

На правах рукописи



РЫНДИН Александр Алексеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРОСЕПАРИРОВАНИЯ
ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ ОТ ЛЕГКИХ ПРИМЕСЕЙ**

Специальность:

05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет пищевых производств» (ФГБОУ ВО «МГУПП»).

Научный руководитель -

доктор технических наук, доцент

Стрелюхина Алла Николаевна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»

Официальные оппоненты -

Оробинский Владимир Иванович

доктор сельскохозяйственных наук, профессор
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» декан агроинженерного факультета

Кандрок Роман Хажсетович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Всероссийский Научно-Исследовательский
Институт Зерна и продуктов его переработки
(ВНИИЗ) филиал Федерального
государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный научный центр
пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН,
старший научный сотрудник

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
учреждение высшего образования «Кубанский
государственный технологический
университет», г. Краснодар

Защита диссертации состоится «19» сентября 2019 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036 г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета.

Автореферат размещен на сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <http://vak3.ed.gov.ru> и ВГУИТ <http://www.vsuet.ru> «5» июля 2019 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «20» июня 2019 г.

Автореферат разослан «12» августа 2019 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций

на соискание ученой степени кандидата наук,

на соискание ученой степени доктора наук

Д 212.035.01



Л.Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Продукты питания, произведенные из зерна пшеницы, занимают существенное место в рационе питания населения нашей страны. Благодаря им пищевой рацион обеспечивается по калорийности на 40%, белками - на 50%, углеводами - на 60%. Это объясняет требования к качеству зерна по засоренности, влажности и хлебопекарным свойствам. Очевидно, что не существует способов, позволяющих выпускать высококачественные и полезные пищевые продукты из низкокачественного зернового сырья. Практически установлено и экономически обосновано, что проще произвести качественное сырье, чем пытаться устранить дефекты в процессе переработки некондиционного сырья.

Чистота зерна – один из важнейших показателей, формирующих качество муки и зерновых продуктов. Поэтому вопрос извлечения из зерна сорных примесей находится под пристальным вниманием и аграриев и переработчиков.

Анализ существующих проблем позволил сделать выводы, подтверждающие актуальность диссертационной работы:

- повышение урожайности зерновых культур зависит от качества семенного материала и отсутствия в нем посторонних примесей;
- зерно с повышенной засоренностью снижает качество муки, используемой для изготовления пищевых продуктов и ведет к росту себестоимости;
- решение проблемы уменьшения примесей в зерне возможно путем совершенствования процессов сепарирования и используемой техники.

Тема диссертации непосредственно связана с продовольственной безопасностью государства, поскольку вытекает из потребностей отрасли производства зерна и его переработки для пищевой промышленности, повышения эффективности воспроизводства злаковых культур и улучшения семенного фонда.

Степень разработанности проблемы. О значимости качественной очистки зерновых культур от примесей в сельском хозяйстве, может свидетельствовать большое количество научных работ по этому направлению. Учебные заведения страны, готовящие специалистов сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности, постоянно ведут работы по усовершенствованию существующих зерноочистительных машин и разработке новых, позволяющих повысить извлекаемость примесей из зерновой смеси. Наибольших успехов в этом направлении добились Воронежский государственный аграрный университет, Бурятская сельскохозяйственная академия, Алтайский государственный аграрный университет.

Повышение эффективности процесса очистки зерна на элеваторах, мукомольных и крупяных предприятиях стало возможно благодаря научным работам, проводимым Московским государственным университетом пищевых производств, Воронежским государственным университет инженерных технологий, Кубанским государственным технологическим университетом и другими. Преподаватели этих учебных заведений внесли не только огромный вклад в формирование научных основ процессов сепарирования, но и предложили ряд передовых технических решений для применения в зерновых сепараторах, сформулировали требования к качеству готового продукта, семенному и продовольственному зерну.

В процессе первичной очистки на элеваторах из убранного зерна извлекают примеси органического и минерального происхождения. Хорошо выполненная первичная очистка обеспечивает сохранность зерна и его качественных показателей,

снижает затраты на сушку и последующую обработку, предотвращает самосогревание.

На качество зерна после обработки на элеваторе существенно влияют: правильность подбора зерноочистительных машин, качество технологических процессов очистки и сушки.

Правилами организации и ведения технологического процесса на мукомольных заводах установлена предельно допустимая засоренность зерна не более 2%. По данным мелькомбинатов зерно, поступающее на переработку, имеет фактическую засоренность сорной примесью около 2,5%. В последние годы наблюдается повышение засоренности зерна семенами дикорастущих растений, например, такой трудноотделимой примесью как овсюг.

Цель диссертационной работы. Повышение качества очистки зерна от трудно извлекаемых легких примесей за счет совершенствования процесса сепарирования и его аппаратного оформления.

Научная новизна работы.

- предложена и обоснована динамическая модель послойного безотрывного движения сыпучего тела при прямолинейных гармонических колебаниях наклонной рифленной поверхности перпендикулярно линии наибольшего ската;

- разработана модель двуслойного вибрационного перемещения зернового потока по поверхности с рифлями в виде прямоугольных пластин при их расположении перпендикулярно направлению колебаний;

- теоретически обосновано и экспериментально доказано, что верхний слой зернового потока, расположенный над рифлями, совершает сложное движение, состоящее из двух движений во взаимно перпендикулярных направлениях: колебательное движение относительно линии наибольшего ската и движение вдоль линии наибольшего ската;

- теоретически обоснована и доказана возможность транспортирования частиц нижнего слоя между рифлями под действием составляющей силы тяжести вдоль линии наибольшего ската;

- научно обоснован и практически реализован способ очистки зерна от легких примесей, заключающийся в том, что при вибрационном перемещении по рифленной поверхности из исходной зерновой смеси извлекают указанные примеси с эффективностью очистки, превышающей эффективность очистки зерна от легких примесей в воздушных сепараторах.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

Теоретическая значимость:

- разработана динамическая модель послойного безотрывного движения смеси зерна пшеницы и легких примесей на наклонной рабочей поверхности с рифлями при ее гармонических колебаниях, направленных перпендикулярно рифлям;

- теоретически подтверждена возможность реализации в предложенной модели течения слоев зернового потока с максимальной разностью скоростей для обеспечения стабильного процесса самосортирования;

- проведен анализ полученных аналитических зависимостей с целью выявления влияния переменных параметров процесса сепарирования на траекторию частиц верхнего слоя сыпучей смеси;

- определены направления интенсификации процесса сепарирования;

- адекватность разработанных теоретических положений подтверждена экспериментальными исследованиями.

Практическая значимость:

- экспериментально определены зависимости эффективности процесса сепарирования и интенсивности выделения легких примесей из нижнего слоя от удельной нагрузки, частоты колебания и угла наклона рабочего органа;

- разработана оригинальная конструкция рабочего органа вибросепаратора, позволяющая обеспечить эффективность извлечения легких примесей из зерна пшеницы не менее 80 % и существенно снизить нагрузку на пневмоканал.

- получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель «Устройство для сепарирования зерна и других сыпучих материалов», заявка № 2019102339/03(004090), от 29.01.2019 г.;

- предложены схемы применения разработанных рабочих органов в различных технологических схемах;

- разработаны программы расчета кинематических параметров частиц верхнего и нижнего слоев зернового потока;

- разработаны исходные требования на проектирование рабочего органа с рифлями и ножом для деления зернового потока;

- расчетное увеличение прибыли от внедрения разработанного рабочего органа составит 508 000 рублей в год.

Методология и методы диссертационного исследования.

Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых в области применения вибрации для интенсификации технологических процессов. Методология научного исследования обеспечивает соответствие его структуры и содержания задачам исследования, включая его методы, проверку истинности полученных результатов и их интерпретацию. Используются методы, учитывающие специфику объекта изучения: системный подход; проектный метод, определяющий целостность исследования, стадии и порядок его разработки; абстрактно-логический метод, включающий анализ и синтез, дедукцию и индукцию; эмпирический метод, связанный с постановкой экспериментальных проверок теории и наблюдений; методы математического моделирования; статистический метод обработки экспериментов.

Диссертационная работа методологически выдержанная и характеризуется корректной, научно обоснованной постановкой проблемы исследования, которая не только существует в теории, но может быть разработана практически с получением научных результатов, обладающих признаками новизны, полезности и достоверности.

Положения, выносимые на защиту:

- динамическая модель послыного безотрывного движения сыпучего тела при прямолинейных гармонических колебаниях наклонной рифленой поверхности перпендикулярно рифлям;

- результаты анализа аналитических зависимостей траекторий частицы верхнего слоя сыпучего продукта от частоты колебаний, угла наклона рабочего органа и удельной нагрузки на рабочую поверхность;

- результаты экспериментального исследования зависимости эффективности и интенсивности процесса выделения легких примесей от переменных параметров процесса;

- оригинальность конструкции устройства для очистки зерна от легких примесей.

Апробация работы:

Основные материалы диссертационной работы были представлены для обсуждения на 3 конференциях с международным участием:

- III Всероссийской научно-практической конференции имени Академика РАН Юрия Антоновича Израэля с международным участием (Москва 2018);
- Международной научно-технической конференции «Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение» (Воронеж 2018);
- 29 симпозиуме по реологии (Тверь 2018).

Созданная, по результатам исследований диссертационной работы, рабочая поверхность для вибросепаратора прошла испытания на сельскохозяйственных предприятиях Краснодарского края, что подтвердило заявленные качественные характеристики.

Публикации

По материалам диссертационного исследования опубликовано 9 печатных работ, из них 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК. Получено решение о выдаче патента на полезную модель «Устройство для сепарирования зерна и других сыпучих материалов». Заявка № 2019102339/03(004090) от 29.01.2019.

Созданный в рамках выполненной работы орган для вибросепаратора «Устройство позволяющее существенно улучшить качество очистки семенного и продовольственного зерна», был включен в Каталог инновационных разработок в области переработки сельскохозяйственного сырья 2018 года.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из: введения, четырех глав; выводов и предложений; литературы, включающей 134 источника; 8 приложений.

Диссертация содержит 182 страницы, 39 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описано состояния сложившегося в Российской Федерации с качеством семенной и продовольственной пшеницы, как одного из факторов продовольственной безопасности страны. Обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе систематизированы данные из литературы о качественных требованиях предъявляемых к семенному, продовольственному и фуражному зерну пшеницы. Осуществлена классификация примесей встречающихся в зерновой смеси пшеницы. Проанализированы существующие способы очистки зерна пшеницы от примесей и представлены их достоинства и недостатки.

Обобщены труды и кратко представлены основные положения теории перемещения однослойных и двухслойных сыпучих сред.

Подробно рассмотрены процессы и оборудование для очистки зерна от легких примесей. Представлен анализ конструктивных решений, используемых в зерновых сепараторах, и возможные пути интенсификации процесса самосортирования зерновой смеси, как важнейшего способа повышения качества извлечения легких примесей.

На основании выполненного анализа сформулированы цель и задачи

диссертационной работы, обоснованы направления исследований и определены методы решения поставленных задач.

Во второй главе представлены теоретические предпосылки послойного движения зернового потока на вибрирующей рифленной поверхности.

Описание рабочего органа и процесса вибрационного перемещения зерновой смеси. Плоская рабочая поверхность 1 (рисунок 1), наклонённая к горизонтали под углом α , совершает поступательные гармонические колебания по прямой, образующей с линией наибольшего ската поверхности угол, равный 90° . На рабочей поверхности на некотором расстоянии друг от друга расположены рифлы 2, которые выполнены в виде прямолинейных пластин. Рифлы установлены параллельно друг другу вдоль линии наибольшего ската рабочей поверхности. Зерновая смесь равномерно поступает на приёмный участок рабочей поверхности, расположенный у торцевой стенки 3, и образует на рабочей поверхности поток постоянной толщины, непрерывно движущийся от приёмного участка к противоположному сходовому участку поверхности. Толщина зернового потока больше высоты рифлей.

Частицы зерновой смеси, расположенные на различных расстояниях от рабочей (опорной) поверхности, имеют различия в движении вследствие неодинаковых условий связи с окружающими частицами и опорной поверхностью. Наименьшей подвижностью обладают частицы нижнего слоя зернового потока, заполняющие пространство между рифлями опорной поверхности.

Нижний слой зернового потока совершает колебания вместе с рабочей поверхностью. Верхний слой связан с нижним только силами трения, причем коэффициент сопротивления сдвигу слоёв уменьшается по мере приближения к верхней (свободной) поверхности зернового потока. Это обуславливает интенсивное послойное движение сыпучего тела и сопутствующее ему самосортирование, которое заключается во всплывании в верхние слои частиц меньшей плотности и большего размера и в погружении в нижние слои зернового потока частиц большей плотности и меньшего размера.

Расположение рифлей перпендикулярно направлению колебаний означает, что нижний слой зернового потока неподвижен относительно поверхности в направлении её колебаний. Таким образом, на рабочей поверхности созданы условия для повышения интенсивности послойного движения зернового потока.

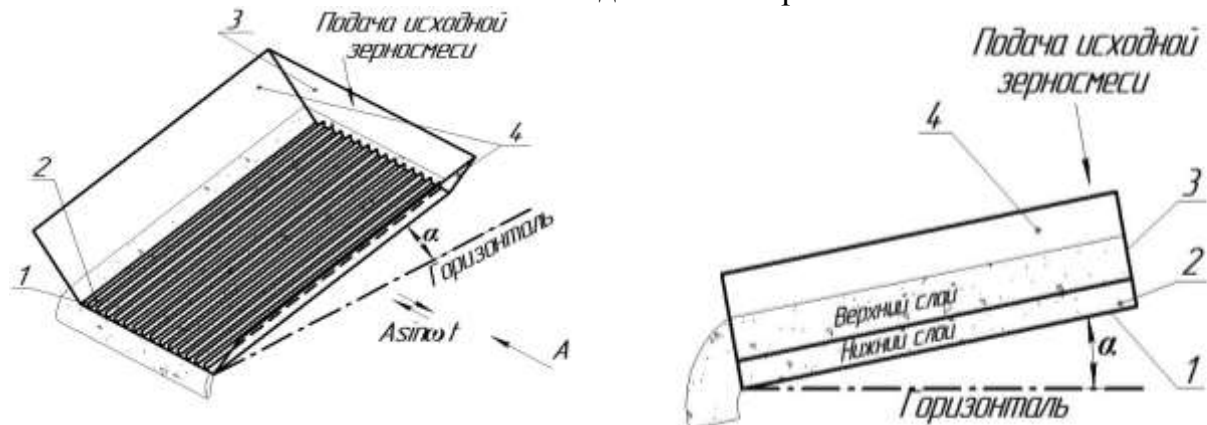


Рисунок -1. Схема рабочего органа и потока сыпучего тела на вибрирующей поверхности при непрерывной подаче исходной зерносмеси.

Верхний слой зернового потока совершает движение относительно

поверхности под действием двух взаимно перпендикулярных сил: силы инерции переносного движения и составляющей силы тяжести (скатывающей силы), направленной вдоль линии наибольшего ската поверхности. При этом, частицы верхнего слоя совершают сложное движение, которое может быть представлено состоящим из движений в двух взаимно перпендикулярных направлениях: колебательное движение относительно линии наибольшего ската и движение вдоль линии наибольшего ската.

Для описания вибрационного перемещения зерновой смеси на предлагаемой опорной поверхности рассмотрим двуслойную модель, в которую внесем изменения, обусловленные наличием на опорной поверхности рифлей в виде прямолинейных пластин. Будем считать верхний слой материальной точкой массой m_B , которая связана силами сухого трения с нижним слоем, совершающим колебания вместе с рабочим органом. Следовательно, при исследовании движения верхнего слоя зернового потока будем рассматривать движение материальной точки на наклонной плоскости, совершающей горизонтальные гармонические колебания в направлении, перпендикулярном линии наибольшего ската. При исследовании движения нижнего слоя рассмотрим элемент объёма между смежными рифлями, считая его материальной точкой, которая движется между смежными рифлями без образования зазоров и, следовательно, без ударов о боковые поверхности рифлей. При этом вследствие колебаний рабочего органа материальная частица имеет попеременно силовой контакт с боковой поверхностью то одной рифли, то другой.

Движение верхнего слоя. Сложное движение материальной частицы рассмотрим как сумму переносного (вместе с рабочей поверхностью) и относительного (относительно поверхности) в системе координат xuz , жестко связанной с рабочим органом. Оси системы координат расположены следующим образом: ось x направлена вдоль рифлей (пластин); ось y – перпендикулярно пластинам (перпендикулярно линии наибольшего ската поверхности); ось z – перпендикулярно плоскости рабочей поверхности (рис. 2).

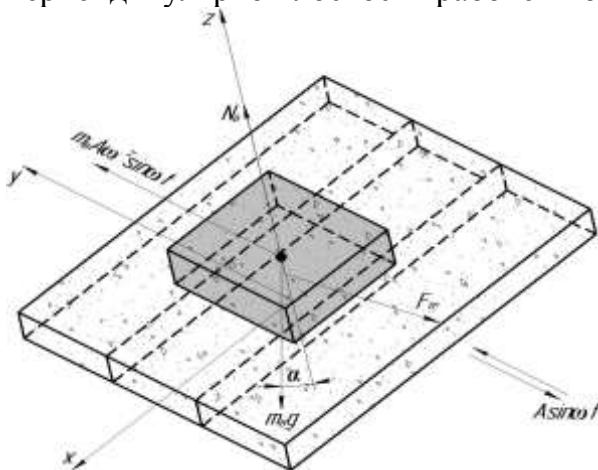


Рисунок 2. - Схема сил, действующих на частицу массой m_B .

Рабочая поверхность совершает горизонтальные гармонические колебания по закону

$$\left. \begin{aligned} y &= A \sin \omega t \\ \dot{y} &= A \omega \cos \omega t \\ \ddot{y} &= -A \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где A и ω – амплитуда и частота колебаний рабочей поверхности.

На рисунке 2 представлена схема сил, действующих на частицу массой m_B : $P_B = m_B A \omega^2 \sin \omega t$ – сила инерции переносного движения; $m_B g$ – сила тяжести частицы; N_B – нормальная реакция нижнего слоя; $F_{\text{ТР}}$ – сила трения о нижний слой, совершающий колебания вместе с рабочей поверхностью.

Сила трения $F_{\text{ТР}}$ направлена против относительной скорости V_{B-H} – верхнего слоя относительно нижнего и образует с осью y угол ν .

Условие движения материальной частицы относительно рабочей поверхности имеет вид

$$\sqrt{(m_B A \omega^2 \sin \omega t)^2 + (m_B g \sin \alpha)^2} \geq F_{\text{ТР}}. \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения относительного движения частицы в проекциях на оси координат для случая скольжения частицы в положительном направлении оси y имеют вид

$$m_B \ddot{x} = m_B g \sin \alpha - F_{\text{ТР}} \sin \nu; \quad (3)$$

$$m_B \ddot{y} = m_B A \omega^2 \sin \omega t - F_{\text{ТР}} \cos \nu \operatorname{sign} \dot{y}; \quad (4)$$

$$m_B \ddot{z} = -m_B g \cos \alpha + N_B. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае движение частицы вдоль оси x возможно только в положительном направлении. Знак проекции силы трения $F_{\text{ТР}}$ на ось x не зависит от направления скольжения частицы вдоль оси y . При скольжении частицы вдоль оси y имеет место симметрия движущих сил и сил сопротивления относительному движению частицы.

Так как движение частицы происходит без подбрасывания, то $z = \text{const}$ и $\ddot{z} = 0$, из уравнения (5) получим выражение силы нормального давления

$$N_B = m_B g \cos \alpha. \quad (6)$$

Следовательно

$$F_{\text{ТР}} = N_B f_c = m_B g f_c \cos \alpha, \quad (7)$$

где f_c – коэффициент сопротивления сдвигу верхнего слоя относительно нижнего.

Преобразуем неравенство (2) и подставим в него выражение силы трения $F_{\text{ТР}}$ из уравнения (7), получим

$$(m_B A \omega^2 \sin \omega t)^2 + (m_B g \sin \alpha)^2 \geq (m_B g f_c \cos \alpha)^2. \quad (8)$$

Первое слагаемое неравенства (8) является переменной величиной, зависящей от времени. Максимальное значение по абсолютной величине это слагаемое принимает при $|\sin \omega t| = 1$. Следовательно, угол ν , который сила трения $F_{\text{ТР}}$ образует с осью y , является переменной величиной, зависящей от величины силы инерции переносного движения. Из неравенства (8) следует, что условие начала относительного движения частицы может быть представлено в виде

$$(m_B A \omega^2 \sin \delta)_{\min} = \sqrt{(m_B g f_c \cos \alpha)^2 - (m_B g \sin \alpha)^2}, \quad (9)$$

где $\delta = \omega t$ – фазовый угол, аналог безразмерного времени.

Тогда минимальное значение силы P_B инерции переносного движения, при котором частица может начинать относительное движение имеет вид

$$(P_B)_{\min} = m_B g \sqrt{(f_c \cos \alpha)^2 - \sin^2 \alpha}. \quad (10)$$

Минимальное и максимальное значения угла ν могут быть определены по формулам

$$v_{\max} = \arcsin \frac{\sin \alpha}{f_c \cos \alpha}. \quad (11)$$

$$v_{\min} = \operatorname{arctg} \frac{g \sin \alpha}{A \omega^2}. \quad (12)$$

Анализ приведенных формул позволил сделать следующие выводы. Максимальное значение угла ν не зависит от кинематических параметров (амплитуда и частота) колебаний рабочей поверхности, а зависит от угла α наклона поверхности к горизонтали и от коэффициента f_c . Минимальное значение угла ν зависит от амплитуды и частоты колебаний рабочей поверхности и от угла α её наклона к горизонтали. Поскольку угол ν изменяется в достаточно узком диапазоне его значений, будем считать его ν постоянным и примем его значение как среднее максимального и минимального значений.

Преобразуя (3) и (4) с учетом (7) получаем

$$\ddot{x} = g \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \quad (13)$$

и

$$\ddot{y} = A \omega^2 \cdot \left(\sin \delta \mp \frac{g f_c \cos \alpha \cos \nu}{A \omega^2} \right). \quad (14)$$

В уравнении (14) верхний знак в выражении, стоящем в круглых скобках, соответствует скольжению частицы в положительном направлении оси y , нижний знак – в отрицательном.

Обозначим

$$Z_{\pm} = \pm \frac{g f_c \cos \alpha \cos \nu}{A \omega^2}. \quad (15)$$

Тогда уравнение (14) приводим к виду

$$\ddot{y} = A \omega^2 \cdot (\sin \delta - Z_{\pm}). \quad (16)$$

Обозначим фазовые углы δ , при которых начинается относительное скольжение частицы в положительном и отрицательном направлениях оси y , соответственно δ_{1+} и δ_{1-} , а фазовые углы окончания этих скольжений соответственно δ_{2+} и δ_{2-} .

Скольжение частицы в положительном направлении оси y может начаться, если $\ddot{y} \geq 0$, то есть при $\sin \delta_{1+} \geq Z_+$, где Z_+ – безразмерный параметр сопротивления относительно движению частицы в положительном направлении оси y . Скольжение частицы в отрицательном направлении может начаться, если $\ddot{y} \leq 0$, то есть при $\sin \delta_{1-} \leq Z_-$.

Для определения зависимости скорости частицы при её скольжении в положительном направлении оси y проинтегрируем уравнение (16) в пределах от $\dot{y} = 0$ до текущего значения скорости $\dot{y} > 0$ и от δ_{1+} до текущего значения фазового угла δ . Зависимость скорости имеет вид

$$\dot{y}(\delta) = A \omega \cdot [(\cos \delta_{1+} - \cos \delta) - Z_+ \cdot (\delta - \delta_{1+})]. \quad (17)$$

Правая часть уравнения обращается в ноль в мгновение прекращения скольжения частицы в положительном направлении оси y , то есть при $\delta = \delta_{2+}$. Поэтому после подстановки $\delta = \delta_{2+}$ в уравнение (17) имеем

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = Z_+ \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+}). \quad (18)$$

Проведем аналогичные преобразования при скольжении в отрицательном

направлении, получим

$$\cos\delta_{1-} - \cos\delta_{2-} = Z_- \cdot (\delta_{2-} - \delta_{1-}). \quad (19)$$

Начало движения частицы в каждом из направлений совпадает по времени и фазовому углу с окончанием движения в противоположном направлении, то есть должно выполняться условие

$$\begin{cases} \delta_{1-} = \delta_{2+} \\ \delta_{2-} = \delta_{1+} + 2\pi \end{cases}. \quad (20)$$

Подставим значения фазовых углов δ_{1-} и δ_{2-} из системы уравнений (20) в уравнение (19) и после преобразований получим

$$\cos\delta_{1+} - \cos\delta_{2+} = Z_- \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+} - 2\pi). \quad (21)$$

Из уравнения (18) и (21), имея в виду, что $Z_- = -Z_+$, получим

$$\delta_{2+} - \delta_{1+} = \pi. \quad (22)$$

аналогично

$$\delta_{2-} - \delta_{1-} = \pi. \quad (23)$$

При установившемся движении частицы в режиме 2 при выполнении условия $Z_+ = |Z_-|$ фазовые углы начала и окончания скольжения в каждом из направлений отличаются друг от друга на π .

Максимальное значение параметра $Z_+ = (Z_+)_{2\max}$, при котором частица совершает движение относительно рабочей поверхности в режиме 2 равно

$$(Z_+)_{2\max} = \frac{2}{\sqrt{4 + \pi^2}} = 0,537. \quad (24)$$

Аналогично имеем $(Z_-)_{2\min} = -0,537$.

Аналитические выражения для определения фазовых углов δ_{1+} и δ_{2+} получены в виде

$$\delta_{1+} = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\pi Z_+}{2}; \quad (25)$$

$$\delta_{2+} = \frac{3\pi}{2} - \arcsin \frac{\pi Z_+}{2}. \quad (26)$$

Следующим этапом решения рассматриваемой задачи вибрационного перемещения является определение траектории частицы при её движении относительно поверхности.

Для определения зависимости перемещения частицы в положительном направлении оси y проинтегрируем уравнение (17) в пределах от δ_{1+} до текущего значения фазового угла $\delta < \delta_{2+}$ и от $y = 0$ до текущего значения перемещения $y_+ > 0$.

При интегрировании имеем в виду, что $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$, $\delta = \omega t$ и $\dot{y} = \frac{\omega dy}{d\delta}$. Получаем

$$y_+(\delta) = A \cdot \left[(\cos\delta_{1+} + Z_+ \delta_{1+}) \cdot (\delta - \delta_{1+}) - (\sin\delta - \sin\delta_{1+}) - Z_+ \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1+}^2}{2} \right]. \quad (27)$$

Аналогично определим зависимость перемещения в отрицательном направлении оси y

$$y_-(\delta) = A \cdot \left[(\cos\delta_{1-} + Z_- \delta_{1-}) \cdot (\delta - \delta_{1-}) - (\sin\delta - \sin\delta_{1-}) - Z_- \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1-}^2}{2} \right]. \quad (28)$$

Полные перемещения частицы в положительном y_+ и в отрицательном y_-

направлениях оси y получим, подставив в уравнение (27) $\delta = \delta_{2+}$, а в уравнение (28) $\delta = \delta_{2-}$.

Для определения зависимости скорости частицы вдоль оси x проинтегрируем уравнение (13) в пределах от δ_{1+} до текущего значения фазового угла $\delta < 2\pi + \delta_{1+}$ и от $\dot{x} = 0$ до текущего значения скорости $\dot{x} > 0$

$$\dot{x}(\delta) = \frac{g}{\omega} \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot (\delta - \delta_{1+}). \quad (29)$$

Для определения зависимости перемещения частицы вдоль оси x проинтегрируем уравнение (29) в тех же пределах

$$x(\delta) = \frac{g}{\omega^2} \cdot \left[-(\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \delta_{1+} \cdot (\delta - \delta_{1+}) + (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1+}^2}{2} \right]. \quad (30)$$

Для определения полного перемещения частицы вдоль оси x подставим в уравнение (28) $\delta = 2\pi + \delta_{1+}$, получим

$$x_+ = \frac{2\pi^2 g}{\omega^2} \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu). \quad (31)$$

Средняя скорость частицы вдоль оси x определяется по формуле

$$V_{\text{CP}} = \frac{x_+ \omega}{2\pi} = \frac{\pi g (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu)}{\omega}. \quad (32)$$

При построении траектории частицы верхнего слоя относительно рабочей поверхности вычисляем её координаты y и x при одинаковых текущих значениях фазового угла δ , лежащих в интервале значений соответствующих интервалам относительного движения частицы. При скольжении частицы относительно поверхности в режиме 2 координату y вычисляем по уравнениям (27) и (28). В уравнении (27) текущее значение фазового угла изменяется в интервале от δ_{1+} до δ_{2+} , в уравнении (28) – от δ_{1-} до δ_{2-} . Координату x вычисляем по уравнению (30). При этом текущее значение фазового угла изменяется в интервале от δ_{1+} до δ_{2-} .

Движение нижнего слоя. При исследовании движения частиц нижнего слоя рассматриваем элемент объёма сыпучего тела между смежными рифлями, считая его материальной точкой. Она связана силами сухого трения с вышележащим слоем, с опорной поверхностью и попеременно с боковой поверхностью то одной, то другой рифли. Отличие настоящей задачи вибрационного перемещения заключается в том, что наклонная рабочая поверхность совершает горизонтальные гармонические колебания в направлении, перпендикулярном линии наибольшего ската поверхности, а рифли в виде прямоугольных пластин расположены на поверхности параллельно линии наибольшего ската, то есть перпендикулярно направлению колебаний.

На рисунке 3 изображена схема принятой модели материальной частицы массой m_H и показаны действующие на неё силы: $P_H = m_H A \omega^2 \sin \omega t$ – сила инерции в переносном движении; $m_H g$ – сила тяжести частицы; $m_B g$ – сила тяжести частицы верхнего слоя, расположенной над частицей нижнего слоя; N_1 – нормальная реакция опорной поверхности рабочего органа; N_2 – нормальная реакция со стороны боковой поверхности рифли (пластины), с которой частица имеет силовой контакт; $F_1 = N_1 f_1$ – сила трения о днище рабочего органа, где f_1 – коэффициент трения частицы по днищу рабочего органа; $F_2 = N_2 f_2$ – сила трения о боковую поверхность рифли, с

которой частица имеет силовой контакт, где f_2 – коэффициент трения частицы о боковую поверхность рифли; $F_{\text{ТР}} = m_B g f_c \cos \alpha$ – сила трения со стороны вышележащего слоя.

Сила трения $F_{\text{ТР}}$ направлена против относительной скорости V_{H-B} нижнего слоя относительно верхнего образует с осью y угол ν .

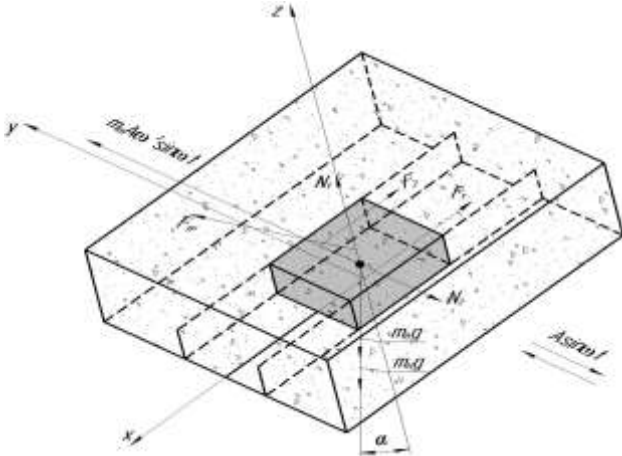


Рисунок 3. - Схема сил, действующих на частицу нижнего слоя в относительном движении.

Вследствие гармоничности колебаний рабочей поверхности и симметрии её шероховатости существует симметрия сил сопротивления относительному движению и переносной силы инерции. Поэтому в первом приближении будем считать движение верхнего слоя вдоль оси y гармоническим.

На рисунке 3 представлена схема сил, действующих на частицу для случая её силового контакта с левой рифлей и при скольжении верхнего слоя в положительном направлении оси y . В этом случае сила трения образует с осью y острый угол ($\nu < 90^\circ$).

В соответствии с принятым допущением частица нижнего слоя на интервале изменения фазового угла $0 \leq \delta \leq \pi$ имеет силовой контакт с левой рифлей (пластиной), а верхний слой скользит в положительном направлении оси y . На интервале $\pi \leq \delta \leq 2\pi$ частица имеет силовой контакт с правой рифлей и верхний слой скользит в отрицательном направлении оси y .

Дифференциальные уравнения относительного движения частицы нижнего слоя в проекциях на оси координат при силовом контакте с левой рифлей (пластиной) на интервале изменения фазового угла $0 \leq \delta \leq \pi$ имеют вид

$$m_H \ddot{x} = -F_1 - F_2 + (m_H + m_B)g \sin \alpha + m_B g f_c \cos \alpha \sin \nu, \quad (33)$$

$$m_H \ddot{y} = m_H A \omega^2 \sin \omega t - N_2 + m_B g f_c \cos \alpha \cos \nu, \quad (34)$$

$$m_H \ddot{z} = N_1 - (m_H + m_B)g \cos \alpha. \quad (35)$$

Движение частицы относительно рабочей поверхности происходит без подбрасывания, то есть $z = \text{const}$ и $\ddot{z} = 0$.

Движение вдоль оси y отсутствует из-за упора в рифлю (пластину). Следовательно, $y = \text{const}$ и $\ddot{y} = 0$. Из уравнений (34) и (35) получаем выражения для N_1 и N_2 .

Для упрощения дальнейших рассуждений введем обозначения: $f_1 = \text{tg} \rho_1$, где ρ_1 – угол трения о плоскость рабочей поверхности; $f_2 = \text{tg} \rho_2$, где ρ_2 – угол трения о

боковую поверхность рифли; $\mu = \frac{m_B}{m_H}$ – отношение массы частицы верхнего слоя к массе частицы нижнего. Если считать, что зерновая смесь по толщине зернового потока имеет одинаковую плотность, то $\mu = \frac{h_B}{h_H}$, где h_B – высота (толщина) верхнего слоя; h_H – высота нижнего слоя.

После преобразований получим

$$\ddot{x} = A\omega^2 \operatorname{tg}\rho_2 \left\{ \frac{g}{A\omega^2 \operatorname{tg}\rho_2} \left[\mu f_c \cos\alpha \frac{\sin(\nu - \rho_2)}{\cos\rho_2} - (1 + \mu) \frac{\sin(\rho_1 - \alpha)}{\cos\rho_1} \right] - \sin\delta \right\}. \quad (36)$$

Обозначим

$$a = A\omega^2 \operatorname{tg}\rho_2, \quad (37)$$

$$Z_+^{\text{I}} = \frac{g}{A\omega^2 \operatorname{tg}\rho_2} \left[\mu f_c \cos\alpha \frac{\sin(\nu - \rho_2)}{\cos\rho_2} - (1 + \mu) \frac{\sin(\rho_1 - \alpha)}{\cos\rho_1} \right]. \quad (38)$$

Получим

$$\ddot{x} = a \cdot (Z_+^{\text{I}} - \sin\delta). \quad (39)$$

При силовом контакте частицы с правой рифлей и скольжении верхнего слоя в отрицательном направлении оси y дифференциальное уравнение относительного движения частицы нижнего слоя в проекции на ось y имеет вид

$$m_H \ddot{y} = m_H A\omega^2 \sin\delta + N_2 - m_B g f_c \cos\alpha \cos\nu. \quad (40)$$

Отметим, что в этом случае дифференциальные уравнения относительного движения частицы нижнего слоя в проекциях на оси x и z имеют соответственно вид уравнений (33) и (35). Проекция силы трения F_{TP} на ось x имеет знак плюс независимо от направления скольжения верхнего слоя вдоль оси y .

Получим

$$\ddot{x} = a(Z_+^{\text{II}} + \sin\delta). \quad (41)$$

Параметры Z_+^{I} и Z_+^{II} равны друг другу – $Z_+^{\text{I}} = Z_+^{\text{II}} = Z$.

Обобщая уравнения относительного движения частицы нижнего слоя между смежными рифлями, имеем

$$\ddot{x} = a(Z - \sin\delta) \quad \text{при } 0 \leq \delta \leq \pi, \quad (42)$$

$$\ddot{x} = a(Z + \sin\delta) \quad \text{при } \pi \leq \delta \leq 2\pi. \quad (43)$$

Из уравнения (37) следует, что параметр a является величиной положительной ($a > 0$). Условия существования относительного движения частицы могут быть выражены следующими неравенствами

$$Z - \sin\delta > 0 \quad \text{при } 0 \leq \delta \leq \pi \quad (44)$$

и

$$Z + \sin\delta > 0 \quad \text{при } \pi \leq \delta \leq 2\pi. \quad (45)$$

Если $Z < 0$, то имеет место относительный покой частицы. Движение частицы возможно, если $Z > 0$. Очевидно, что неравенства (44) и (45) выполняются в течение всего периода колебаний рабочей поверхности, если $Z \geq 1$.

Определим диапазон значений параметра Z , при которых существует режим скольжения частицы с паузами. Считаем, что начальная скорость \dot{x}_H частицы равна нулю. Возможны два типа движения: 1 – мгновенно начинающееся скольжение

частицы в положительном направлении оси x ; 2 – относительный покой (пауза – длительная остановка). Поэтому, весь интервал времени (фазового угла), в течение которого рассматриваем относительное движение частицы, можно разбить на два подынтервала: подынтервал, в любой момент времени которого частица, имеющая начальную скорость равную нулю, мгновенно начинает скольжение в положительном направлении оси x ; подынтервал, в любой момент времени которого частица, имеющая скорость равную нулю, продолжает оставаться в состоянии относительного покоя. Первый из перечисленных выше подынтервалов обозначим I_+ , второй подынтервал – I_0 . Следует заметить, что частица, имеющая скорость равную нулю на подынтервале I_0 , продолжает оставаться в состоянии относительного покоя до мгновения перехода к подынтервалу I_+ .

Разбиение временной оси (оси фазового угла $\delta = \omega t$) на подынтервалы представлено на рисунке 4., на котором построен график функции $y_a = \sin \delta$, а также проведены прямые $y_a = Z$ и $y_a = -Z$. Абсциссы точек пересечения прямых с синусоидой определяют границы указанных выше подынтервалов.

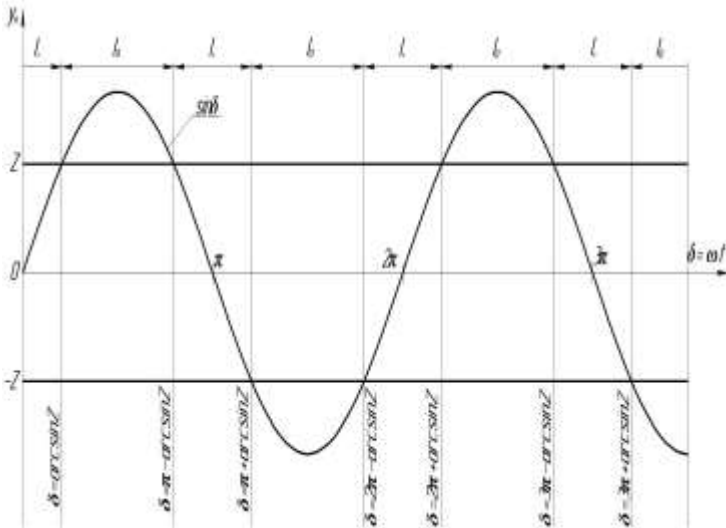


Рисунок 4. - Разбиение временной оси (оси фазового угла $\delta = \omega t$) на подынтервалы.

На подынтервале I_+ частица движется относительно поверхности ускоренно, а на подынтервале I_0 – замедленно.

Как отмечено выше, если частица совершает движение относительно рабочей поверхности в режиме с паузами, то скорость частицы может обращаться в ноль только на подынтервале I_0 , границей которого является значение фазового угла δ , равное $\delta = \arcsin Z$, правой границей – $\delta = \pi - \arcsin Z$, где $\arcsin Z$ главное значение функции, лежащее в пределах $\left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right]$. Для удобства уравнения (42) и (43)

приведем к безразмерному выражению. Для этого разделим обе части уравнений на величину параметра a . Введём понятие безразмерного времени $\delta = \omega t$. Штрихами обозначим дифференцирование по безразмерному времени. Уравнения (42) и (43) в безразмерном выражении соответственно имеют вид

$$x'' = Z - \sin \delta \quad \text{при } 0 \leq \delta \leq \pi \quad (46)$$

и

$$x'' = Z + \sin \delta \quad \text{при } \pi \leq \delta \leq 2\pi. \quad (47)$$

Введем следующие обозначения: δ_{1-1} – момент времени в безразмерном

выражении (фазовый угол) начала относительного движения частицы в первом полупериоде колебаний рабочей поверхности, равный $\delta_{1-1} = \pi - \arcsin Z$; δ_{2-1} – момент времени, соответствующий прекращению относительного скольжения частицы в первом полупериоде, лежит на интервале $\pi + \arcsin Z < \delta < 2\pi - \arcsin Z$; δ_{1-2} – момент времени, соответствующий началу движения после паузы во втором полупериоде колебаний поверхности, равный $\delta_{1-2} = 2\pi - \arcsin Z$; δ_{2-2} – момент времени в безразмерном выражении окончания скольжения во втором полупериоде.

Для определения зависимости скорости на первом подинтервале движения проинтегрируем уравнение (46) в пределах от $\delta = \pi - \arcsin Z - \delta_{1-1}$ до текущего значения $\delta < \pi$ и от $x' = 0$ до текущего значения $x' > 0$.

При подстановке в полученную зависимость $\delta = \pi$, получаем скорость в конце первого подинтервала движения. Эта скорость является начальной на втором подинтервале движения.

Определим зависимость скорости на следующем интервале относительного движения частицы в пределах от $\delta = \pi$ до текущего значения безразмерного времени $\delta < 2\pi$, получим

$$x'(\delta) = Z\delta - \cos\delta - 2 - Z\delta_{1-1} - \cos\delta_{1-1}. \quad (48)$$

В случае скольжения частицы с паузами скорость частицы обращается в ноль на подинтервале I_0 , границами которого являются следующие значения безразмерного времени: левая граница – $\delta = \pi + \arcsin Z$; правая граница – $\delta = 2\pi - \arcsin Z$.

Рассмотрим относительное движение частицы во втором полупериоде колебаний поверхности. После паузы частица во втором полупериоде колебаний поверхности начинает относительное скольжение при

$$\delta_{1-2} = 2\pi - \arcsin Z. \quad (49)$$

В конце рассматриваемого интервала времени ($\delta_{1-2} \leq \delta \leq 2\pi$) частица имеет скорость:

$$x'_{K2} = Z(2\pi - \delta_{1-2}) - 1 + \cos\delta_{1-2}. \quad (50)$$

Эта скорость является конечной скоростью на рассматриваемом интервале и начальной скоростью на следующем интервале относительного движения частицы.

Скорость частицы на интервале от $\delta = 2\pi$ до фазового угла прекращения ее скольжения, после преобразований равна

$$x'(\delta) = Z\delta + \cos\delta - 2 - Z\delta_{1-2} + \cos\delta_{1-2}. \quad (51)$$

Скорость частицы обращается в ноль на подинтервале I_0 , границами которого являются следующие значения безразмерного времени: левая граница – $\delta = 2\pi + \arcsin Z$; правая граница – $\delta = 3\pi - \arcsin Z$.

Фазовые углы δ_{1-1} и δ_{1-2} начала относительного движения частицы, соответственно в первом и во втором полупериодах колебаний рабочей поверхности, отличаются друг от друга на величину π , т.е.

$$\delta_{1-2} = \delta_{1-1} + \pi. \quad (52)$$

На рисунке 5 представлены зависимости $\delta_{1-1}(Z)$, $\delta_{1-2}(Z)$, $\delta_{2-1}(Z)$ и $\delta_{2-2}(Z)$ фазовых углов начала и окончания относительного движения частицы в первом и втором полупериодах колебаний рабочей поверхности. Для построения зависимостей были выполнены расчеты значений углов для различных значений параметра Z ,

отвечающих условию относительного движения частицы.

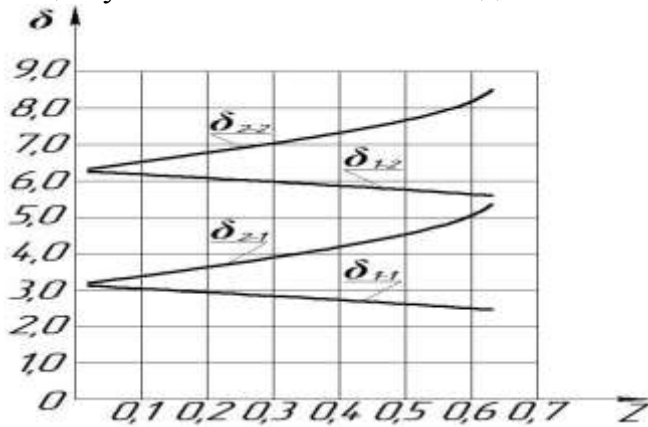


Рисунок 5. - Зависимости фазовых углов начала и окончания относительного движения частицы в первом и втором полупериодах колебаний рабочей поверхности.

Нахождение границ интервалов, в которых существует относительное движение частиц, позволяет, после определенных математических преобразований, получить взаимосвязанные зависимости для перемещения частицы:

полное перемещение в первом полупериоде колебаний поверхности равно,

$$x_{1+} = x_{1+1} + Z \cdot \frac{\delta_{2-1}^2 - \pi^2}{2} - \sin \delta_{2-1} - (2 + Z\delta_{1-1} + \cos \delta_{1-1})(\delta_{2-1} - \pi); \quad (53)$$

где

$$x_{1+1} = Z \cdot \frac{\pi^2 - \delta_{1-1}^2}{2} - \sin \delta_{1-1} - (Z\delta_{1-1} + \cos \delta_{1-1})(\pi - \delta_{1-1}); \quad (54)$$

полное перемещение во втором полупериоде колебаний поверхности равно

$$x_{2+} = x_{1+2} + Z \cdot \frac{\delta_{2-2}^2 - 4\pi^2}{2} + \sin \delta_{2-2} - (2 + Z\delta_{1-2} - \cos \delta_{1-2})(\delta_{2-2} - 2\pi); \quad (55)$$

где

$$x_{1+2} = Z \cdot \frac{4\pi^2 - \delta_{1-2}^2}{2} + \sin \delta_{1-2} - (Z\delta_{1-2} - \cos \delta_{1-2})(2\pi - \delta_{1-2}); \quad (56)$$

полное перемещение в безразмерном выражении за период колебаний поверхности равно

$$x_+ = x_{1+} + x_{2+} = 2x_{1+} = 2x_{2+} \quad (57)$$

Легко доказать, что $x_{1+} = x_{2+}$.

Используя последние зависимости, можно получить уравнения для определения скоростей и ускорений.

Величина безразмерной средней скорости частицы в установившемся движении при её скольжении относительно поверхности в режиме одностороннего скольжения с двумя паузами определяется по формуле

$$x'_{CP} = \frac{x_{1+}}{\pi} = \frac{x_{2+}}{\pi}. \quad (58)$$

Переход от величины безразмерной средней скорости частицы x'_{CP} к величине размерной средней скорости V_{CP} осуществляют путем умножения безразмерной величины средней скорости на коэффициент, равный $\frac{a}{\omega} = A \omega t g \rho_2$.

Проверка адекватности теоретических предпосылок была осуществлена и описана в Главе 3.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по основным положениям, представленным в диссертационной работе. Выявлены

закономерности изменения качественных показателей процесса сепарирования: E - эффективность сепарирования; I - интенсивность извлечения легкой примеси зернового слоя; η_n - процентное содержание легких примесей в нижнем слое; η_v - процентное содержание легких примесей в верхнем слое.

Для исследования эффективности процесса сепарирования зерна, спроектирован и создан рабочий орган (рисунок 6), который представляет собой стальную опорную поверхность, наклоненную к горизонту под незначительным углом, чтобы в покое поверхность являлась самотормозящей и отсутствовало самопроизвольное скольжение зерновой смеси.

Рабочий орган 1 ограничен торцевой стенкой 2, двумя боковыми стенками 3 и опорной поверхностью, с выполненными на ней вдоль линии наибольшего ската рифлями 4, выполненными в виде трапеции с высотой от 5мм до 20мм и с шагом 10 мм, между которыми происходит скольжение нижнего слоя обрабатываемой зерновой смеси. Установленный нож 7 разрезает зерновой поток на две части (фракции).

Рабочий орган совершает перпендикулярные сходу зерновой смеси возвратно-поступательные колебания. Для сообщения колебаний рабочей поверхности использована установка, представленная на рисунке 8.

Установка позволяет варьировать число колебаний рабочего органа в пределах от 0 до 500 в минуту, угол наклона опорной поверхности от 0 до 10°, удельную нагрузку на единицу ширины опорной поверхности от 0 до 2 кг/см*мин.

На рисунке 7 для удобства изображения и понимания рабочий орган с тележкой и направляющими условно изображены повернутыми на 90 градусов.

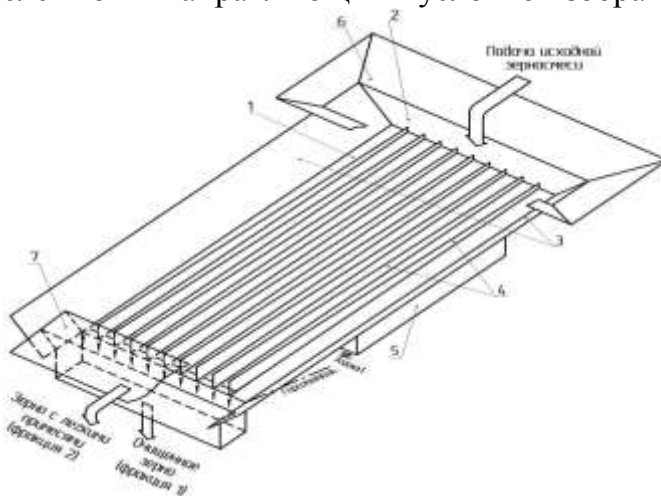


Рисунок 6. - Схема рабочего органа: 1- рабочий орган; 2-торцевая стенка; 3- боковые стенки; 4- рифли; 5- привод; 6 - питатель; 7- нож.

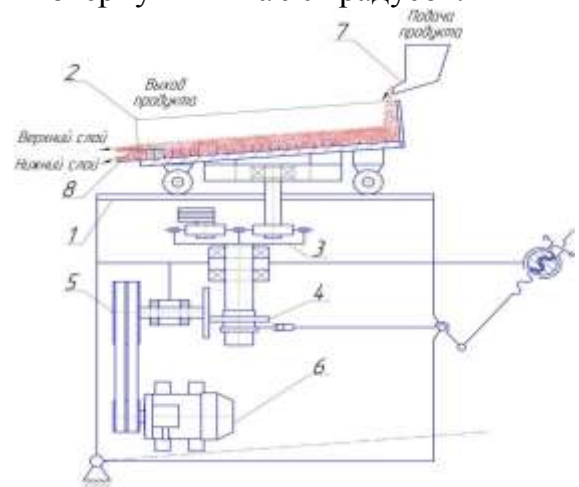


Рисунок 7. - Схема экспериментальной установки: 1 – станина; 2 – канал с закрепленной опорной поверхностью; 3 – эксцентрик; 4 – вариатор; 5 – ременная передача; 6 – электродвигатель; 7-питатель; 8-нож.

Влияние удельной нагрузки на рабочий орган.

Удельная нагрузка q на рабочий орган определяет производительность сепаратора, что является одной из основных технических характеристик машин. При постоянной ширине рабочего органа удельная нагрузка определяет толщину слоя зерновой смеси на опорной поверхности. Рост толщины слоя приводит к возрастанию сопротивления перемещению легких примесей из нижнего слоя в верхний, несмотря

на то, что при вибрационном воздействии увеличивается порозность слоя сыпучих материалов. Вибрационные перемещения опорной поверхности направлены параллельно этой поверхности, что не оказывает уплотняющего воздействия на поток смеси зерна и легких примесей.

На рисунке 8 представлены зависимости степени засоренности легкими примесями нижнего (график 1) и верхнего (график 2) слоев смеси, эффективности извлечения примеси из нижнего слоя (график 3) и интенсивности извлечения примеси (график 4) от удельной нагрузки при частоте колебаний рабочего органа 190 кол/мин, амплитуде 25 мм, угле наклона рабочего органа $3,5^\circ$.

Из графиков на рисунке 8, можно сделать вывод, что в исследованном диапазоне изменения q подтверждена высокая эффективность процесса извлечения легких примесей из нижнего слоя зернового потока, особенно при малых q , когда извлекается до 92% от исходного количества легких примесей.

Влияние частоты колебаний рабочего органа.

На рисунке 9 представлены зависимости для нижнего слоя: засоренности легкими примесями (график 1), эффективности сепарирования (график 2) и интенсивности извлечения примесей (график 3) от частоты колебаний рабочего органа при удельной нагрузке 0,193 кг/см.мин, угле наклона рабочего органа $3,5^\circ$.

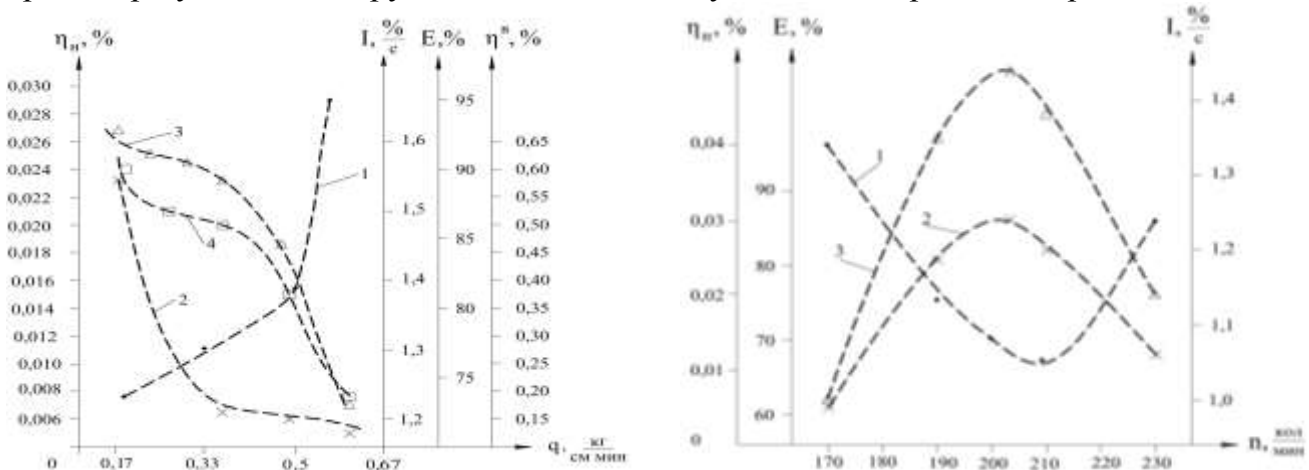


Рисунок 8. - Зависимости η_n - (1); η_v - (2); E - (3); I - (4) от удельной нагрузки на рабочий орган. Рисунок 9. - Зависимости η_n (1), E (2), I (3) от частоты колебаний рабочего органа.

Как видно, кривая засоренности имеет четкий минимум в диапазоне частот 195...210 кол/мин., что объясняется следующим образом. Одной из составляющих движущей силы для частиц зернового слоя является сила инерции, пропорциональная квадрату частоты колебаний. Увеличение частоты колебаний приводит к резкому росту движущей силы и скорости частиц. При этом возрастает влияние боковых стенок рабочего органа и наблюдается возникновение перемешивания сыпучей смеси, снижающего эффективность послынного движения и извлечения легких примесей из нижнего слоя.

Как видно из графиков, при увеличении частоты колебаний от 190 до 200 кол/мин эффективность и интенсивность извлечения возрастает в 1,4 раза. Дальнейшее увеличение частоты колебаний приводит к уменьшению параметров E и I .

Таким образом, существует определенный диапазон частот рабочего органа (от 190 до 210 кол/мин), который может быть рекомендован как наиболее целесообразный с позиции эффективности изучаемого процесса.

Влияние угла наклона рабочей поверхности α .

На рисунке 10 показано влияние угла наклона опорной поверхности рабочего органа к горизонту на засоренность нижнего слоя, эффективность и интенсивность извлечения примеси при изменении удельной нагрузки и постоянной $n=200$ кол/мин. Как и следовало ожидать, с увеличением угла α изменяется засоренность нижнего слоя, возрастает эффективность и интенсивность извлечения легких примесей. Влияние угла наклона объясняется изменением проекции силы тяжести частиц нижнего слоя на опорную поверхность рабочего органа, что приводит к изменению скорости движения частиц и времени пребывания частиц в зоне вибрационного воздействия.

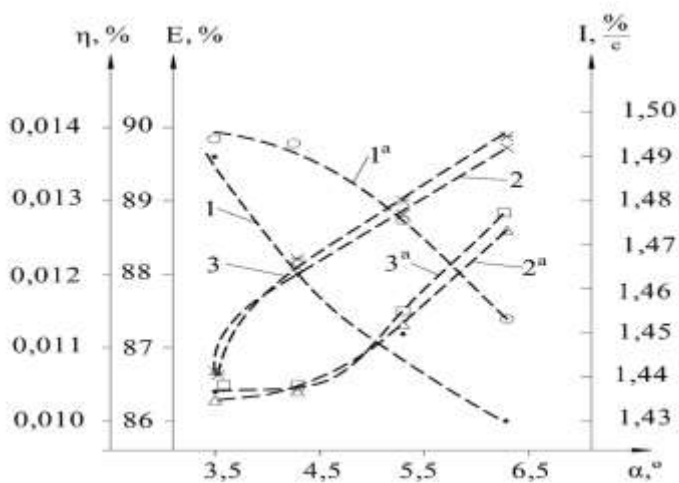


Рисунок 10. - Зависимости η_n , E , I от угла наклона опорной поверхности рабочего органа при изменении удельной нагрузки: η_n - (1, 1а); E - (2, 2а); I - (3, 3-а); 1, 2, 3 – при $q=0,2$ кг/см мин; 1а, 2а, 3а – при $q=0,27$ кг/см мин.

При изменении угла α от $3,5^0$ до $6,3^0$ засоренность нижнего слоя легкими примесями уменьшилась примерно в 1,3 раза, эффективность и интенсивность процесса увеличились в 1,03 раз. При удельной нагрузке q , равной $0,266$ кг/см мин изменение угла α от $3,5^0$ до $4,3^0$ практически не оказывало влияния на качественные показатели.

В диссертационной работе приведены результаты математической обработки всех эмпирических зависимостей, представленных в Главе 3, аналитические выражения, величины коэффициентов, результаты проверки погрешностей.

Экспериментальная проверка адекватности теоретических положений.

Исследование движения частиц верхнего слоя.

Исследование проведено с целью определения траектории частицы, расположенной под слоем зерна, при ее движении относительно колеблющейся с различной частотой рабочей поверхности. Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с результатами расчетов с использованием разработанной математической модели и программы, приведенной в Приложении к диссертации.

На рисунке 11 приведен один из вариантов исследования.

Определение средней скорости движения частиц нижнего слоя.

Основной задачей экспериментов данного раздела было подтверждение адекватности аналитических зависимостей, описанных во второй главе.

Эксперимент проводили при изменении частоты колебаний рабочего органа от 200 до 250 кол/мин. Остальные параметры оставались постоянными.

На рисунке 12 представлены результаты аналитических и экспериментальных

определений средней скорости частицы нижнего слоя в зависимости от частоты колебаний рифленной рабочей поверхности. Анализ результатов показал, что изменения n от 200 до 250 кол/мин приводит к увеличению средней скорости нижнего слоя в 1,7 раза. Были определены величины погрешности

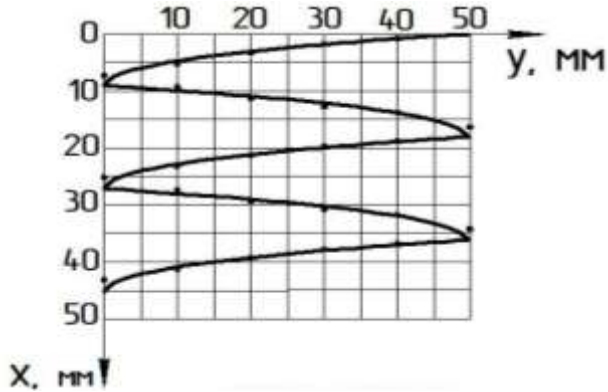


Рисунок 11. - Траектория частицы верхнего слоя: ● - экспериментальная; — - расчетная.

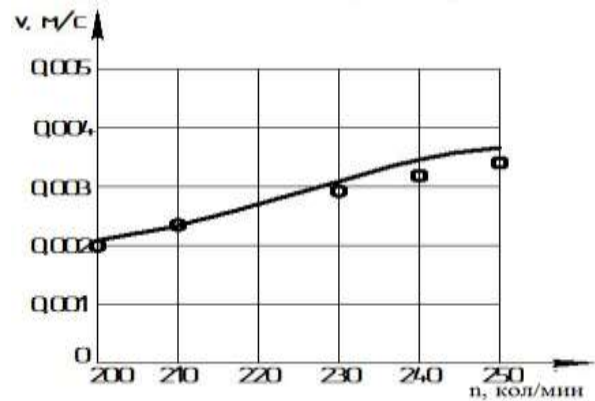


Рисунок 12. - Скорость движения частицы нижнего слоя: ● - экспериментальная; — - расчетная.

Анализ полученных результатов показал следующее:

- существуют рациональные значения производственных параметров, влияющие на качество процесса сепарирования, при которых эффективность исследуемого процесса максимальна, так для частот колебания рабочего органа он лежит в интервале от 190 до 210 кол/мин;

- результаты математического моделирования процессов перемещения частиц зерновой смеси и полученные экспериментальным способом данные, по сути показывают практическое совпадение по характеру, составу и линиям тренда, что свидетельствует об адекватности математических моделей.

В четвертой главе сформулированы конструктивные решения для использования в зерноочистительных машинах, с целью интенсификации процесса самосортирования зерновой смеси, как пути повышения качественных показателей.

Предложенное на рисунке 13 конструктивное решение может использоваться как вибрационный сепаратор или являться составной частью более сложного устройства и решать в нем задачу по интенсификации процесса расслоения. Использована двухслойная модель течения сыпучего потока с наложением на наклонный рабочий орган вибрационного воздействия, направленного перпендикулярно рифлям и движению нижнего слоя.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований в МГУПП были разработаны исходные требования на проектирование и изготовление новых рабочих органов для машиностроительных предприятий, выпускающих оборудование для переработки зерна. Исходные требования были заложены в конструкцию экспериментального образца машины для выделения легких примесей из зернового потока. Образец машины прошел производственные испытания в КФХ «Сайбель» и ООО «Салют-экстра», и показал работоспособность и высокую степень удаления легких примесей. Акты производственной проверки приведены в Приложении к диссертации.

Проведена оценка экономической эффективности от внедрения предложенного

образца нового рабочего органа (см. Приложение к диссертации).

На рисунке 14 представлен вариант использования разработанной рабочей поверхности с рифлями переменной высоты при совершении ей колебаний перпендикулярно линии наибольшего схода.

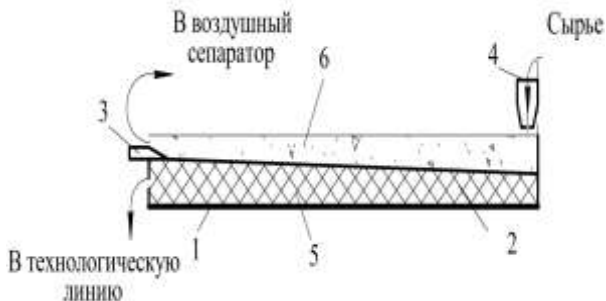


Рисунок 13. - Схема удаления легких примесей:

1 – опорная поверхность; 2 – рифли; 3 – нож; 4 – питатель; 5 – нижний слой; 6 – верхний слой.

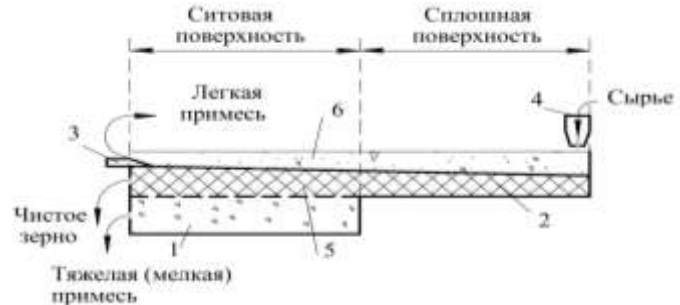


Рисунок 14. - Схема удаления легких и частично тяжелых примесей:

1 – поддон; 2 – рифли; 3 – нож; 4 – питатель; 5 – нижний слой; 6 – верхний слой.

ВЫВОДЫ

Разработана динамическая модель послойного безотрывного движения смеси зерна пшеницы и легких примесей на наклонной рабочей поверхности с рифлями при ее гармонических колебаниях, направленных перпендикулярно рифлям.

Теоретически подтверждена возможность реализации в предложенной модели течения слоев зернового потока с максимальной разностью скоростей для обеспечения стабильного процесса самосортирования.

Проведен анализ полученных аналитических зависимостей с целью выявления влияния переменных параметров процесса сепарирования на траекторию частиц верхнего слоя сыпучей смеси.

Определены направления интенсификации процесса сепарирования.

Адекватность разработанных теоретических положений подтверждена экспериментальными исследованиями.

Теоретически обоснована и доказана возможность транспортирования частиц нижнего слоя между рифлями под действием составляющей силы тяжести вдоль линии наибольшего ската.

Научно обоснован и практически реализован способ очистки зерна от легких примесей, заключающийся в том, что при вибрационном перемещении по рифленой поверхности из исходной зерновой смеси извлекают указанные примеси с эффективностью очистки, превышающей эффективность очистки зерна от легких примесей в воздушных сепараторах.

Экспериментально определены зависимости эффективности процесса сепарирования и интенсивности выделения легких примесей из нижнего слоя от удельной нагрузки, частоты колебания и угла наклона рабочего органа.

Разработана оригинальная конструкция рабочего органа вибросепаратора, позволяющая обеспечить эффективность извлечения легких примесей из зерна пшеницы более 80 % и существенно снизить нагрузку на пневмоканал.

Получено положительное решение о выдаче патента полезную модель, заявка № 2019102339/03(004090), дата подачи заявки 29.01.2019 г.

Предложены схемы применения разработанных рабочих органов в различных технологических схемах.

Разработаны программы расчета кинематических параметров частиц верхнего и нижнего слоев зернового потока.

Разработаны исходные требования на проектирование рабочего органа с рифлями и ножом для деления зернового потока.

Расчетное увеличение прибыли от внедрения разработанного рабочего органа составит 508 000 рублей в год.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

α - угол наклона рабочей поверхности к горизонту, град; m_B - масса верхнего слоя, кг; A - амплитуда колебаний, м; P_B - сила инерции переносного движения верхнего слоя; N_B - нормальная реакция нижнего слоя; F_{TP} - сила трения о нижний слой; f_c - коэффициент сопротивления сдвигу верхнего слоя относительно нижнего; V_{CP} - средняя скорость частицы вдоль оси x ; m_H - масса нижнего слоя, кг; P_H - сила инерции переносного движения нижнего слоя; N_1 - нормальная реакция опорной поверхности рабочего органа; N_2 - нормальная реакция со стороны боковой поверхности рифли (пластины), с которой частица имеет силовой контакт; F_1 - сила трения о днище рабочего органа; f_1 - коэффициент трения частицы по днищу рабочего органа; F_2 - сила трения о боковую поверхность рифли; f_2 - коэффициент трения частицы о боковую поверхность рифли; ρ_1 - угол трения о плоскость рабочей поверхности; ρ_2 - угол трения о боковую поверхность рифли; μ - отношение массы частицы верхнего слоя к массе частицы нижнего слоя; h_B - высота (толщина) верхнего слоя; h_H - высота нижнего слоя; V_T - скорость тележки в момент удара о шток тормозного устройства, м/с; S - абсолютное перемещение слоя, м; η_H - процентное содержание легких примесей в нижнем слое; η_B - процентное содержание легких примесей в верхнем слое; E - эффективность сепарирования; I - интенсивность извлечения легкой примеси из нижнего слоя; ε_H - массовая доля нижнего слоя; q - удельная нагрузка, кг/см.мин; n - частота колебания рабочего органа, кол/мин.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Васильев, А.М. Повышение эффективности процессов сепарирования зерновых смесей на рифленной поверхности / А.М. Васильев, С.А. Мачихин, А.Н. Стрелюхина, А.А. Рындин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – №3. - С. 98 – 105.

2 Васильев, А.М. Влияние геометрии рифлей опорной поверхности рабочих органов на самосортирование зерновых смесей / А.М. Васильев, С.А. Мачихин, А.Н. Стрелюхина, А.А. Рындин // Вестник ВГУИТ. - 2018. - том 80 №3. – С. 26 – 31.

3. Мачихин, С.А. Движение верхнего слоя зерновой смеси на вибрирующей рифленой поверхности / С.А. Мачихин, А.А. Рындин, А.М. Васильев, А.Н. Стрелюхина // Вестник ВГУИТ. – 2018. - том 80 №4. - С. 55 – 62.

4. Мачихин, С.А. Качество семенного и продовольственного зерна – один из аспектов продовольственной безопасности России / С.А. Мачихин, А.А. Рындин, А.М. Васильев, А.Н. Стрелюхина // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – №4. – С. 139 – 144.

5. Мачихин, С.А. Движение нижнего слоя зерновой смеси на вибрирующей рифленой поверхности / С.А. Мачихин, А.А. Рындин, А.М. Васильев, А.Н. Стрелюхина // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2019. – №2. – С. 115 – 121.

В других изданиях

Стрелюхина, А.Н. Оборудование позволяющее существенно улучшить качество очистки семенного и продовольственного зерна / А.Н. Стрелюхина, А.А. Рындин, А.М. Васильев // Каталог инновационных разработок в области переработки сельскохозяйственного сырья. – Саратов, ООО «Амирит». - 2018. – С. 188.

Статьи и материалы конференций

Васильев, А.М. Эффект самосортирования в переработке сыпучих пищевых продуктов при вибрационном воздействии / А.М. Васильев, А.А. Рындин, А.Н. Стрелюхина, С.А. Мачихин С.А. // Материалы 29 симпозиума по реологии. Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН. - 2018. – С. 63 – 64.

Стрелюхина, А.Н. Системное обеспечение качества и безопасности хлебопекарной продукции / А.Н. Стрелюхина, А.А. Рындин // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение: сборник научных статей и докладов. ООО «РИТМ». – Воронеж, 2018. - С. 288 – 294.

Стрелюхина, А.Н. Системное обеспечение качества и безопасности продуктов на примере хлебопекарной продукции / А.Н. Стрелюхина, А.А. Рындин // Сборник статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции имени Академика РАН Юрия Антоновича Израэля с международным участием 17-19 мая 2018 года – М.: ООО «Франтера». – 2019. – С. 181 – 188.

Положительное решение о выдаче патента на полезную модель «Устройство для сепарирования зерна и других сыпучих материалов», заявка № 2019102339/03(004090), от 29.01.2019 г.

Подписано в печать 05.07.2019 г. . Формат 60×84 ¹/₁₆.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ .

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела полиграфии:

394036, Воронеж, пр. Революции, 19