, V. A. Chugunov // Journal of Fluid Mechanics. – 2006. – 569. – P. 365 – 398.

23. **Hill, K. M.** Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures / K. M. Hill, Y. Fan // Kona. – 2016. – V. 33. – P. 150 – 168.

24. **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. Tuev // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – 122. – P. 22 – 32.

25. **Experimental Investigation into Segregating Granular Flows Down Chutes** / S. Wiederseiner, N. Andreini, G. Épely-Chauvin, G. Moser, M. Monnerau, J. M. N. T. Gray, C. Ancey // Physics of Fluids. – 2011. – 23. – 013301.

26. **Gray, J.** A Theory for Particle Size Segregation in Shallow Granular Free-surface Flows / J. Gray, A. R. Thornton // Proceedings of the Royal Society of London A. – 2005. – 461(2057). – P. 1447 – 1473.

27. **Tripathi, A.** Density Difference-driven Segregation in a Dense Granular Flow / A. Tripathi, D. V. Khakhar // J. Fluid Mech. – 2013. – 717. – P. 643 – 669.

28. **Modelling Size Segregation of Granular Materials: the Roles of Segregation, Advection and Diffusion** / Y. Fan, C. P. Schlick, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, R. M. Lueptow // J. Fluid Mech. – 2014. – 741. – P. 252 – 279.

29. **Tunuguntla, D. R.** A Mixture Theory for Size and Density Segregation in Shallow Granular Free-surface Flows / D. R. Tunuguntla, O. Bokhove, A. R. Thornton // Journal of Fluid Mechanics. – 2014. – 749. – P. 99 – 112.

30. **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. – 56. – P. 211 – 218.

31. **Dolgunin, V. N.** Segregation Kinetics of Particles with Different Roughness and Elasticity under a Rapid Gravity Flow of a Granular Medium / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2009. – 43(2). – P. 187 – 196.
32. **Fan, Y.** Shear-induced Segregation of Particles by Material Density / Y. Fan, K. M. Hill // *Phys. Rev. E*. – 2015. – 022211.
33. **Hill, K. M.** Segregation in Dense Sheared Flows: Gravity, Temperature Gradients, and Stress Partitioning / K. M. Hill, D. S. Tan // *J. Fluid Mech.* – 756. – 2014. – P. 54 – 88.
34. **Dolgunin, V. N.** Rapid Gravity Flow of a Granular Medium // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2005. – 39(5). – P. 548 – 554.
35. **Dolgunin, V. N.** Modeling the Mixing of Cohesionless Materials when the Flow of Granular Medium Occurs with Plastic Shear Deformations / V. N. Dolgunin, V. Ya. Borshchev, R. A. Shubin // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2007. – V. 43, No. 5-6. – P. 301 – 306.
36. **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. – 40(4). – P. 393 – 404.
37. **Долгунин, В. Н.** Модель механизма сегрегации при быстром гравитационном течении частиц / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов, П. В. Классен // *Теор. основы хим. технол.* – 1992. – Т. 26, № 5. – С. 100 – 109.
38. **Ferziger, J. H.** *Mathematical Theory of Transport Processes in Gases* / J. H. Ferziger, H. G. – Kaper North-Holland Publ., Amsterdam, 1972. – 568 p.
39. **Alonso, M.** Optimum Combination of Size ratio, Density Ratio and Concentration to Minimize Free Surface Segregation / M. Alonso, M. Satoh, K. Miyamoto // *Powder Technology*. – 1991. – 68. – P. 145 – 152.
40. **Carson, J. V.** Understanding and Eliminating Particle Segregation Problem / J. V. Carson, T. A. Royal, D. J. Goodwill // *Bulk Solids Handling*. – 1986. – V. 6, № 1. – P. 139 – 144.
41. **Clange, K.** Minimizing Segregation in Bunkers / K. Clange, H. Wright. – Brit. Steel Corp. Labs. Ref. PE/B1/72.
42. **Ishida, M.** The Flow of Solid Particles in an Aerated Inclined Channel / M. Ishida, H. Hatano, T. Shirai // *Powder Technol.* – 1980. – 27. – P. 7 – 12.
43. **Dolgunin, V. N.** Segregation Modeling of Particle Rapid Gravity Flow / V. N. Dolgunin, A. A. Ukolov // *Powder Technology*. – 1995. – V. 83. – P. 95.
44. **Долгунин, В. Н.** Сдвиговые течения зернистых сред: закономерности и технологические аспекты : монография / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, В. Я. Борщев. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 168 с.
45. **Mechanics of Granular Materials** / K. Hutter, T. Sheiwiller, J. T. Jenkins, M. Satake. – Elsevier, Amsterdam, 1983. – 283.
46. **Tomographic Measurements and Distinct Element Simulations of Binary Granular Flow Voidage.** In *World Congress on Particle Technology 3 (Full Text of Paper in CD)* / P. A. Langston, M. S. Nikitidis, U. Tuzun, D. M. Heyes. – Brighton, UK, 1998.

47. **Sederman, A. J.** Structure of Packed Beds Probed by Magnetic Resonance Imaging / A. J. Sederman, P. Alexander, L. F. Gladden // *Powder Technology*. – 2001. – 117. – P. 255 – 269.
48. **George, D. L.** Three-phase Material Distribution Measurements in a Vertical Flow Using Gamma-densitometry Tomography and Electrical-impedance Tomography / D. L. George, K. A. Shollenberger, J. R. Torczynski // *Int. J. Multi-phase Flow*. – 2001. – V. 27. – P. 1903 – 1930.
49. **Computer** Tomograph Measurements in Shear and Gravity Particle Flows / B. Denes, J. Szepvolgy, P. Bogner, T. Folder, J. Gyenis // In 4-th World Congress on Particle Technology (Full Text of Paper in CD-Rom). – Sydney, Australia, 2002.
50. **Куди, А. Н.** Эффекты разделения и перемешивания неоднородных частиц в поперечно продуваемых гравитационных потоках зернистых материалов / А. Н. Куди, В. Н. Долгунин, О. О. Иванов // *Известия ВУЗов. Пищевая технология*. – 2010. – № 5-6. – С. 62 – 66.
51. **Романков, П. Г.** Гидродинамические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – Л. : Химия, 1974. – 288 с.
52. **Долгунин, В. Н.** Модель механизма сегрегации при быстром гравитационном течении частиц / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов, П. В. Классен // *Теоретические основы химической технологии*. – 1992. – Т. 26, № 5. – С. 100 – 109.
53. **Долгунин, В. Н.** Влияние условий течения смесей зернистых частиц по наклонной плоскости на их однородность / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди // *Химическая промышленность*. – 1993. – № 9. – С. 45 – 50.
54. **Севидж, С.** Гравитационное течение несвязанных гранулированных материалов в лотках и каналах / С. Севидж ; пер. с англ. ; сост. И. В. Ширко // *Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений* : сб. статей – М. : Мир, 1985. – С. 86 – 146.
55. **Borschov, V. Ya.** Phenomenological Analysis of the Interaction of Non-elastic Incoherent Particles in a Rapid Gravity Flow / V. Ya. Borschov, V. N. Dolgunin, P. A. Ivanov // *Theoretical Foundations of Chem. Eng.* – 2008. – 42. – 343.
56. **Closure** Relations for Shallow Granular Flows from Particle Simulations / T. Weinhart, A. R. Thornton, S. Luding, O. Bokhove // *Granular Matter*. – 2012. – 14(4). – P. 531 – 552.
57. **Pudasaini, S. P.** A General Two-phase Debris Flow Model / S. P. Pudasaini // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2012. – 117, F3, 2003 – 2012.
58. **Jenkins, J. T.** Kinetic Theory Applied to Inclined Flows / J. T. Jenkins, D. Berzi // *Granular Matter*. – 2012. – 14, 2. – P. 79 – 84.
59. **Coupling** of Full Two-dimensional and Depth-averaged Models for Granular Flows / B. Domnik, S. P. Pudasaini, R. Katzenbach, S. A. Miller // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2013. – 201. – P. 56 – 68.
60. **Forterre, Y.** Flows of Dense Granular Media / Y. Forterre, O. Pouliquen // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2008. – 40. – P. 1 – 24.

61. **Baxter, G. W.** The Temperature of a Vibrated Granular Gas / G. W. Baxter, J. S. Olafsen // *Granular Matter*. – 2007. – V. 9. – 1-2. – P. 135 – 139.
62. Ferziger J.H., Kaper H.G. *Mathematical Theory of Transport Processes in Gases*. North-Holland Publ., Amsterdam, 1972. – 568 p.
63. **Huerta, D. A.** Vibration-Induced Granular Segregation: a Phenomenon Driven by Three Mechanisms / D. A. Huerta, J. C. Ruiz-Suarez // *Physical Review Letters*. – 2004. – 92(11). – P. 1 – 4.
64. **Metzger, M. J.** All the Brazil Nuts 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. – 205(1-3). – P. 42 – 51.
65. **Ukolov, A. A.** Development of Segregation Kinetics Equation for Rapid Shear Flow of Particles / A. A. Ukolov, V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov // *Transactions TSTU*. – 2001. – V. 7, No. 2. – P. 239 – 250.
66. **Борщев, В. Я.** Исследование эффектов взаимодействия частиц при сдвиговых деформациях в зернистой среде / В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин, О. О. Иванов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 230 – 235.
67. **Ukolov, A. A.** Segregation Kinetics of Particle Rapid Gravity Flow / A. A. Ukolov, V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov // *Transactions TSTU*. – 2005. – V. 11, No. 2A. – P. 404 – 422.
68. **Dolgunin, V. N.** The Research on Rapid Gravity Flows of Particulate Solids / V. N. Dolgunin, V. Ya. Borschov, P. A. Ivanov // *Transactions TSTU*. – 2004. – V. 10, No. 3. – P. 689 – 696.
69. **Тарасенко, А. П.** Инновационное направление совершенствования послеуборочной обработки зерна / А. П. Тарасенко, М. Э. Мерчалова // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 3. – С. 161 – 164.
70. **Романенко, Г. А.** Достижения и перспективы развития аграрной науки России / Г. А. Романенко // *АПК: экономика, управление*. – 2009. – № 3. – С. 3 – 7.
71. **Ториков, В. В.** Урожайность и пивоваренные качества зерна новых сортов ярового ячменя / В. В. Ториков // *Вестник Брянской гос. сельскохозяйственной Академии*. – 2010. – № 4. – С. 1 – 7.
72. **Хоконова, М. Б.** Качество зерна ячменя и солода в зависимости от приемов агротехники / М. Б. Хоконова, М. А. Устова // *Техника и технология пищевых производств : науч. журнал*. – 2014. – № 4 – С. 71 – 74.
73. **Титова, Е. М.** Продуктивность и качество сортов пивоваренного солода / Е. М. Титова, М. А. Внукова // *Вестник ОрелГАУ*. – 2008. – Т. 12, № 3. – С. 5 – 8.
74. **Иванов, О. О.** Технология подготовки зернового сырья для биоконверсии с повышенной экстрактивностью / О. О. Иванов, Е. А. Парфенова, В. Н. Долгунин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 656 – 665.

75. **Куди, А. Н.** Обработка семян методами разделения и соединения / А. Н. Куди, В. Н. Долгунин, Е. А. Рябова // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 6. – С. 21 – 27.
76. **Долгунин, В. Н.** К вопросу о повышении биологической ценности семенного материала как средства обеспечения эффективного землепользования / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди, М. А. Туев // Вопросы современной науки и практики: Унив. им. В. И. Вернадского. – 2016. – № 4(62). – С. 13 – 18.
77. **Долгунин, В. Н.** Обработка неоднородных зернистых материалов при управлении сегрегированными потоками (на англ. языке) / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. А. Уколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 321 – 327.
78. **Карев, В. И.** Развитие принципов управления сегрегированными технологическими потоками зернистых материалов / В. И. Карев, В. Н. Долгунин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 588 – 596.
79. **Иванов, О. О.** Повышение эффективности барабанного аппарата путем управления сегрегированными потоками зернистых материалов / О. О. Иванов, А. Н. Куди, В. Н. Долгунин // Изв. ВУЗов. Пищевая технология. – 2011. – № 2-3. – С. 89 – 93.
80. **Долгунин, В. Н.** Технологические возможности управления структурой потоков в барабанном теплообменном аппарате / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. Н. Куди // Химическая технология. – 2012. – № 10 – С. 600 – 607.
81. **Совершенствовать** инженерно-техническое обеспечение агропроизводства / Г. А. Романенко, А. А. Михалев, Ю. Ф. Лачуга и др. // Экономика сельского хозяйства России. – 2004. – № 5. – С. 10 – 13.

Научное издание

КУДИ Андрей Николаевич  
ДОЛГУНИН Виктор Николаевич

СЕГРЕГАЦИЯ И МИГРАЦИЯ В ГРАВИТАЦИОННЫХ  
ПОТОКАХ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ:  
МЕХАНИЗМЫ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ  
И ТЕХНОЛОГИИ

Монография

Редактирование Л. С. Мордасовой  
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

Подписано в печать 08.11.2019.  
Дата выхода в свет 25.11.2019.  
Формат 60 × 84 / 16. 7,9 усл. печ. л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 106

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.  
Телефон (4752) 63-81-08.  
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А  
Телефон (4752) 63-07-46  
E-mail: tipo\_tstu68@mail.ru

ISBN 978-5-8265-2124-3

