
УДК 631.3

Обработка семян методами разделения и соединения

Seeds handling by means of separation and joining

А. Н. КУДИ, канд. техн. наук
В. Н. ДОЛГУНИН, д-р техн. наук
Е. А. РЯБОВА, инж.

**Тамбовский государственный технический
университет, Тамбов, Россия,
dolgunin-vn@yandex.ru**

A. N. KUDI, PhD in Engineering
V. N. DOLGUNIN, DSc in Engineering
E. A. RYABOVA, Engineer

**Tambov State Technical University,
Tambov, Russia,
dolgunin-vn@yandex.ru**

Проанализированы результаты исследования технологических характеристик аппарата с вращающимся барабаном при его применении в качестве сепаратора и смесителя в производстве семян злаковых и мелкосеменных овощных культур. Семена обрабатываются с использованием эффектов разделения (сегрегации и миграции) неоднородных частиц при их взаимодействии на гравитационном скате. Процессы сепарации и смешивания проводятся путем управления сегрегированными потоками материала в рабочем объеме аппарата. Установлено, что использование эффектов разделения частиц путем управления их сегрегированными потоками позволяет организовать одновременную очистку семян от трудноотделимых примесей и их калибровку по размеру и плотности. При очистке и калибровке семян моркови в результате их первичной обработки выделены очищенные семена с выходом 65 %, масса которых на 67 % выше, чем у семян в первичных отходах. Установлено, что использование эффектов взаимодействия частиц создает условия для обработки семян с минимальным травмированием. Показатель всхожести семян, откалиброванных по предлагаемой

технологии, на 5 % выше, чем у семян, полученных путем традиционной обработки. Экспериментально подтверждена возможность организации процесса непрерывного приготовления смеси семян с микроэлементами при их порционной подаче с периодом, значительно превышающим среднее время пребывания материала в аппарате. Во всех рассмотренных вариантах технологического использования аппарата у него сохраняется функция тепломассообменного устройства — сушилки. Избирательное целенаправленное управляющее воздействие только на часть потока материала в аппарате обеспечивает достижение технологического эффекта без значительного увеличения энергозатрат.

Ключевые слова: семена злаков; мелкосеменной; сепарация; трудноотделимый; калибровка; гравитационный поток; сегрегация; миграция; смешивание с микроэлементом.

The results of research of technological characteristics of a device with rotating drum are analyzed; this device is used as a separator and mixer in the production of seeds of cereals and small-seeded vegetable crops. The seeds handling is organized by means of the separation effects (segregation and migration) of nonuniform particles during their interaction on a gravity chute. The processes of separation and mixing are performed due to the control of segregated flows in the operating volume of device. It is found that separation effects can be used to organize the cleaning of seeds containing hard-separable impurities, and their calibration on size and density at the same time. During cleaning and calibration of carrot seeds the result of their primary handling was the yield of 65 % of cleaned seeds; their mass exceeded by 67 % the mass of seeds in primary waste. It is also found that the use of particle interaction effects creates the conditions for seeds handling with their minimal damage. The germination of seeds calibrated in accordance with the proposed technique is higher by 5 % than the germination of seeds obtained in traditional way. It is shown experimentally that there is a possibility to organize the process of continuous mixing of seeds with dosed supply of microcomponents, the period of which is much larger than the average retention time. The drum device saves the properties of heat and mass transfer equipment (dryer) in all the variants of its technological applications. The selective and goal-oriented control action on a part of material flow in device provides the technological effects without any significant increase of energy consumption.

Keywords: cereal seed; small-seeded; separation; hard-separable; calibration; gravity flow; segregation; migration; mixing with microelement.

Введение

Современные технологии растениеводства предполагают использование технологических процессов переработки материалов методами разделения, соединения и тепломассообмена. На этапе производства семян требуется выполнение технологических операций их очистки, калибровки, сушки и обработки микроэлементами, стимулирующими биологическую активность и обеспечивающими сохранность. Для осуществления каждой из перечисленных операций необходимо специализированное оборудование, область эффективного использования которого часто очень ограничена. Актуальна задача разработки оборудования для тонкой очистки и калибровки семян мелкосеменных культур по комплексу физико-механических свойств при минимальной травмируемости. Это подтверждается экспертной оценкой состояния развития аграрной науки в России [1]: "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".

С учетом значительных капитальных затрат на приобретение и установку специализированного оборудования и сезонного характера его использования применение соответствующих технологий целесообразно только в условиях крупных специализированных предприятий. Однако даже при непродолжитель-

ном хранении неочищенного зерна ухудшаются его посевные качества, что приводит к снижению всхожести, энергии и силы роста семян [2]. Одним из путей решения этой проблемы может быть директивная концепция [3] разработки и налаживания выпуска многооперационного оборудования, которая реализуется в рамках настоящего исследования.

Цель исследования

В данной работе в соответствии с концепцией разработки многооперационного моноблочного оборудования [3] приведены результаты исследования технологических характеристик аппарата для организации процессов очистки, калибровки, а также обработки семян микроэлементами и приготовления смесей зерноматериалов с использованием единой технической базы. Методы разделения и соединения реализуются с помощью разных вариантов управления сегрегированными потоками сыпучего материала в рабочем объеме оборудования [4]. Важно отметить, что переход от одного варианта управления к другому не сопровождается изменением технических средств управления сегрегированными потоками.

Сегрегированные потоки формируются в рабочем объеме оборудования либо спонтанно, либо искусственным путем. В них частицы сыпучего материала отличаются более однородными свойствами по сравнению с частицами технологического

потока в целом. Взаимодействие неоднородных (по размеру, плотности, шероховатости, упругости, форме) частиц технологического потока сопровождается эффектами их разделения — сегрегации и миграции [5]. Вследствие этих эффектов различающиеся по свойствам частицы перемещаются навстречу друг другу, что приводит к образованию сегрегированных областей технологического потока, в которых концентрируются частицы с высокой однородностью свойств. Традиционно сегрегацию считают негативным явлением в технологических процессах переработки зернистых материалов, например в процессе триерования семян [6].

Практика показывает, что наиболее интенсивно сегрегированные потоки формируются при гравитационном течении сыпучих материалов. Такие течения образуются на естественных откосах и гравитационных скатах, в т.ч. в зонах контакта материала с рабочими органами машин. В зависимости от условий течения в потоке может наблюдаться доминирование одного эффекта разделения над другим.

Сегрегация обусловлена локальной неоднородностью состава среды, когда контрольная частица вследствие своего отличия от частиц среды при взаимодействии с ними становится концентратом напряжений и получает импульс на перемещение либо в направлении гравитации, либо в противоположном направлении. Сегрегация доминирует в потоках с относительно высокой

концентрацией частиц и высокой однородностью их пространственного распределения.

Миграция — следствие пространственной неоднородности среды и различных скоростей хаотических квазидиффузионных перемещений неоднородных частиц, которые они приобретают при взаимных столкновениях. Частицы, имеющие малые скорости флуктуации (крупные, плотные, шероховатые и малоупругие), перемещаются в область потока с высокой концентрацией твердой фазы. Быстро движущиеся частицы (мелкие, менее плотные, гладкие и упругие) перемещаются в разреженные области потока с большой величиной свободного пробега между частицами. Миграция преобладает в разреженных потоках при высокой неоднородности пространственного распределения частиц.

В технологическом аспекте чрезвычайно важно обратить внимание на различные степени зависимости кинетики эффектов сегрегации и миграции от физико-механических свойств частиц. Сегрегация протекает при первостепенной значимости различия частиц по размеру. При разделении частиц в соответствии с эффектом миграции существенное значение приобретает их различие по плотности, шероховатости, упругости без доминирующего влияния размера.

Разнородные кинетические характеристики эффектов сегрегации и миграции в отношении физико-механических свойств частиц указывают на необходимость их учета при решении технологических задач переработки зернистых материалов методами разделения и соединения в управляемых сегрегированных потоках.

Технологическое использование сегрегированных потоков предполагает управление этими потоками с целью либо их усиления для обработки материалов методами разделения, либо их взаимного проникновения для обработки материалов методами соединения.

Материалы и методы

В работе приведены результаты исследования эффективности тех-

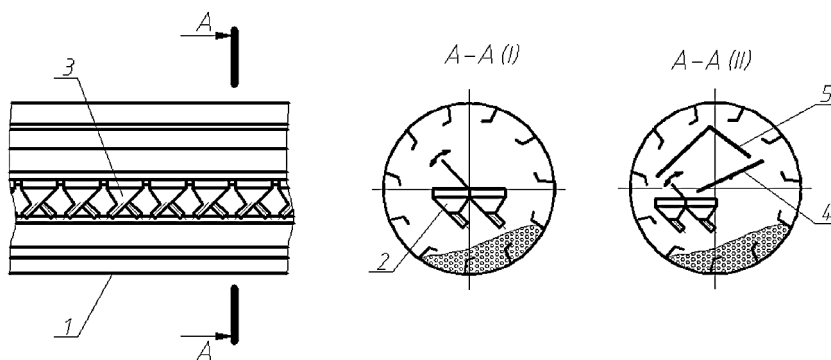


Рис. 1. Схема устройства для управления сегрегированными потоками в барабанном аппарате с подъемными лопастями:

1 — барабан; 2 — насадка, управляющая сегрегированными потоками; 3 — отклоняющие элементы насадки; 4 — шероховатый скат; 5 — экран

нологического использования вариантов управления сегрегированными потоками семян злаковых и овощных культур с целью их очистки, калибровки, приготовления смесей и обработки микроэлементами с использованием единой технической базы.

В качестве такой базы использован аппарат с вращающимся барабаном (рис. 1), снабженный периферийными подъемными лопастями. Он широко применяется в сельском хозяйстве и агропромышленном комплексе для организации тепло-массообменных процессов (сушки, термовлажностной обработки и др.), например в составе агрегата витаминной муки. Технологические функции, обеспечивающие обработку зернистых материалов методами разделения и соединения в барабанном аппарате, выполняются за счет размещения в барабане насадки, управляющей сегрегированными потоками.

Сегрегированные потоки зарождаются в засыпке материала в нижней части барабана. При взаимодействии неоднородных частиц в скатывающемся слое засыпки происходит их разделение под действием эффектов сегрегации и миграции. Вследствие эффектов разделения частицы в зависимости от их свойств занимают определенное положение не только в скатывающемся слое, но и в засыпке материала на лопасти и далее в поперечном сечении падающего слоя частиц в барабане. Так, крупные частицы с малой плотностью сосредотачиваются преимущественно вблизи открытой по-

верхности засыпки, в первую очередь захватываются подъемными лопастями и выпадают с опускающихся лопастей на завершающей стадии сброса материала. Таким образом сегрегированные потоки материала, зарождающиеся в засыпке в нижней части барабана, распространяются и на слой падающих частиц.

Насадка, управляющая сегрегированными потоками (см. рис. 1), представляет собой блок отклоняющих элементов, выполненных, например, в виде наклонных пластин или воронок с наклонными течками. Отклоняющие элементы установлены в блоке продольными рядами с наклоном к одному из торцов барабана. Блок элементов закреплен неподвижно в центральной части барабана на опорах в торцевых камерах. Каждый ряд элементов установлен с возможностью поперечного перемещения в барабане и снабжен поворотными пластинами на его продольных кромках. Такое устройство насадки для управления сегрегированными потоками обеспечивает возможность организации избирательного контакта отклоняющих элементов с тем или иным участком падающего слоя частиц с целью его ступенчатого перемещения к тому или иному торцу барабана. При этом направление отклоняющих элементов в рядах насадки устанавливается в зависимости от свойств зернистых материалов и технологических целей их переработки методами разделения и соединения.

При обработке материалов методом разделения (очистке, калибровке и фракционировании семян) в

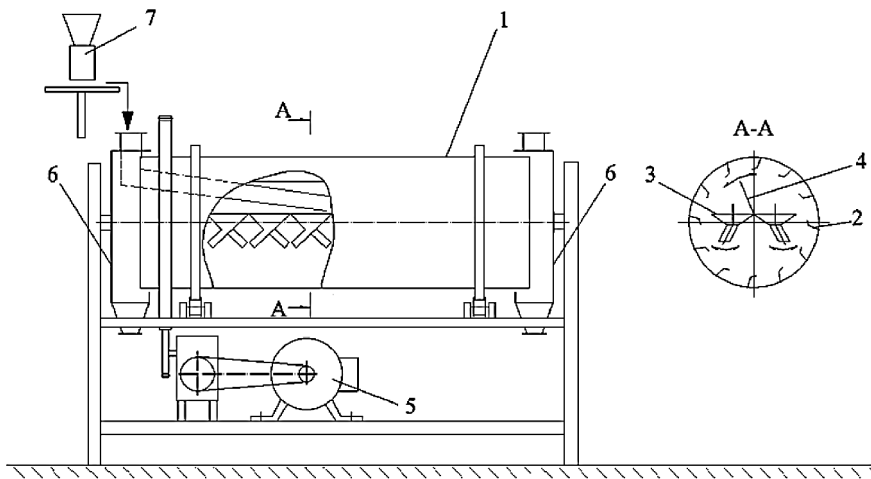


Рис. 2. Аппарат для обработки семян:

1 — барабан; 2 — периферийная насадка; 3 — насадка, управляющая сегрегированными потоками; 4 — поворотная пластина; 5 — привод; 6 — загрузочная и разгрузочная камеры; 7 — дозатор

аппарате организуются встречные сегрегированные потоки, состав которых в наибольшей степени отличается содержанием контрольного компонента смеси. При очистке семян таким компонентом служит отделяемая примесь, содержание которой в любом произвольном сечении барабана максимально в одном из встречных сегрегированных потоков и минимально — в другом. В процессе калибровки семян встречные потоки организуют таким образом, чтобы они в наибольшей степени отличались друг от друга массой тысячи зерен. При организации процесса фракционирования ряды отклоняющих элементов, направленных к противоположным торцам барабана, располагаются в падающем слое частиц так, чтобы элементы одного из рядов контактировали с наиболее крупными семенами, а элементы другого ряда — с наиболее мелкими.

При обработке семян методом разделения реализуется технология многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц "Мультисег" [4]. В соответствии с этой технологией в направлении технологического потока организуется множество ступеней сепарации. Каждая ступень образована встречно направленными отклоняющими элементами, расположенными в произвольном сечении рабочего объема аппарата. На множестве ступеней сепарации каждый из встречных сегрегированных потоков при перехо-

де от одной ступени к другой обогащается частицами определенного свойства. В результате в потоках материала на выходе из аппарата у противоположных его торцов концентрируются частицы, характеризующиеся полярными свойствами: крупные и мелкие, плотные (тяжелые) и легкие, шероховатые и гладкие и т.д.

Эффективность процессов очистки и калибровки исследована для семян злаковых и мелкосеменных овощных культур. Исследование технологических параметров процесса очистки семян ячменя от овсюга проведено в аппарате с вращающимся барабаном диаметром 0,3 м и длиной 1,2 м. На внутренней поверхности барабана закреплены подъемные лопасти, а в его центральной части установлен блок воронкооб-

разных отклоняющих элементов в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Отклоняющие элементы установлены рядами и направлены к одному из торцов барабана в одном ряду и в противоположную сторону — в другом.

Загрузка семян осуществлялась в центральную часть вращающегося барабана по наклонному вибрирующему лотку. Выход товарной фракции семян устанавливался путем регулирования соотношения величин встречных сегрегированных потоков в рядах отклоняющих элементов. Семена и нетоварная фракция выгружались через торцевые камеры с противоположных концов барабана.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены результаты исследования динамики процесса очистки семян ячменя от овсюга при содержании последних 100 кг^{-1} с производительностью 150 кг/ч и выходом товарной фракции 80 %. Для изучения динамических характеристик аппарата создавались начальные условия однородного распределения исходной смеси по длине барабана с последующим анализом содержания примеси в товарном продукте и отходах в период выхода аппарата на стационарный режим функционирования. Статистическая значимость результатов в экспериментах обеспечена путем трехкратного повторения опытов и оценки их статистической однородности при 95 %-ной доверительной вероятности. Полученные результаты свидетельствуют о возможности полного извлечения сорной примеси при относительно высоком выходе семян.

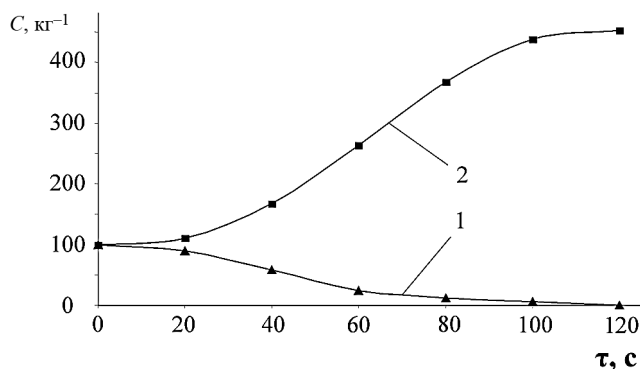


Рис. 3. Динамика процесса разделения смеси ячмень-овсюг в барабанном аппарате с управлением сегрегированными потоками:

1 — концентрация C овсюга в целевом продукте; 2 — концентрация овсюга в отходах

Свидетельством эффективности аппарата следует считать и относительно непродолжительный период его выхода на стационарный режим, не превышающий 120 с, а также эффект калибровки семян по массе, сопутствующий их очистке. Измерения массы тысячи зерен показали, что ее значение для товарной фракции составило 47 г, а для отходов — 44 г. Кроме того, установлено, что обработка семян в сегрегированных потоках сопровождается значительно меньшим травмированием, чем на традиционных пневмоситовых машинах. Подтверждением этого может служить показатель всхожести, равный 98 % для семян, откалиброванных в соответствии с предлагаемой технологией, и 93 % для семян после обработки на пневмоситовой машине и триере.

В рассматриваемом варианте управления сегрегированными потоками последние следует считать спонтанными, поскольку они имеют место в традиционной конструкции аппарата, специально не предназначенной для их формирования. Опыт показывает, что такой вариант организации сегрегированных потоков на естественных откосах эффективен для хорошо сыпучих несвязных зернистых материалов, к которым относятся семена большинства злаковых и бобовых культур. Мелкие же семена, например семена многих овощных культур и трав, следует отнести к категории связных зернистых материалов, для которых такой вариант переработки не дает желаемого технологического эффекта. Для формирования сегрегированных потоков этих материалов целесообразно использовать шероховатый скат с регулируемым углом наклона, превышающим угол естественного откоса материала. Конструкция соответствующей насадки барабанного аппарата схематически представлена на рис. 1 (вариант II).

Насадка состоит из шероховатого ската, который устанавливается над засыпкой материала в барабане под его поднимающимися лопастями. Скат имеет шероховатость, равную половине эквивалентного диаметра наиболее крупных частиц смеси, и закрепляется с возможностью регулирования угла наклона в торцевых камерах аппарата. Под нижней

кромкой ската установлен с возможностью горизонтального перемещения блок отклоняющих элементов, предназначенный для управления сегрегированными потоками материала, которые зарождаются на скате. Отклоняющие элементы установлены в блоке рядами и направлены вдоль нижней кромки ската к одному из его торцов в одном ряду и в противоположную сторону — в смежных рядах. По аналогии с насадкой предыдущей конструкции на продольных кромках рядов отклоняющих элементов закреплены поворотные пластины, позволяющие регулировать соотношение потоков частиц, падающих в тот или иной ряд отклоняющих элементов. Шероховатый скат, за исключением некоторого участка вблизи его верхней кромки, и блок отклоняющих элементов изолированы от непосредственного контакта с частицами падающего слоя материала с помощью экрана. Принцип функционирования насадки формально аналогичен принципу работы насадки предыдущей конструкции (см. рис. 1, вариант I) и также обеспечивает реализацию технологии многоступенчатой сепарации с противотоком неоднородных частиц.

Барабанный аппарат с насадкой, содержащей шероховатый скат, использован для очистки и калибровки семян моркови сорта "Нантская", содержавших примеси семян сорных растений: марь белая — 3910 кг^{-1} , повилка — 142 кг^{-1} (относится к карантинным). Очистка и калибровка семян моркови проведены в аппарате с вращающимся барабаном диаметром 0,5 м и длиной 1,5 м. Необходимый режим течения смеси семян на скате задают путем установки угла наклона ската и скорости вращения барабана. Для интенсификации эффектов разделения в потоках связных частиц при их взаимодействии угол наклона ската устанавливают со значительным превышением угла естественного откоса материала. В процессе сепарации семян моркови угол наклона ската был равен 49° . При производительности 11 кг/ч по исходным семенам моркови обнаружены следующие показатели функционирования сепаратора: выход очищенных и откалиброванных семян 65 %; отсутствие семян

сорных, в т.ч. карантинных растений; масса тысячи зерен $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

При анализе показателей функционирования сепаратора особое внимание следует обратить на высокое значение комплексного показателя качества семян — массы тысячи зерен ($1,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$), который существенно превосходит соответствующее минимальное стандартное значение для семян первого класса ($1,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$). Этот результат представляется тем более значимым, если принять во внимание, что масса тысячи зерен в первичных отходах составила всего $0,78 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$. Соотношение масс семян в выделенных фракциях, равное 1,7, свидетельствует о высокой эффективности процесса калибровки семян одновременно по размеру и плотности. Кроме того, установлено, что возможна дальнейшая переработка нетоварной фракции семян при адаптации параметров функционирования аппарата к изменившимся свойствам перерабатываемого материала.

При обработке материалов методом соединения сегрегированными потоками управляют с целью организации либо их взаимного проникновения (разрушения), либо продольного перемешивания. Первый вариант более характерен для случаев приготовления смеси в периодическом режиме, второй — для процессов непрерывного смешивания и поточной обработки материала микроэлементами. В соответствии с первым вариантом управления на сегрегированные потоки оказывают во многом традиционное воздействие, приводящее к образованию локальных контуров поперечного и продольного перемешивания [4]. Результаты исследования эффективности такого варианта при его реализации на базе аппарата, изображенного на рис. 2, представлены в работе [4].

В данной статье приведены результаты исследования технологических характеристик аппарата с вращающимся барабаном и насадкой, управляющей сегрегированными потоками материала в падающем слое (см. рис. 2), при его использовании для непрерывного приготовления смеси в случае порционного дозирования отдельных микрокомпонентов. Аналогичный процесс

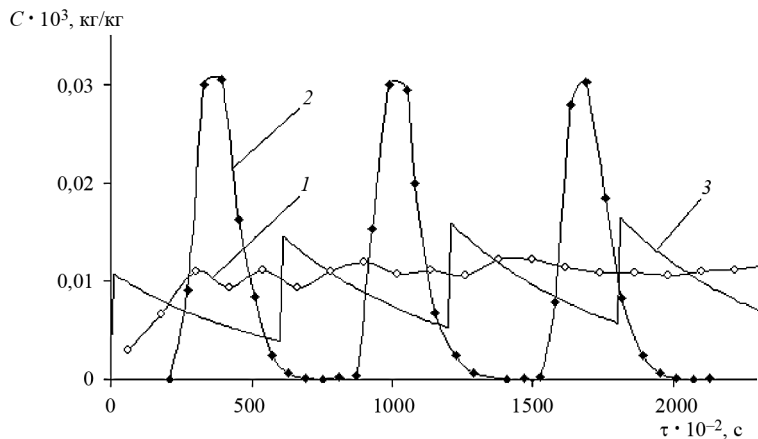


Рис. 4. Динамика процесса непрерывного приготовления смеси фракций +3...4 и +6...7 мм зернистого материала при порционном дозировании одного из компонентов в аппарате с управлением (1) и без управления (2, 3) сегрегированными потоками:

1, 2 — эксперимент; 3 — результаты моделирования процесса в идеальном смесителе

имеет место при непрерывной обработке семян микроэлементами и приготовлении сухих комбикормов, содержащих микродобавки. В результате оценки реализации такого рода процессов в работе [7] сделан вывод о том, что в этом случае "достичь требуемого качества смеси весьма затруднительно, особенно при высоких соотношениях смешиваемых компонентов".

Соединение непрерывного потока с микрокомпонентами представляет сложную комплексную технологическую задачу. На первом этапе ее решения необходимо обеспечить достаточно точное дозирование микрокомпонента, на втором — равномерное распределение компонента в потоке. Высокие требования по точности дозирования сыпучего микрокомпонента можно выполнить с использованием весового порционного дозатора. Однако его применение существенно осложняет задачу последующего равномерного распределения микроэлемента в непрерывном потоке. Опыт показывает, что высокая эффективность сглаживания импульсов порционной подачи микрокомпонента может быть достигнута в смесителе с управляемыми сегрегированными потоками смеси.

Необходимый сглаживающий эффект достигается благодаря воздействию обратными импульсами на сегрегированный поток, обогащенный микрокомпонентом. Для этого в аппарате с вращающимся бараба-

ном (см. рис. 2) выделяют сегрегированный поток падающих частиц, обогащенный микрокомпонентом, и обеспечивают его контакт с отклоняющимися элементами того ряда, в котором они направлены навстречу технологическому потоку, т.е. к загрузочному торцу барабана. Для оставшейся части потока падающих частиц контакт с отклоняющимися элементами исключается. Сглаживающий эффект обеспечивается за счет формирования в загрузочной части барабана буферной массы микрокомпонента и демпфирования пульсаций его концентрации в потоке цепочкой последовательных обратных импульсов, сообщаемых потоку отклоняющимися элементами. Время выхода смесителя на стационарный режим минимизируется путем предварительного размещения буферной массы микрокомпонента в загрузочной части барабана.

На рис. 4 представлены результаты опытной апробации процесса непрерывного смешивания фракций (+3...4 и +6...7 мм) модельного зернистого материала при весовом порционном дозировании одной из фракций с периодом подачи дозы 600 с. Среднее время пребывания материала в барабане составляло 360 с. Исследование проведено в аппарате с вращающимся барабаном диаметром 0,3 м и длиной 1,2 м (см. рис. 2) при производительности 150 кг/ч. Оно заключалось в определении зависимости концентрации смеси на выходе из смесителя

от времени в нестационарной фазе его функционирования при управлении (кривая 1) и без управления (кривая 2) сегрегированными потоками.

С целью более объективной оценки эффективности предложенного метода результаты экспериментального исследования на рис. 4 приведены в сравнении с динамикой процесса смешивания (кривая 3), полученной методом математического моделирования с использованием модели, представленной в работе [4], для смесителя с идеальным перемешиванием. Анализ результатов показывает, что барабанный аппарат с управлением сегрегированными потоками при использовании в качестве смесителя позволяет существенно увеличить сглаживающий эффект по сравнению с аппаратом традиционной конструкции и на порядок снизить коэффициент вариации концентрации смеси по сравнению с идеальным смесителем.

Выводы

Использование эффектов разделения неоднородных частиц при их взаимодействии в условиях гравитационного течения путем управления сегрегированными потоками в барабанном аппарате позволяет организовать процессы очистки семян злаковых и мелкосеменных овощных культур от трудноотделимых примесей и их калибровки по размеру и плотности. Кроме того, обеспечивается возможность организации процесса непрерывного приготовления смеси сыпучего материала с микроэлементами при порционной подаче последних с периодом, значительно превышающим среднее время пребывания материала в аппарате. Технологическое использование эффектов взаимодействия частиц в гравитационном потоке создает условия для обработки семян методами разделения и соединения при минимальном травмировании.

В заключение следует отметить, что во всех рассмотренных вариантах технологического использования аппарата у него сохраняется функция тепломассообменного устройства — сушилки. Избирательное целенаправленное управляющее воздействие импульсами на сегреги-

рованные части технологического потока обеспечивает достижение технологических эффектов сепарации, калибровки и смешивания без существенного увеличения энергетических затрат.

Литература и источники

1. Романенко Г. А. Достижения и перспективы развития аграрной науки России // АПК: экономика, управление. 2009, № 3. С. 3–7.

2. Тарасенко А. П., Мерчалова М. Э. Инновационное направление совершенствования послеуборочной обработки зерна // Лесотехнический журнал. 2013, № 3. С. 161–164.

3. Романенко Г. А., Михалев А. А., Лачуга Ю. Ф. и др. Совершенствовать инженерно-техническое обеспечение агропроизводства // Экономика сельского хозяйства России. 2004, № 5. С. 10–13.

4. Долгунин В. Н., Иванов О. О., Уколов А. А. и др. Процессы переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках // Теоретичес-

кие основы химической технологии. 2014, т. 48, № 4. С. 404–413.

5. Долгунин В. Н., Иванов О. О., Уколов А. А. Кинетика сегрегации частиц различной шероховатости и упругости при быстром гравитационном течении зернистой среды // Теоретические основы химической технологии. 2009, т. 43, № 2. С. 187–196.

6. Завражнов А. И., Тишанинов К. Н. Совершенствование технологии обработки зерна // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2010, № 3. С. 29–32.

7. Нанка О. В. Энергосбережение в механических процессах при приготовлении комбикормов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011, т. 5, № 11. С. 238–244.

References

1. Romanenko G. A. Achievements and development prospects of Russian agrarian science. *APK: ekonomika, upravlenie*. 2009, no. 3, pp. 3–7 (in Russ.).

2. Tarasenko A. P., Merchalova M. E. Innovative way of improving the post-harvest processing of grain. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2013, no. 3, pp. 161–164 (in Russ.).

3. Romanenko G. A., Mikhalev A. A., Lachuga Yu. F., Strebkov D. S., Chernoiyanov V. I., Limarev V. Ya. To improve the engineering and technical support of agricultural production. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii*. 2004, no. 5, pp. 10–13 (in Russ.).

4. Dolgunin V. N., Ivanov O. O., Ukolov A. A., Kudi A. N. Processing of granular materials in controlled segregated flows. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*. 2014, vol. 48, no. 4, pp. 404–413 (in Russ.).

5. Dolgunin V. N., Ivanov O. O., Ukolov A. A. Segregation kinetics of particles with different roughnesses and elasticities under a rapid gravity flow of a granular medium. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*. 2009, vol. 43, no. 2, pp. 187–196 (in Russ.).

6. Zavrazhnov A. I., Tishaninov K. N. Improvement of technology of grain processing. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2010, no. 3, pp. 29–32 (in Russ.).

7. Nanka O. V. Energy saving in mechanical processes during mixed feed preparation. *Pratsi Tavriys'kogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu*. 2011, vol. 5, no. 11, pp. 238–244 (in Russ.).