

**К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ СЕПАРАЦИИ СМЕСИ
РАЗЛИЧНЫХ ПО ФОРМЕ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ**

**А. Н. Куди, Н. А. Федосов, В. В. Сергеев,
В. Н. Долгунин, А. Г. Тараканов**

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
dolgunin-vn@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: быстрый гравитационный поток; зернистый материал; миграция; сегрегация; сепарация; шероховатый скат.

Аннотация: Предложена технология сепарации частиц по форме в полидисперсном зернистом материале с использованием эффектов взаимодействия частиц в быстром сдвиговом потоке на шероховатом скате. Технология предполагает фракционирование исходной смеси по объему частиц с использованием эффекта сегрегации на первой стадии и калибровку полученных фракций частиц по массе с использованием эффекта квазидиффузионной сепарации (миграции) в гравитационном потоке на второй. Финишная стадия предполагает сепарацию частиц по форме путем ситовой классификация фракций по ключевому геометрическому параметру.

Технологическая задача разделения частиц зернистого материала по форме возникает в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве и связана, например, с необходимостью выделения кристаллов и гранулятов определенной формы в химических, пищевых, горнодобывающих, электротехнических технологиях и подготовки семян в сельскохозяйственном производстве. Решение названной задачи особенно осложняется в случае комплексного различия формы частиц (длины, ширины, толщины) и их полидисперсного гранулометрического состава. В этом отношении весьма показательны технологические проблемы, возникающие при обеспечении высокого класса посевного стандарта семенам злаковых и овощных культур. В связи с этим в рамках настоящей статьи технология сепарации полидисперсных частиц, различающихся по форме, обсуждается на примере решения технологической проблемы организации процессов очистки и калибровки семян мелкосеменных овощных культур [1].

Семена таких культур представляют собой мелкозернистые среды, которые во многих случаях характеризуются значительными эффектами связности частиц. Данное свойство в совокупности с неправильной формой частиц, большим диапазоном изменения их размера и плотности, высоким 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: «...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» [1].

Результаты исследований [2 – 4] свидетельствуют о перспективах использования для очистки и калибровки семян мелкосеменных культур физических эффектов сепарации (сегрегации и миграции) при взаимодействии частиц в быстром гравитационном потоке зернистого материала на шероховатом скате. Перспективы связаны с принципиально различными физическими и кинетическими закономерностями названных физических эффектов сепарации, обусловленных гидродинамическим и квазидиффузионным взаимодействием частиц.

Сегрегация является следствием гравитационного сдвига, когда вследствие гидромеханического взаимодействия частиц в сдвиговом потоке его неоднородные частицы становятся концентраторами напряжений. В процессе релаксации напряжений в потоке формируются условия для поперечного перемещения частиц. В случае однородной зернистой среды вероятность поперечного перемещения частиц 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 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 [2]. 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. Данное свойство сегрегации указывает на целесообразность использования ее эффекта для организации процесса калибровки по размеру.

Эффект миграции по своей сути является квазидиффузионной сепарацией 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 (объемную долю пустот). Напротив, частицы с низкими скоростями флуктуаций (крупные, плотные, шероховатые и малоупругие) мигрируют в направлении областей потока с высокой концентрацией твердой фазы. Миграция протекает без доминирующего влияния на скорость процесса размера частиц. Однако, масса частиц, при очевидной ее корреляции с 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 сепарацией по комплексу физико-механических свойств (плотности, шероховатости, упругости), влияющих на скорость флуктуаций частиц.

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 карантинного растения – повилки,

имеющих столь же высокую неоднородность размера, плотности и отличающихся, преимущественно, по форме. 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, что инициирует поиск новых физических эффектов сепарации.

Изложенные выше кинетические закономерности эффектов сегрегации и миграции в быстром сдвиговом потоке материала позволяют предположить, что их комплексное использование обеспечит решение технологической задачи. Использование эффектов дает потенциальную возможность калибровки семян одновременно по размеру и плотности с выделением биологически ценного семенного материала с наибольшей массой тысячи зерен, а также сепарации семян по комплексу физико-механических свойств при их очистке от трудно отделимых примесей.

Результаты исследования фракционного и компонентного составов исходного семенного материала (морковь сорта «Роте Ризен») методом ситового анализа с использованием стандартного набора сит с круглыми отверстиями свидетельствуют о чрезвычайно сложном составе смеси (рис. 1). Смесь характеризуется широким диапазоном размеров семян целевого компонента, совпадающим с таковым для карантинного растения. Данное свойство смеси с учетом отсутствия различия плотности компонентов позволяет отнести ее к категории трудно сепарируемых смесей.

В связи с этим для калибровки семян по массе и полного исключения из семенного материала семян карантинного растения необходимо предварительное фракционирование семян. Принимая во внимание неправильную форму частиц и высокую ее неоднородность (длины, ширины, толщины) для фракционирования целесообразно воспользоваться возможностями технологии многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц на базе эффекта сегрегации.

Для организации процесса фракционирования использована технология многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц «Мультисег» [4], которая заключается в подаче исходной смеси частиц на шероховатый наклонный

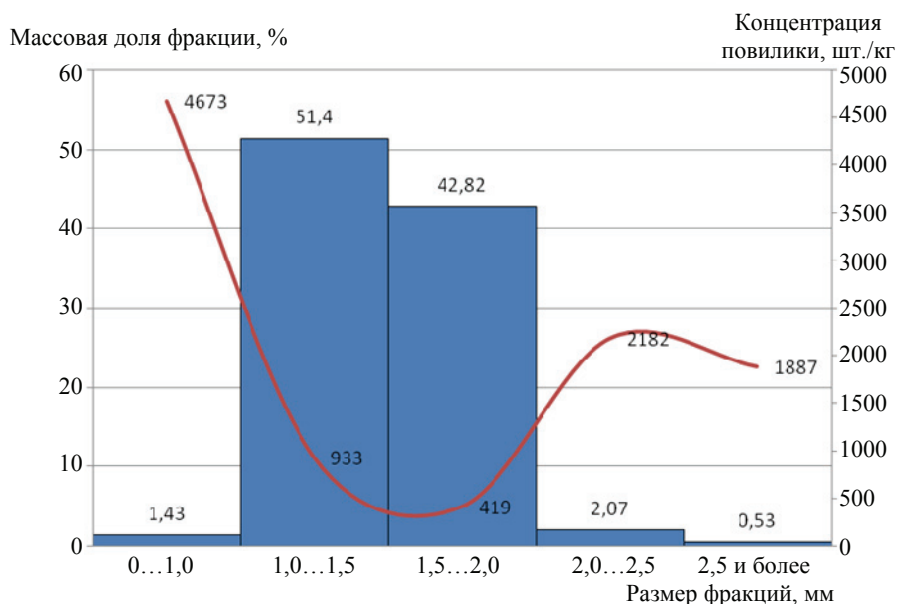


Рис. 1. Гистограмма фракционного состава исходного семенного материала с распределением концентрации семян повилики по фракциям

скат с размером шероховатостей, равным половине диаметра наиболее крупных частиц смеси. Скаты установлены под углом к горизонту, 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 образуется 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 из которых поток частиц, покидающих скат, разделяется по высоте слоя на две части, противоточно перемещающиеся 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.

Предложенная технология реализована на базе аппарата с вращающимся барабаном, снабженным подъемными лопастями [4]. Детальный анализ геометрических характеристик семян во фракциях свидетельствует о том, что использование эффекта сегрегации для фракционирования обеспечивает достижение технологически важного результата. Семена целевого компонента, имеющие неправильную форму, фракционируются 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 последовательная калибровка семян по ширине, толщине и длине с использованием соответственно сит с круглыми, щелевыми отверстиями и триера. Такая поэтапная обработка семян сопровождается потерей ценного семенного материала и его интенсивной травмируемостью.

Технологические возможности использования технологии многоступенчатой сепарации на базе эффекта сегрегации для организации процесса фракционирования семян по размеру продемонстрированы на рис. 2, где представлена функция продольного распределения приведенного (обобщенного) размера семян моркови по ступеням сепарации (длине барабана). Приведенный размер семян определяется как корень кубический из произведения осредненных линейных их размеров (длины, ширины и толщины), то есть прямо коррелируется с объемом семян и в определенной степени косвенно отражает их биологическую ценность. Важно отметить, что полученный результат свидетельствует о возможности использования метода многоступенчатой сепарации для организации процесса фракционирования семян неправильной формы на более чем две фракции.

В рамках решаемой технологической задачи на первом этапе исходный материал подвергался фракционированию на две равные части (рис. 3). Гистограммы распределений частиц по размерам в крупной и мелкой фракциях, полученные методом ситового анализа на ситах с круглыми отверстиями, показывают, что средний размер частиц в названных фракциях различается в 1,5 раза.

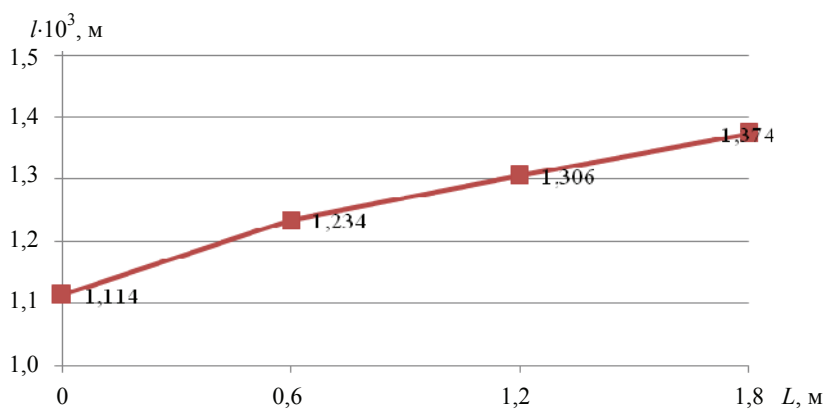


Рис. 2. Продольное распределение семян моркови по размеру в барабанном сепараторе



Рис. 3. Крупная (а) и мелкая (б) фракции семян моркови после фракционирования с использованием эффекта сегрегации

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 (см. рис. 1).

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 [5]. 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. Подача исходной смеси осуществляется в центральной части ската между его торцевыми кромками. Взаимодействие частиц в центральной по высоте слоя 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 и мелких в нижней частях слоя по комплексу свойств. При этом частицы, приобретающие при взаимных столкновениях низкие скорости флуктуаций, мигрируют в центральную более плотную часть слоя, а частицы с высокой скоростью флуктуаций концентрируются в более разреженных периферийных частях слоя.

В соответствии с технологией многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц для организации процесса сепарации (очистки) вдоль кромки ссыпания 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 возвращаются 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 барабанном вибросепараторе (рис. 4). Полученные ранее в результате фракционирования 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). Детальный анализ геометрических и физико-механических характеристик семян во фракциях свидетельствует, что калибровка семян с использованием эффектов сегрегации и миграции 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 (массе), что позволяет с наименьшими потерями выделить семенную фракцию, имеющую наиболее высокую биологическую ценность.

На основе визуальной информации и результатов анализа характеристик продуктов сепарации семенного материала сделан вывод о высокой аналогии свойств крупной легкой (рис. 5, б) и мелкой тяжелой (рис. 5, в) фракций.



Рис. 4. Опытный образец промышленного вибросепаратора

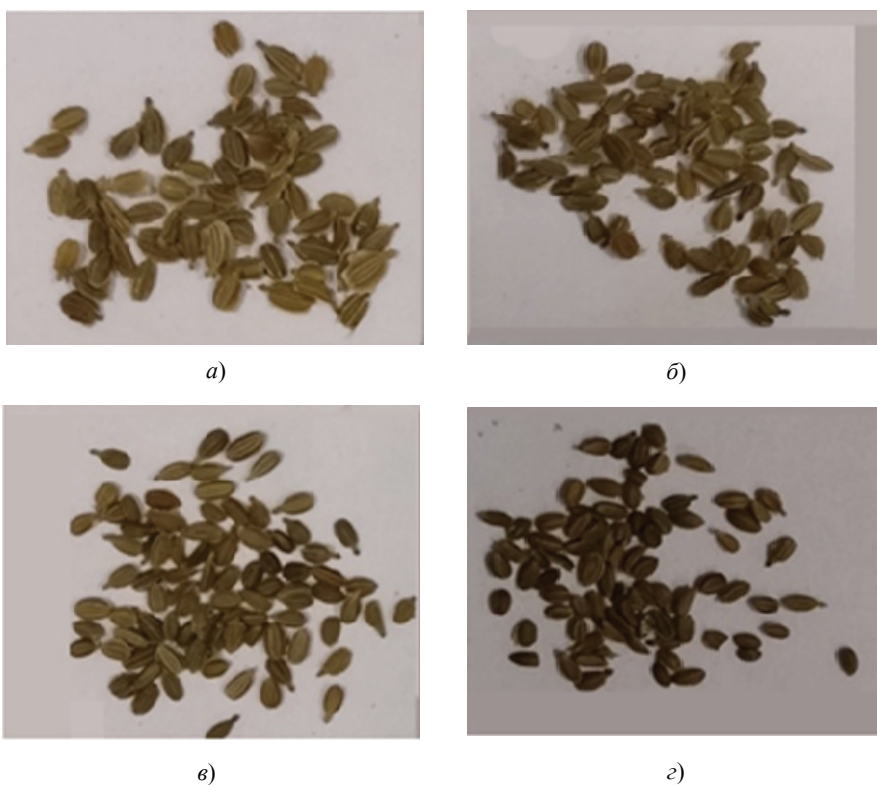


Рис. 5. Продукты сепарации предварительно откалиброванных по размеру фракций семян моркови:
a – крупные тяжелые; *б* – крупные легкие; *в* – мелкие тяжелые; *г* – мелкие легкие

В названных фракциях семена имеют примерно одинаковую массу 1 000 зерен (0,8...0,9 г) при содержании семян карантинного растения 300...450 кг⁻¹. 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 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 данных фракциях изменяется от 300 кг⁻¹ (во фракции с массой 1 000 зерен 0,9 г) до 1 600 кг⁻¹ (во фракции с массой 1 000 зерен 0,7 г)

Исследование состава и свойств мелкой легкой фракции семян (фракция *г*) на рис. 5) 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, обрубленных семян (более 20 %)



Рис. 6. Крупная тяжелая фракция семян моркови (масса 1 000 зерен 1,6 г) и ее отходы после классификации на сите 1,2×20 мм

и семян карантинного растения (1 500...1 600 шт./кг). Перечисленные свойства указывают на целесообразность утилизации данной фракции как отходов производства.

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. Данный 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 предложенного варианта очистки подтверждена экспериментально для фракции семян с наибольшей массой 1 000 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. 6). Содержание семян повилики в отходах достигло значений 27 000 кг⁻¹.

Список литературы

1. Романенко, Г. А. Достижения и перспективы развития аграрной науки России / Г. А. Романенко // АПК: экономика, управление. – 2009. – № 3. – С. 3 – 11.
2. Долгунин, В. Н. Механизмы и кинетика гравитационной сепарации гранулированных материалов / В. Н. Долгунин, А. Н. Куди, М. А. Туев // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190, № 6. – С. 585 – 604.
3. 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. – Vol. 122. – P. 22 – 32.
4. Иванов, О. О. Управление сегрегированными потоками сыпучих материалов для их обработки методами разделения и соединения / О. О. Иванов, В. А. Пронин, Е. А. Рябова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 397 – 410. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410
5. Куди, А. Н. Влияние частоты вибраций ската на характеристики структуры и эффекты разделения в быстром гравитационном потоке частиц / А. Н. Куди, М. А. Туев, В. Н. Долгунин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 271 – 280. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.271-280

The Solution of the Problem of Separating a Mixture of Polydisperse Particles of Different Shapes

A. N. Kudi, N. A. Fedosov, V. V. Sergeev, V. N. Dolgunin, A. G. Tarakanov

*Department of Technologies and Equipment for Food and Chemical Production,
dolgunin-vn@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: fast gravitational flow; granular material; migration; segregation; separation; rough stingray.

Abstract: A technology is proposed for the separation of particles by shape in a polydisperse granular material using the effects of particle interaction in a fast shear flow on a rough slope. The technology involves the fractionation of the initial mixture by the volume of particles using the segregation effect at the first stage and the calibration of the obtained particle fractions by weight using the effect of quasi-diffusion separation (migration) in the gravity flow at the second. The final stage involves the separation of particles by shape by sieve classification of fractions according to a key geometric parameter.

References

1. Romanenko G.A. [Achievements and prospects for the development of agricultural science in Russia], *APK: ekonomika, upravleniye* [Agro-industrial complex: economics, management], 2009, no. 3, pp. 3-11. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Tuyev M.A. [Mechanisms and kinetics of gravitational separation of granular materials], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2020, vol. 190, no. 6, pp. 585-604. (In Russ.)
3. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Ukolov A.A., Tuev M.A. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles, *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, vol. 122, pp. 22-32.
4. Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova Ye.A. [Management of segregated flows of bulk materials for their processing by methods of separation and connection], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 397-410, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Kudi A.N., Tuyev M.A., Dolgunin V.N. [Influence of the frequency of vibrations of the slope on the characteristics of the structure and the effects of separation in a fast gravitational flow of particles], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 271-280, doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.271-280 (In Russ., abstract in Eng.)

Zur Lösung des Problems der Trennung der Mischung der ungleichförmigen polydispersen Teilchen

Zusammenfassung: Es ist eine Technologie zur Formtrennung von Partikeln in einem polydispersen körnigen Material unter Verwendung der Auswirkungen der Wechselwirkung von Partikeln in einem schnellen Scherfluss auf einem rauen Hang vorgeschlagen. Die Technologie beinhaltet die Fraktionierung des Ausgangsgemisches nach dem Partikelvolumen unter Verwendung des Segregationseffekts in der ersten

Stufe und die Kalibrierung der resultierenden Partikelfraktionen nach Gewicht unter Verwendung des Effekts der Quasidiffusionstrennung (Migration) im Gravitationsfluss in der zweiten Stufe. Die letzte Stufe beinhaltet die Trennung von Partikeln nach Form durch Siebklassifizierung der Fraktionen nach dem geometrischen Schlüsselparameter.

Vers une résolution du problème de la séparation du mélange des particules polydispersées de la forme différente

Résumé: Est proposée une technologie de la séparation des particules par forme dans un matériau granulaire polydispersé avec une utilisation des effets de l'interaction des particules dans un flux de cisaillement rapide sur une pente rugueuse. La technologie prévoit de fractionner le mélange initial en fonction du volume des fractions en utilisant l'effet de la ségrégation à la première étape et d'étalonner les fractions des particules obtenues en fonction de la masse avec l'utilisation de l'effet de la séparation de quasi-diffusion (migration) dans le flux gravitationnel à la deuxième étape. L'étape finale consiste à séparer les particules selon leur forme en classant les fractions par tamis selon un paramètre géométrique clé.

Авторы: *Куди Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Федосов Никита Андреевич* – магистрант; *Сергеев Владимир Валерьевич* – магистрант; *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Тараканов Александр Геннадиевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Борцов Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.