

УДК-631.3

К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ И КАЛИБРОВКИ СЕМЯН МЕЛКОСЕМЕННЫХ КУЛЬТУР

Виктор Николаевич Долгунин

доктор технических наук, профессор

dolgunin-vn@yandex.ru

Андрей Андреевич Жило

аспирант

zhilo97@mail.ru

Тамбовский государственный технический университет

г. Тамбов, Россия

Аннотация. Проведен анализ технологических проблем в производстве семян овощных культур. Сделан вывод о недостаточно развитой технической базе для очистки и калибровки мелких неоднородных по размеру, плотности и форме семян с высокими эффектами взаимной связности. Выявлены перспективы использования эффектов квазидиффузионной сепарации и сегрегации в быстром гравитационном потоке семян для их сепарации и калибровки по размеру и плотности. Определены структурные и кинематические параметры потока в гипотетических условиях его организации для преодоления связности семян и интенсификации процесса их сепарации по комплексу свойств.

Ключевые слова: мелкие семена, эффект связности, сепарация, быстрый гравитационный поток, сегрегация, квазидиффузионная сепарация.

Среди многих задач импортозамещения в агропромышленном комплексе, связанных с обеспечением продовольственной безопасности государства, наиболее актуальной задачей является формирование надежно функционирующей отечественной системы семеноводства. Особенно важна такого рода задача в овощеводстве, развитие которого напрямую связано с качеством семенного материала. Вследствие низкого качества отечественных семян многих овощных культур, не соответствующих требованиям стандарта высоких посевных качеств, доля импортного семенного материала на отечественном рынке достигла в предыдущем десятилетии 80% [1]. Анализ показывает, что низкий уровень отечественной системы семеноводства овощных культур является следствием комплекса причин, основными из которых являются низкая эффективность селекционной деятельности и недостаточно развитая технологическая база для воспроизводства семян.

Сказанное в полной мере подтверждается результатами экспертной оценки состояния развития отечественного овощеводства [2]: «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». При этом обращает на себя внимание противоположная ситуация в отечественной системе семеноводства зерновых культур, которая практически полностью удовлетворяет потребности рынка семян [1]. На основе приведенной информации можно сделать вывод о наличии специфических требований к технологической базе для подготовки семян овощных культур, которая, очевидно, не может быть сформирована путем прямой адаптации аналогичной базы для зерновых культур. Специфические требования являются следствием особых свойств семян овощей, многие из которых относятся к мелкосеменным культурам (морковь, капуста, сельдерей, репа и др.).

Вследствие маленького размера семян и ярко выраженного их полидисперсного состава проявляется эффект связности частиц в насыпках семенного материала. Причем эффект связности усиливается для неоднородных

частиц неправильной формы, которая характерна для семян некоторых овощных культур (моркови, петрушки, сельдерея). Полидисперсный состав, неправильная и неоднородная форма семян, их высокая неоднородность по плотности в сочетании с эффектом связности серьезно ограничивают возможности традиционных технологий и оборудования для очистки, калибровки и сортировки. Одним из наиболее универсальных показателей качества семян, имеющим прямую корреляцию с показателями их продуктивности (всхожести и энергии прорастания), является масса тысячи зерен. Семена с наибольшей массой характеризуются более высоким потенциалом агробиологической активности, вследствие более высокого запаса питательных веществ и потенциальной активности физиологических механизмов. Традиционные технологии выделения наиболее ценного семенного материала предполагают последовательное выполнение операций фракционирования семян по геометрическим параметрам и плотности. Реализация традиционных технологий в случае сложной формы семян приводит к необходимости проведения комплекса операций фракционирования по трем геометрическим размерам (длине, ширине, толщине) с последующим их сепарированием по плотности.

Однако в результате многоступенчатого последовательного фракционирования и сепарирования семян по геометрическим параметрам, форме и аэродинамическим характеристикам происходит существенная потеря ценного семенного материала с наиболее высокой продуктивностью [3]. Это является следствием снижения физиологической активности семян в результате продолжительного жесткого механического воздействия на них со стороны рабочих органов оборудования и рассеяния биологически ценного семенного материала по фракциям на множестве ступеней сепарации.

Исследования и практический опыт показывают [4], что уменьшение числа операций сепарирования семян и их осуществление в отсутствие жесткого механического воздействия на семенной материал возможно путем организации процессов в быстром гравитационном потоке. Быстрый

гравитационный поток формируется на шероховатых гравитационных скатах при углах, близких углу естественного откоса материала, и характеризуется наличием быстрых сдвиговых деформаций зернистой среды, которые сопровождаются дилатансией потока при доминировании взаимодействий частиц в режиме ударных столкновений. Ударные взаимодействия неоднородных частиц сопровождаются эффектами сепарации, один из которых (*сегрегация*) обусловлен релаксацией концентраций напряжений, а второй (*квазидиффузионная сепарация*) - неоднородностью пространственного распределения твердой фазы в сдвиговом потоке [5].

Величина потока *сегрегации* выражается в пропорциональной зависимости от движущей силы $\Delta\vec{M}$ и коэффициента скорости K_s

$$\vec{j}_s = K_s c \rho \Delta\vec{M}, \quad (1)$$

где $c\rho$ - объемная концентрация контрольных частиц.

Движущая сила $\Delta\vec{M}$ вычисляется как избыточный момент сил тяжести, трения и ударных импульсов, действующих на контрольную частицу, по отношению к моменту аналогичных сил, действующих на частицу зернистой среды с осредненными свойствами [5]. Коэффициент сегрегации K_s определяется как скорость относительного перемещения контрольной частицы в расчете на единицу движущей силы в потоке однородной зернистой среды на шероховатом скате экспериментальным методом [5].

Квазидиффузионная сепарация является следствием хаотических перемещений частиц, генерируемых их соударениями при быстром сдвиговом течении зернистого материала [5]. Квазидиффузионные флуктуации частиц сопровождаются эффектами перемешивания и сепарации. Необходимым условием для квазидиффузионной сепарации, которая имеет физическое подобие с молекулярной термо-бародиффузией, является различие скоростей флуктуаций частиц и неоднородное распределение объемной доли пустот в потоке. При таком условии в сдвиговом потоке инициируется встречное перемещение частиц с высокими и низкими скоростями хаотических

перемещений. Частицы, имеющие высокую скорость хаотических перемещений, смещаются в направлении градиента объемной доли пустот, т.е. в области потока с высокой свободой для флуктуаций. Напротив, частицы с низкими скоростями хаотических перемещений мигрируют в противоположном направлении, т.е. в области потока с ограниченной свободой для флуктуаций.

В соответствии с физической природой квазидиффузионной сепарации ее движущая сила определена в виде относительного значения градиента среднего расстояния s между частицами $1/s(\partial s/\partial y)$. Коэффициент скорости квазидиффузионной сепарации D_m для бинарной смеси негладких несвязных сферических частиц вычисляют аналитически с учетом комплекса их свойств как величину потока взаимной квазидиффузии при движущей силе процесса равной единице [5]. Интенсивность потока квазидиффузионной сепарации \vec{j}_m контрольных частиц компонента при их объемной концентрации $c\rho$ выражена как

$$\vec{j}_m = c\rho D_m \partial \ln s / \partial y . \quad (2)$$

В результате учета потока конвекции в направлении ската x и потоков сепарации (1), (2) и перемешивания в поперечном направлении y на базе общего уравнения массопереноса получают общее уравнение динамики сепарации, описывающее распределение концентрации контрольных частиц $c(x,y,t)$ при установившемся гравитационном течении зернистого материала [5]

$$\frac{\partial(c\rho)}{\partial t} = -\frac{\partial(uc\rho)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \left(D_{dif} \frac{\partial c}{\partial y} - cD_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} - K_s c \Delta M \right) \right], \quad (3)$$

где: D_{dif} – аналитически определяемый коэффициент квазидиффузионного перемешивания [5]; $u(y)$ – осредненное локальное значение скорости в направлении ската; t – время. Динамику поля концентрации $c(x,y,t)$ моделируют путем интегрирования уравнения (3) численным методом при условиях на нижней ($y=0$) и верхней ($y=h$) границах потока

$$D_{dif} \frac{\partial c}{\partial y} = cD_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} = K_s c \Delta M \Big|_{y=0,h} = 0 \quad (4)$$

и начальном условии $c(0, x, y) = c_0$, где c_0 - средняя концентрация контрольных частиц. Согласно уравнению (3) для моделирования сепарации необходимо располагать информацией о структурно-кинематических характеристиках течения в виде профиля скорости $u(y)$ и распределения объемной доли пустот $\varepsilon(y)$, которое однозначно связано с профилем среднего расстояния между частицами $s(y)$. Профили $u(y)$ и $\varepsilon(y)$ связаны между собой уравнением состояния зернистой среды в условиях быстрого гравитационного течения [5], которое позволяет по известному одному из профилей определять соответствующий ему другой профиль [5].

В рамках статьи моделирование динамики сепарации на базе уравнения (3) используется для прогнозирования и обоснования параметров гравитационного течения в искусственных условиях его организации, способствующих достижению высокой эффективности сепарации. Такого рода искусственно формируемые условия гравитационных течений имеют, очевидно, особенно важное значение для сепарации связных зернистых материалов, к которым относятся семена мелкосеменных культур. Структурно-кинематические параметры искусственно формируемых вариантов течений определяются путем варьирования либо формой профиля скорости $u(y)$ (скоростью сдвига) с целью интенсификации сегрегации (1), либо формой распределения объемной доли пустот $\varepsilon(y)$ с целью интенсификации квазидиффузионной сепарации (2). При названных вариантах варьирования параметрами течения, согласно кинетическим зависимостям (1) и (2), осуществляется прямое воздействие на движущую силу и, соответственно, интенсивность эффектов сегрегации и квазидиффузионной сепарации.

Анализ кинетических зависимостей (1) и (2) и результаты математического и физического моделирования процесса сепарации [5] свидетельствуют, что эффект сегрегации протекает при доминирующем

значении различия частиц по размеру. Интенсивность же эффекта квазидиффузионной сепарации зависит от комплекса отличительных свойств частиц – плотности, шероховатости, упругости и размера без доминирующего значения последнего. В связи с этим, исследование влияния скорости сдвига (профиля скорости) на процесс сепарации проводили с использованием гипотетической смеси семян, содержащей 12 % примеси с относительным их размером 1,1. Оценку эффективности сепарации осуществляли путем вычисления коэффициента вариации (неоднородности) распределения V концентрации частиц примеси в потоке на шероховатом скате. Поиск гидродинамических параметров гравитационного потока, обеспечивающих наиболее высокую интенсивность сепарации частиц по размеру, проводили путем изменения профиля скорости в направлении увеличения среднего значения скорости сдвига от 40 с^{-1} (в условиях только гравитационного воздействия) до 110 с^{-1} (в условиях гипотетического комплексного воздействия). При инвариантных значениях толщины слоя и величины потока установлено, что эффективность разделения резко увеличивается с повышением скорости сдвига до $80 \pm 5 \text{ с}^{-1}$ и столь же резко уменьшается при дальнейшем повышении скорости сдвига (рисунок 1). Наблюдаемое снижение коэффициента вариации объясняется постепенным переходом доминирующей роли в формировании распределений неоднородных частиц от сегрегации к квазидиффузионным эффектам перемешивания и сепарации с увеличением объемной доли пустот.

Поиск параметров течения, благоприятных для квазидиффузионной сепарации, проводили путем моделирования процесса сепарации по плотности примеси (12 % масс.) плотных частиц как одному из важнейших среди комплекса отличительных свойств семян. Поскольку движущей силой квазидиффузионной сепарации (2) является градиент среднего расстояния между частицами, а последнее пропорционально объемной доле пустот, то поиск благоприятных параметров течения для сепарации по плотности осуществляли путем варьирования формой профиля доли пустот в слое. Анализ

возможных форм профилей (линейного, параболического, гиперболического) показывает, что наибольшим средним по объему слоя значением градиента объемной доли пустот характеризуются параболические профили с экстремальными (максимальным и минимальным) значениями доли пустот в центральной части потока. Результаты моделирования (рисунок 2) свидетельствуют, что существенно более высокая интенсивность сепарации частиц по плотности достигается в гравитационном потоке с параболическим профилем объемной доли пустот при максимальном ее значении в центральной части потока. С учетом примерно одинаковых средних значений движущей силы сепарации (градиентов объемной доли пустот) для альтернативных вариантов профилей, наблюдаемый эффект может быть объяснен более высокими значениями диффузионного проникания в потоке с максимальным значением доли пустот в его центральной части.

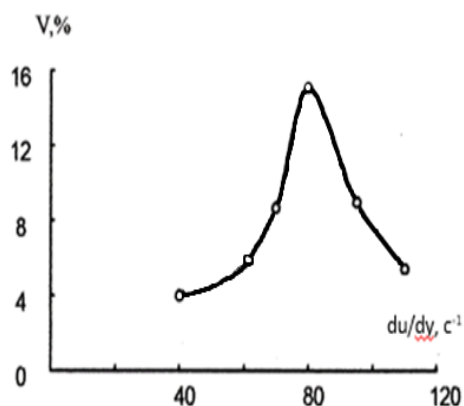


Рисунок 1 – Коэффициент неоднородности распределения примеси (12 % масс.) крупных частиц с относительным размером 1,1 в быстрых гравитационных потоках с различным средним значением скорости сдвига

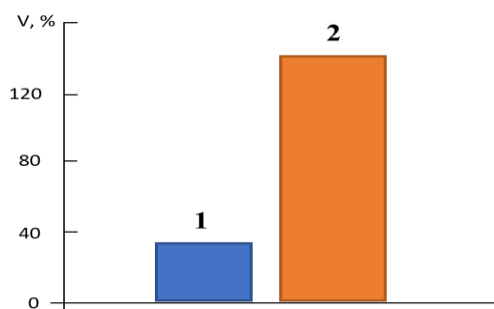


Рисунок 2 – Коэффициент неоднородности распределения примеси (12 % масс.) плотных частиц с относительной плотностью 1,6 в быстрых гравитационных потоках с параболическим распределением объемной доли пустот при минимальном (1) и максимальном (2) ее значении в центральной части слоя

Таким образом, результаты исследования формируют научную основу для принятия решений по интенсификации эффектов квазидиффузионной сепарации и сегрегации при организации процессов очистки, калибровки и сепарации семян с использованием принципа управления сегрегированными потоками [6].

Список литературы:

1. Место России в мировом рынке семян / Электронный ресурс. URL: http://оксанич.рф/attachments/073_Роль%России%20в%20мировом%рынке%20семян.pdf (дата обращения 10.03.2023г.)
2. Романенко Г.А. Достижения и перспективы развития аграрной науки России // АПК: экономика, управление. 2009. №3. с. 3-7.
3. Балданов В.Б., Ямпиров С.С., Хандакова Г.Ж. Влияние основных параметров гравитационного сепаратора на эффективность очистки зерна от мелкой примеси // Вестник ВСГУТУ. 2015. № 3. С. 16-21.
4. Куди А.Н., Федосов Н. А., Сергеев В. В., Тараканов А. Г., Пронин В. А. Мультифракционное сепарирование различающихся по форме и плотности полидисперсных частиц // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2021. Т. 27. № 2. С. 285-293.
5. Долгунин В.Н., Куди А.Н., Туев М.А. Механизмы и кинетика гравитационной сепарации гранулированных материалов // Успехи физических наук. 2020. Т. 190. № 6. С. 583-604.
6. Долгунин В.Н., Иванов О.О., Уколов А.А., Куди А.Н. Процессы переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках // Теор. основы хим. технол. 2014. Т. 48. № 4. с. 403-413.

UDC -631.3

TO THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR CLEANING AND CALIBRATION OF SMALL SEEDS

Viktor N. Dolgunin

doctor of technical sciences, professor

dolgunin-vn@yandex.ru

Andrey A. Zhilo

postgraduate student

zhilo97@mail.ru

Tambov State Technical University

Tambov, Russia

Abstract. The analysis of technological problems in the production of vegetable seeds is carried out. It is concluded that there is an insufficiently developed technical base for cleaning and calibration of small seeds that are nonuniform in size, density and shape with high effects of mutual cohesion. The prospects of using the effects of quasi-diffusion separation and segregation in a fast gravity flow of seeds for their separation and calibration by size and density are revealed. The structural and kinematic parameters of the flow in hypothetical conditions of its organization are determined to overcome the cohesion effect of seeds and to intensify the process of their separation according to a complex of properties.

Key words: small seeds, cohesion effect, separation, fast gravity flow, segregation, quasi-diffusion separation,

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2022; принята к публикации 30.06.2023.

The article was submitted 30.03.2023; approved after reviewing 30.05.2022; accepted for publication 30.06.2023.