

На правах рукописи



ЩЕРБАКОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**Параметры и режимы работы центробежно-решетного
сепаратора с радиальными пластинами барабана**

Специальность 05.20.01 - Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ).

Научный руководитель: **Стрикунов Николай Иванович**,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Сороченко Сергей Федорович**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические системы»
Абидуев Андрей Александрович,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова», доцент кафедры «Технический сервис в АПК и общие инженерные дисциплины»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина».

Защита диссертации состоится 08 сентября 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.278.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН) по адресу: 630501, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск-1, СФНЦА РАН, а/я 463, телефон (факс): 8(383) 348-12-09; e-mail: aspsibime@ngs.ru.

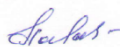
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью вашего учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеке. Автореферат и диссертация размещены на сайтах: <https://sfcsa.ru> и <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Назаров Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При послеуборочной обработке зерна особое значение придается предварительной очистке зерна, где из поступающего вороха выделяют мелкие семена растений, легкие и крупные примеси.

В машинах предварительной очистки, оснащенных плоскими решетками, в том числе и подсевыми, существенно повысить производительность без увеличения площади сепарирующей поверхности не представляется возможным. Поэтому особое значение приобретает проблема поиска новых принципов сепарирования. Практика показывает, что наиболее перспективным направлением является центробежно-решетное сепарирование.

Степень разработанности темы. Исследования в области центробежно-решетного сепарирования посвящены работы Гончарова Е.С., Заики П.М., Иванова Н.М., Леканова С.В., Несикова А.А., Слепова А.П., Стрикунова Н.И., Тарасова Б.Т., Тищенко Л.Н., Торопова В.Р., Яковлева В.Т. и многих других авторов показали перспективность этого направления исследований.

В центробежно-решетном сепараторе одним из важных элементов зернового и подсевного блоков является пластинчатый барабан. Ранее проведенными исследованиями установлено, что углы наклона рабочей грани пластин к радиусу, обеспечивающих работоспособность этих блоков, лежат в пределах от 0 до 45 градусов. Повышение эффективности работы подсевного решета центробежно-решетного сепаратора может быть обеспечена за счет изменения угла наклона β_0 радиальных пластин барабана, отогнутых относительно образующей цилиндрического барабана в нижней его части.

Объект исследования - технологический процесс сепарации зерна в цилиндрическом подсежном решете центробежно-решетного сепаратора с радиальными пластинами барабана.

Предмет исследования - закономерности процесса сепарации зерна на цилиндрическом подсежном решете центробежно-решетного сепаратора с радиальными пластинами барабана.

Цель исследования - интенсификация технологического процесса очистки зерна на цилиндрическом подсежном решете центробежно-решетного сепаратора путем изменения угла отгиба радиальных пластин в основании цилиндра барабана.

Задачи исследования:

1. Разработать механико-математическую модель процесса движения зернового материала по подсевному решету с пластинчатым барабаном и процесса сепарации на нем с учетом работы пластин.
2. Установить закономерности основных параметров сепарирования при очистке зерна на цилиндрическом подсежном решете с радиальными пластинами барабана.
3. Провести хозяйственную проверку центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и дать его технико-экономическую оценку.

Научная новизна и теоретическая значимость:

1. Предложена технологическая схема и установлены закономерности процесса сепарации зерна на цилиндрическом решете центробежно-решетного сепаратора, оснащенного радиальными пластинами с отгибом в основании цилиндра барабана.

2. Получены зависимости, определяющие основные конструктивно-режимные параметры центробежно-решетного сепаратора, оснащенного радиальными пластинами с отгибом в основании цилиндра барабана.

3. Обоснованы конструктивно-режимные параметры центробежно-решетного сепаратора оснащенного радиальными пластинами барабана.

4. Теоретическими исследованиями раскрыты закономерности процесса движения и разделения зернового материала на подсевном решете в зависимости от различных факторов. Теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждена научная гипотеза, получена математическая модель процесса сепарации зерна на подсевном решете с пластинчатым барабаном, показана эффективность применения его в технологической схеме центробежно-решетного сепаратора, намечены пути внедрения сепаратора в технологическую схему мобильного зерноочистительного агрегата и стационарных зерноочистительных линий.

Практическая значимость:

1. Обоснованы конструктивно-режимные параметры центробежно-решетного сепаратора, оснащенного радиальными пластинами барабана.

2. Результаты исследований могут быть использованы проектно-конструкторскими организациями для разработки новых зерноочистительных машин, а также в учебно-методических целях.

Методология и методы исследования. Проведенные исследования основаны на анализе отечественной и зарубежной научно-технической литературы. Теоретические и экспериментальные исследования выполнялись с использованием законов математики, физики и теоретической механики в лабораторных и производственных условиях. Использовались общепринятые и частные методики, подходы планирования экспериментов, оборудование в соответствии с действующими ГОСТами и методы математического моделирования при помощи программного обеспечения Statistica 6.1, Microsoft Excel 2013, Mathcad 15.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технологическая схема центробежно-решетного сепаратора, оснащенного радиальными пластинами с отгибом в основании цилиндра барабана.

2. Закономерности процесса сепарации зерна на центробежно-решетном сепараторе, оснащенный радиальными пластинами с отгибом в основании цилиндра барабана.

3. Конструктивно-режимные параметры центробежно-решетного сепаратора, оснащенного радиальными пластинами с отгибом в основании цилиндра барабана.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность подтверждается корректностью применения математического аппарата при моделировании процесса сепарации зернового материала, применением стандартных и разработанных автором частных методик, проведения исследований с использованием поверенных приборов и оборудования, применением современных вычислительных средств для статистической обработки и согласованностью результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными.

Результаты работы были представлены на XXIII Всероссийской агропромышленной выставке «Разработка технологии, обеспечивающей эффективную очистку зерна и технические средства для ее реализации на основе мобильных и стационарных технологий», «Золотая осень» - 2021, медаль и диплом за III место; Семинар-совещание проректоров по экономической работе и руководителей финансово-экономических служб вузов Минсельхоза России, Алтайский государственный аграрный университет, 13-16 октября 2021 г., мобильный зерноочистительный агрегат, центробежно-решетный сепаратор (макеты); сертификат по итогам участия в XVII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука-сельскому хозяйству» 9-10 февраля 2022, Барнаул; Диплом I степени в номинации «Проблемы и актуальные вопросы инженерного обеспечения АПК» по итогам выступления с докладом на VIII Региональной научной конференции «Теория и практика инновационного развития в представлениях нового поколения» март 2022, Барнаул.

Реализация результатов исследований. Результаты выполненной диссертационной работы внедрены в фермерском хозяйстве ООО «Лео» Калманского района, а также в учебном процессе кафедры «Сельскохозяйственная техника и технологии», что подтверждается соответствующими актами.

Результаты исследований могут быть использованы в мобильном зерноочистительном агрегате и в стационарных технологиях послеуборочной обработки зерна.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 6 научных работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, получено 2 патента РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 153 наименования, из них 6 на иностранных языках и 2 приложения. Общий объем составляет 165 страниц машинописного текста, который включает 11 таблиц и 54 рисунка.

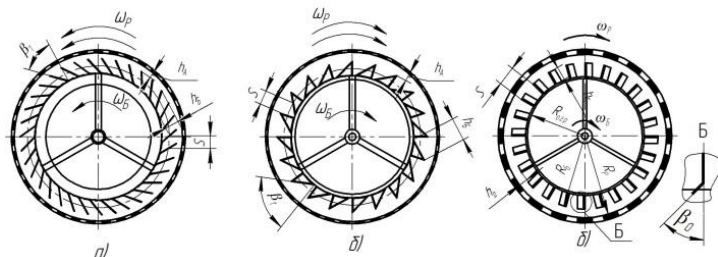
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассматривается актуальность темы, кратко излагаются основные положения, выносимые на защиту, дается общая характеристика выполненных исследований.

В первой главе «Современное состояние вопроса сепарации зернового материала» проанализированы конструкции центробежно-решетных сепараторов, выявлены их достоинства и недостатки, рассмотрены их

характеристики. Существенный вклад в усовершенствование внесли Е.С. Гончаров, П.М. Заика, Н.М. Иванов, С.В. Леканов, А.А. Несиков, А.П. Слепов, Н.И. Стрикунов, Б.Т. Тарасов, А.А. Хижников, Л.Н. Тищенко, В.Р. Торопов, В.Т. Яковлева, С.С. Ямпилев и другие ученые.

Обоснование параметров центробежно-решетного сепаратора показывают, что одним из важных элементов зернового и подсевного блоков является пластинчатый барабан. Установлено, что наклон пластин к радиусу цилиндра оказывает влияние на эффективность работы не только подсевного блока, но и зернового. По результатам этих исследований показано, что углы наклона рабочей грани пластин к радиусу, обеспечивающих работоспособность блоков, лежат в пределах от 0° до 45° .



- а) подсевное решето с круглыми отверстиями и внутренним пластинчатым барабаном с углом наклона пластин к радиусу $\beta_1 = 45^\circ$;
- б) подсевное решето с продолговатыми отверстиями, расположенными под углом к образующей, и внутренним барабаном с комбинированными пластинами;
- в) подсевное решето с круглыми отверстиями и пластинами с углом отгиба в основании цилиндра барабана β_0 .

Рисунок 1 – Варианты компоновки цилиндрического барабана пластинами на центробежно-решетном сепараторе

По результатам проведенного анализа технических решений относительно конструктивного исполнения пластинчатого барабана, можно сделать вывод о том, что в случае совместной работы подсевного и зернового блоков центробежно-решетного сепаратора, пластинчатый барабан должен быть выполнен двухсекционным.

Во второй главе «Теоретическое исследование процесса сепарации зерновой смеси на подсевном решете с пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора» рассмотрен послойный процесс движения зерновой смеси внутри подсевного блока центробежно-решетного сепаратора.

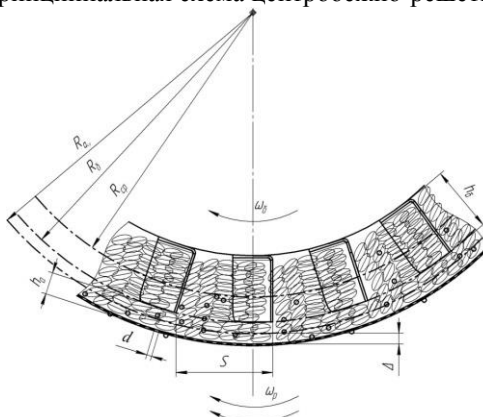
Предварительные опыты показали на целесообразность применения радиальных пластин с отгибом в основании цилиндра барабана для подсевного решета центробежно-решетного сепаратора.

Механико-математическая модель движения зернового материала в подсевном блоке предусматривает двухслойное движение: в первом слое - это движение между пластинами барабана, во втором – движение зернового материала в активном слое.



Известные конструкции сепараторов, предназначенных для предварительной очистки зернового вороха, имеют ряд технологических недостатков. Наиболее существенным является неспособность их эффективно работать на выделении не только легких и крупных примесей, но и мелких.

Рисунок 2 – Принципиальная схема центробежно-решетного сепаратора



Из предложенной принципиальной схемы сепаратора видно, что решетная очистка должна состоять из двух блоков, где выделяются мелкие и частично короткие примеси, и зернового блока для выделения длинных и крупных примесей. Для обоснования параметров пластинчатого барабана рассмотрим слой зерна, находящийся между пластинами.

Рисунок 3 – Схема к определению параметров пластин барабана

Для обоснования конструктивно-кинематических параметров пластинчатого барабана с радиальным размещением пластин необходимо установить зависимость безразмерного показателя от этих параметров:

$$Z = \frac{P}{m \cdot \omega_p \cdot R} \quad (1)$$

Действующую на частицу радиальную силу P выразим через радиальное давление:

$$P = \frac{p}{n_1}, \quad (2)$$

где p – отнесённое к единице площади решета радиальное давление зерновой смеси на контактирующий с решетом элементарный слой, H/M^2 ;

n_1 – число частиц зерновой смеси, располагающихся в первом элементарном слое на единице площади решета.

Тогда
$$Z = \frac{P}{m \cdot \omega_p^2 \cdot R} = \frac{P}{m_1 \cdot \omega_1^2 \cdot R}, \quad (3)$$

где $m_1 = m \cdot n_1$ – масса элементарного слоя на единице площади решета, $кг/м^2$.

Радиальное давление P зернового материала на контактирующий с решетом элементарный слой складывается из двух составляющих. Первая из них обусловлена действием на кольцевой слой центробежных сил, вторая – сил веса. Радиальное давление зерновой смеси, обусловленное действием центробежных сил, представим в виде суммы

$$P = P_{\text{акт}} + P_6, \quad (4)$$

где $P_{\text{акт}}$ – радиальное давление на контактирующий слой, создаваемое зерновой смесью, находящейся в активном слое;

P_6 – радиальное давление, создаваемое зерновой смесью, находящейся между пластинами барабана.

В соответствии с определенным давлением безразмерный параметр Z также разложим на составляющие

$$Z = Z_{\text{акт}} + Z_6 = \frac{P_{\text{акт}}}{m_1 \cdot \omega_p^2 \cdot R} + \frac{P_6}{m_1 \cdot \omega_p^2 \cdot R} \quad (5)$$

Допустим, что зерновая смесь во втором и последующих элементарных слоях активного слоя вращается со средней угловой скоростью $\omega_{\text{cp}} = 0,5 \cdot (\omega_p + \omega_6)$, тогда получим:

$$P_{\text{акт}} = (n_a - 1) \cdot m_1 \cdot \omega_{\text{cp}}^2 \cdot R_{a \text{ cp}} \quad (6)$$

где $n_a = \frac{h_a}{\Delta}$,

Δ – толщина элементарного слоя;

h_a – толщина активного слоя;

$R_{a \text{ cp}}$ – средний радиус вращения зерновой смеси в активном слое.

Безразмерный показатель для активного слоя:

$$Z_{\text{акт}} = \left(\frac{n_a - 1}{4} \right) \cdot \left(1 + \frac{\omega_6}{\omega_p} \right)^2 \cdot \frac{R_{a \text{ cp}}}{R} \quad (7)$$

Аналогично радиальное давление между пластинами барабана:

$$P_6 = \omega_6^2 \cdot m_6 \cdot R_{6 \text{ cp}} \cdot \mu, \quad (8)$$

$$\mu = \frac{N_0}{F_6^{\text{п}}} \quad (9)$$

где μ – коэффициент, учитывающий «зависание» зерновой смеси между пластинами барабана, называемый коэффициентом трансформации силового давления.

Используя формулы (8) и (9) получим:

$$Z_6 = n_6 \cdot \frac{\omega_6^2}{\omega_p^2} \cdot \frac{R_{6 \text{ cp}}}{R} \cdot \mu, \quad (10)$$

где $n_6 = \frac{m_6}{m_1}$.

Для установления значений основных параметров пластинчатого барабана определим безразмерный показатель $Z = Z_{\text{акт}} + Z_6$, найдем его численное значение и построим график зависимости от коэффициента μ (рисунок 4).

$$Z = \left(\frac{n_a - 1}{4}\right) \cdot \left(1 + \frac{\omega_6}{\omega_p}\right)^2 \cdot \frac{R_{a \text{ ср}}}{R} + n_6 \cdot \frac{\omega_6^2}{\omega_p^2} \cdot \frac{R_{6 \text{ ср}}}{R} \cdot \mu \quad (11)$$

где $R_{a \text{ ср}} = R - \frac{h_a}{2}$; $R_{6 \text{ ср}} = R_p - h_a - \frac{h_a}{2}$; $n_a = \frac{h_a}{\Delta}$; $n_6 = \frac{h_6}{\Delta}$

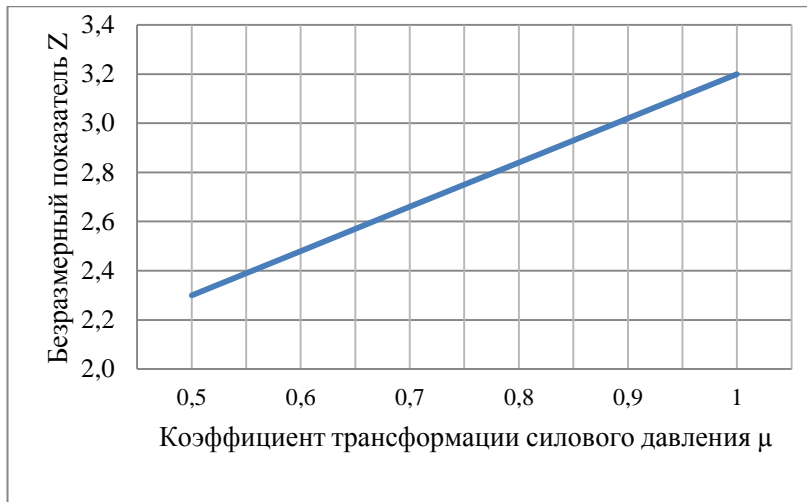
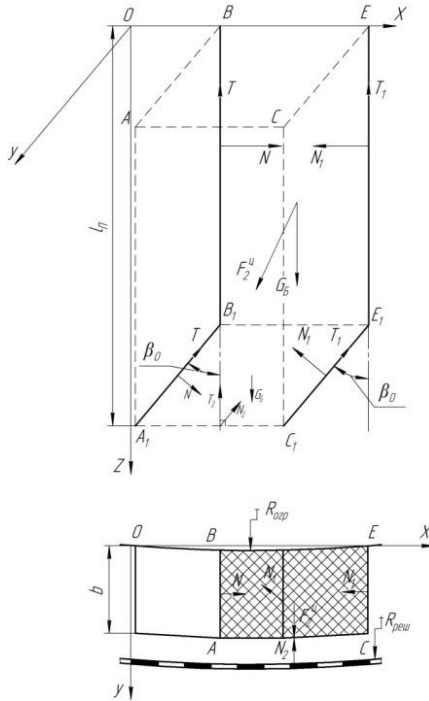


Рисунок 4 – График зависимости безразмерной величины Z от коэффициента трансформации силового давления μ

Проведенные подсчеты показывают, что при $\omega_6 < \omega_p$, $h_a = 9 \dots 12$ мм, $\Delta = 3$ мм и $\mu = 1$ работоспособность центробежно-решетного сепаратора будет обеспечена ($Z \geq 3$) в достаточно широком интервале изменения величины отношения угловых скоростей $\frac{\omega_6}{\omega_p}$, если общую толщину кольцевого слоя $h_{\text{сл}} = h_a + h_6$ принять равной 35...40 мм, при этих значениях толщина слоя $n_a = 3 \dots 4$ и $n_6 = 8$, а шаг расстановки пластин $S = 32$ мм.



Рассмотрим равновесие зернового слоя, заключенного между пластинами АВЕС, при действии активного слоя зерна.

Рисунок 5– Слой зерна, заключенный между пластинами барабана с учетом действия активного слоя

Запишем уравнения с учетом сил трения и инерции:

$$\sum X = N - N_1 + N \cdot \sin \beta_0 - N_1 \cdot \sin \beta_0 + N \cdot f \sin \beta_0 + N_1 \cdot f_1 \sin \beta_0 = 0; \quad (11)$$

$$\sum Y = F_2^u - N_2 + N \cos \beta_0 - N_1 \cos \beta_0 = 0; \quad (12)$$

$$\sum Z = G_2 - N \cdot f - N_1 \cdot f_1 - N_2 \cdot f_2 + N \cdot \sin \beta_0 - N_1 \cdot \sin \beta_0 - m_2 \cdot a_{z2} = 0. \quad (13)$$

Рассматривая действие сил трения на двух пластинах, примем равенство коэффициентов трения зерна о пластины $f = f_1$.

После проведенных преобразований, из выражения (13) определяем ускорение зерновой смеси a_{z2} :

$$a_{z2} = g - \omega_B^2 \cdot R_{\text{Бср}} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{\text{см}} \cdot h_B^2 \cdot L_B}{2} \cdot F\right) \quad (14)$$

где $F = \left(1 - \frac{(1 + (\sin \beta_0 + f \sin \beta_0))}{(1 - (\sin \beta_0 + f \sin \beta_0))}\right) \cdot (\cos \beta_0 + \sin \beta_0)$ – коэффициент, зависящий от угла отгиба пластин в основании цилиндра барабана β_0 .

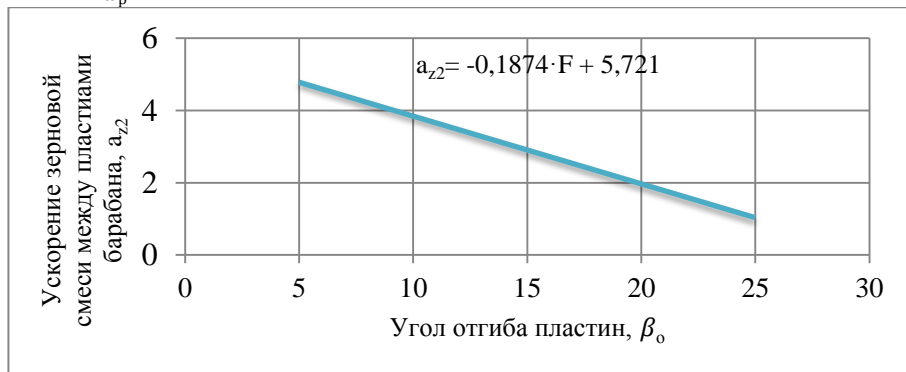
По результатам проведенных теоретических исследований получаем следующие зависимости, представленные в виде графиков на рисунках 6 и 7.



При окружной скорости цилиндрического подсевного решета радиусом $R_p = 0,145$ м $v_p = \omega_p \cdot R_p$, равной 2,3...2,8 м/с травмирование зерна будет исключено. Принятое отношение угловых скоростей пластинчатого барабана и решета $\frac{\omega_b}{\omega_p} = 0,57$ показывает, что зерновая смесь между пластинами будет двигаться с ускорением, значение которого будет зависеть от угловой скорости барабана.

Рисунок 6 – Зависимость ускорения зерновой смеси между пластинами от угловой скорости барабана

Одним из путей снижения ускорения зерновой смеси между пластинами барабана является увеличение соотношения угловых скоростей барабана и решета $\frac{\omega_b}{\omega_p}$, но без потери работоспособности решетчатого блока.



Анализ полученной зависимости показывает, что для исключения как чрезмерного давления пластин на зерно, так и «зависания» зерна между пластинами, значение угла β_0 должно лежать в пределах 15°...25°.

При таких значениях угла β_0 значительного изменения в сторону увеличения коэффициента μ , а следовательно и возрастанию давления на активный слой не произойдет. Это говорит о том, что пропускная способность сепаратора не снизится.

Рисунок 7 – Зависимость ускорения зерновой смеси между пластинами от угла отгиба пластин в конце цилиндрического барабана

Интенсивность процесса сепарации на подсевном решетке с пластинами, отогнутыми в конце цилиндра барабана в сторону его вращения, будет зависеть от скорости прохода мелкой фракции сквозь слои зерна к решетку – сегрегация (первая стадия) и непосредственно через его отверстия – сепарация (вторая стадия). Процесс сепарации наиболее интенсивно протекает с увеличением относительного скольжения элементарных слоев в сыпучем теле, до наступления критической скорости, когда происходит прижатие слоев друг к другу. Следовательно, вторая фаза – сепарация, будет тем интенсивнее, чем выше скорость относительного движения активного слоя, контактирующего с решеткой, при условии, что эта скорость не превышает критическую, когда процесс сепарации прекращается.

Таким образом, полноту выделения через решетку можем выразить формулой:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\theta_1 \times e^{-\frac{t}{\theta_1}} - \theta_2 \times e^{-\frac{t}{\theta_2}}}{\theta_1 - \theta_2} \quad (15)$$

где θ_1 – среднее время продвижения проходовой частицы по толщине общего кольцевого зернового слоя, т.е. среднее время пребывания проходовой частицы в общем зерновом слое от момента вступления этого общего слоя на начало решетки до момента подхода проходовой частицы к сепарирующей поверхности;

θ_2 – среднее время пребывания проходовой частицы на решетке от момента ее поступления на поверхность решетки до момента просеивания;

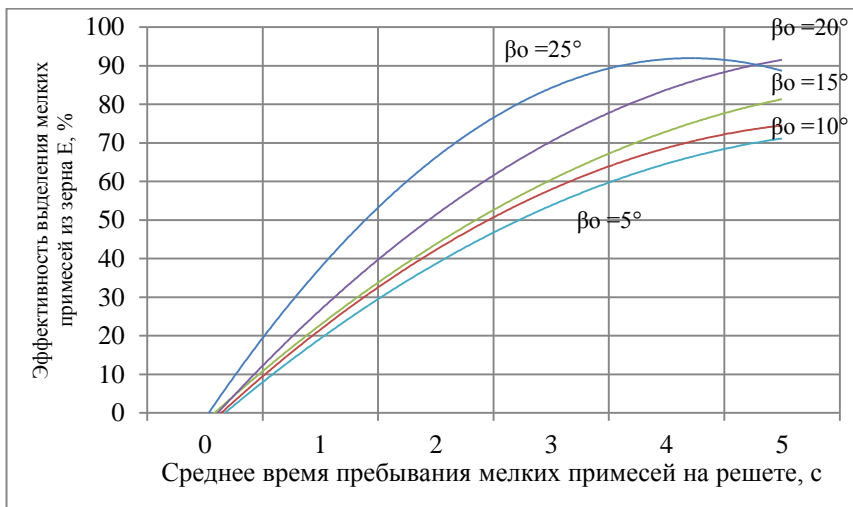
t – время от момента поступления проходовой частицы в толщу зернового слоя до момента её просеивания.

Поскольку θ_1 и θ_2 должны определяться экспериментально, а уравнение (15) не удастся решить при известных, но различных значениях ε (т.е. решить систему относительно двух неизвестных), то величину θ_2 определим теоретически.

Связав среднее время пребывания θ со средним путем скольжения и, обозначив его через средний путь, пройденный по решетку H_{cp} , получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_{1cp} \times e^{-\frac{H}{H_{1cp}}} - H_{2cp} \times e^{-\frac{H}{H_{2cp}}}}{H_{1cp} - H_{2cp}} \quad (16)$$

где ε - полнота выделения мелких примесей, определяемая экспериментально.



Выявлены зависимости среднего времени пребывания проходových частиц на решетке при различном угле отгиба пластин на барабане. С увеличением времени пребывания частиц на решетке эффективность сепарирования возрастает.

Рисунок 8 – Изменение полноты выделения проходových частиц в зависимости от среднего времени пребывания зерновой смеси на решетке с различным углом отгиба пластин:

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» приведена методика проведения экспериментальных исследований.

Проведенные теоретические исследования выявили основные закономерности сепарирования зерновой смеси на центробежно-решетном сепараторе с пластинчатым барабаном, а также были определены конструктивные и кинематические параметры пластин барабана. Для подтверждения полученных теоретических результатов, была разработана программа и методика экспериментальных исследований.

Использование в сепараторе радиальных пластин с углом отгиба в основании цилиндра барабана позволило существенно повысить эффективность очистки зернового материала, что подтверждают экспериментальные исследования. На рисунке 9 представлена технологическая схема центробежно-решетного сепаратора.

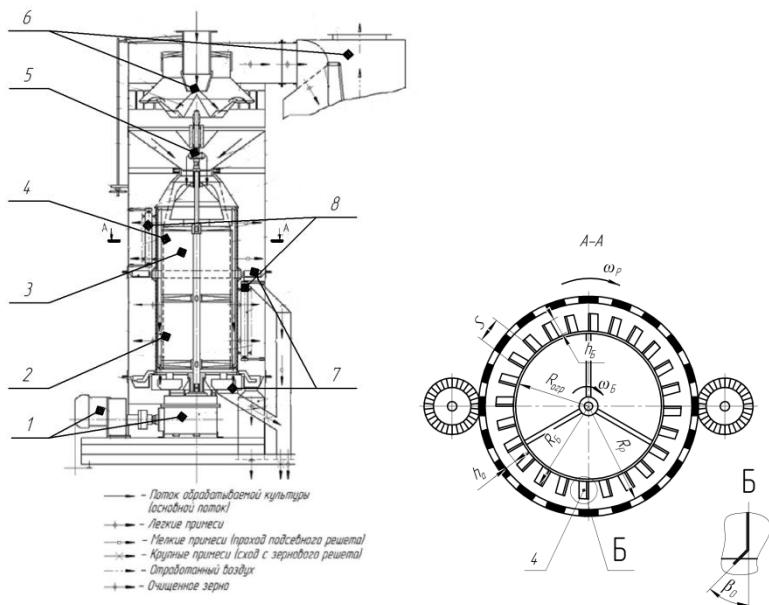


Рисунок 9 – Центробежно-решетный сепаратор:

1 – привод; 2 – зерновое решето; 3 – подсевное решето; 4 – пластинчатый барабан; 5 – конус-сборник; 6 – блок воздушной очистки; 7 – патрубки вывода очищенного зерна и отходов; 8 – цилиндрические щетки подсевного и зернового решета.

Работает центробежно-решетный сепаратор следующим образом. Зерновая смесь поступает в загрузочную горловину. Далее зерновая смесь поступает в блок воздушной очистке (6), где происходит выделение легких примесей, которые поступают через патрубков в осадочную камеру и через выпускной клапан выводятся из машины. После воздушной сепарации, предварительно очищенное зерно конусом-сборником (5) направляется на решетный блок, где происходит очистка от мелких примесей на подсевном решете (3), от длинных примесей на зерновом решете (2), которые поступают в соответствующие приемники и выводятся из машины посредством патрубков (7). Очищенное зерно, прошедшее через отверстия зернового решета (2) поступает в приемник очищенного зерна и через патрубков (7) выводится из машины. Решета и барабан вращаются в одну сторону, но с разными скоростями ($\frac{\omega_B}{\omega_p} = 0,57$) благодаря приводу (1). Очистка отверстий решет (3) и (2) от застрявших зерен производится цилиндрическими щетками (8).

В зависимости от обрабатываемой культуры необходимо произвести замену решет.

Программой исследований предусмотрено следующее:

- изготовление радиальных пластин с отгибом в основании цилиндра барабана по направлению его вращения;

- изучение влияние шага расстановки пластин барабана на эффективность очистки зерна от мелких примесей;
- изучение влияния отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения на процесс сепарации;
- опыты по влиянию диаметра отверстий решет на эффективность сепарирования;
- опыты по изучению влияния рабочих размеров продолговатых отверстий решет на качество сепарирования;
- определение рациональных значений угловой скорости вращения барабана и решета;
- определение просеваемости по высоте цилиндрического решета;
- опыты по определению влияния засоренности исходного материала на удельную производительность и полноту выделения мелких примесей;
- производственные испытания центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и пластинчатым барабаном и его технико-экономическая оценка.

Поскольку оптимизация процесса сепарации относится к числу компромиссных задач, то в качестве критериев оптимизации (откликов) приняты два критерия:

Эффективность сепарации определяли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{P_1 \cdot a_{\text{вых}}^M}{P_0 \cdot a_{\text{исх}}^M} \cdot 100 \% ; \quad (18)$$

где P_1 – масса проходовой фракции;

$a_{\text{вых}}^M$ – содержание мелких примесей в проходовой фракции;

P_0 – масса исходного материала;

$a_{\text{исх}}^M$ – содержание мелких примесей в исходном материале.

Потери зерна в отходы:

$$\Pi = \frac{P_1 \cdot a_{\text{вых}}^{KP}}{P_0 \cdot a_{\text{исх}}^{KP}} \cdot 100 \% ; \quad (19)$$

где $a_{\text{вых}}^{KP}$ – содержание крупной фракции в проходе;

$a_{\text{исх}}^{KP}$ – содержание крупной фракции в исходном материале.

В ходе проведения экспериментов было выявлено 10 факторов, влияющих на процесс сепарации центробежно-решетного сепаратора (кинематических, конструктивных, технологических).

$$\varepsilon = f(C_0, Q, \beta_1, \beta_0, S, \omega_p, \omega_b, h_A, W, \Delta) \quad (20)$$

$$\Pi = f(C_0, Q, \beta_1, \beta_0, S, \omega_p, \omega_b, h_A, W, \Delta) \quad (21)$$

где C_0 – исходная засоренность зерновой смеси, %;

Q – подача зерновой смеси, т/(ч×м²);

β_1 – угол наклона пластин барабана к радиусу барабана, град.;

β_0 – угол отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, град.;

S – шаг расстановки пластин барабана, мм;

ω_p, ω_6 – угловая скорость вращения решета и барабана, c^{-1} ;

h_A – толщина активного слоя, мм;

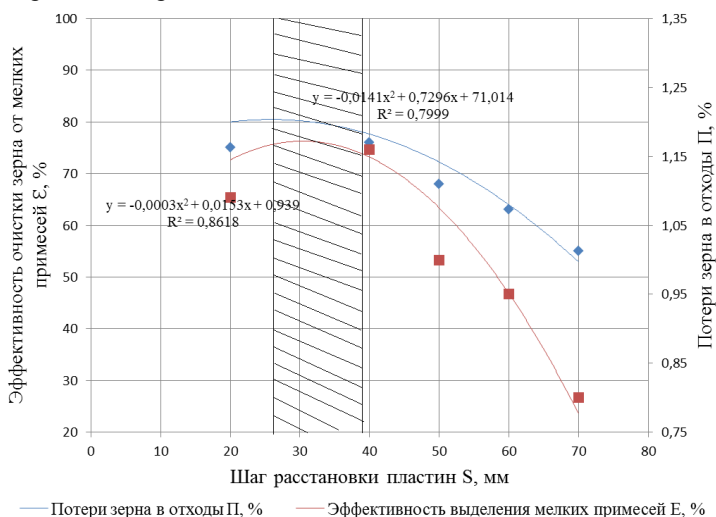
W – влажность исходного материала, %;

Δ – геометрические размеры отверстий решет.

Предварительные однофакторные эксперименты показали, что наиболее явно выражены линейные эффекты, поэтому отсеивающий эксперимент был реализован по плану Плакетта-Бермана.

Используя полученные результаты, был выбран план многофакторного эксперимента (план № 60 композиционный симметричный трехуровневый план).

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» Согласно методике были проведены однофакторные, отсеивающие и многофакторные эксперименты.



С увеличением расстояния между пластинами барабана резко повышается ускорение зерновой смеси в активном слое, что обуславливается уменьшением давления со стороны пластин. Это приводит к снижению просеиваемости мелких частиц. Ускорение слоя, заключенного между пластинами изменяется незначительно от 2,55 до 2,5 м/с. При больших значениях угловой скорости решета возникает уплотнение частиц в слое, и, как следствие его заклинивание. С изменением шага расстановки пластин в большую сторону, ускорение слоя между пластинами барабана и активного слоя увеличивается с 1,5 до 2,6 м/с. Это указывает на рабочий диапазон сепаратора.

Рисунок 10 – Влияние шага расстановки пластин барабана на эффективность выделения мелких примесей и потери зерна в отходы.

На рисунке 11 представлено расположение радиальных пластин барабана и их геометрические параметры.

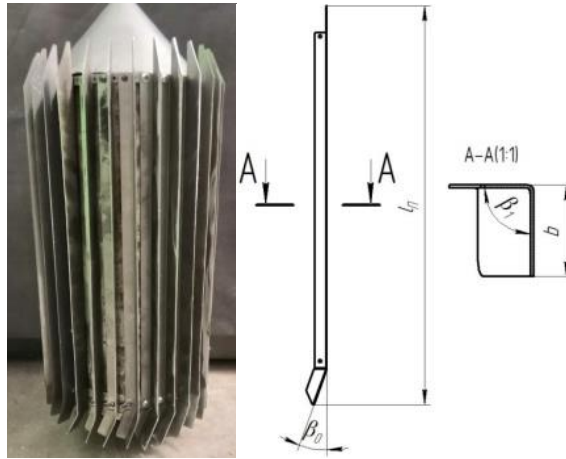
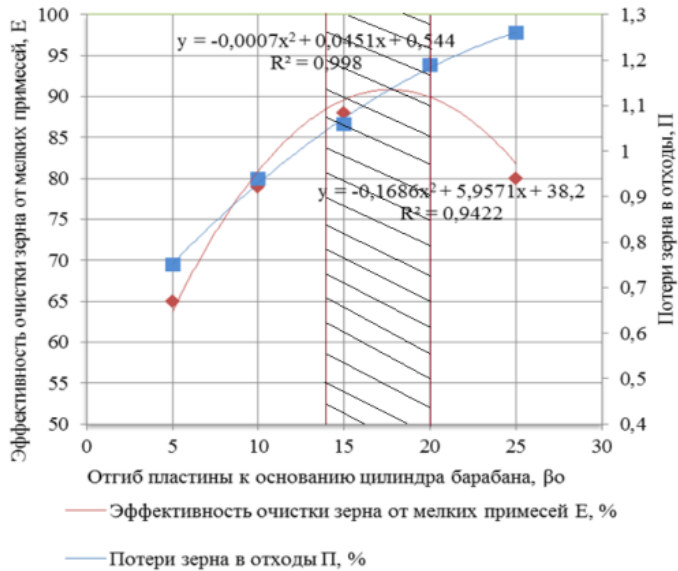
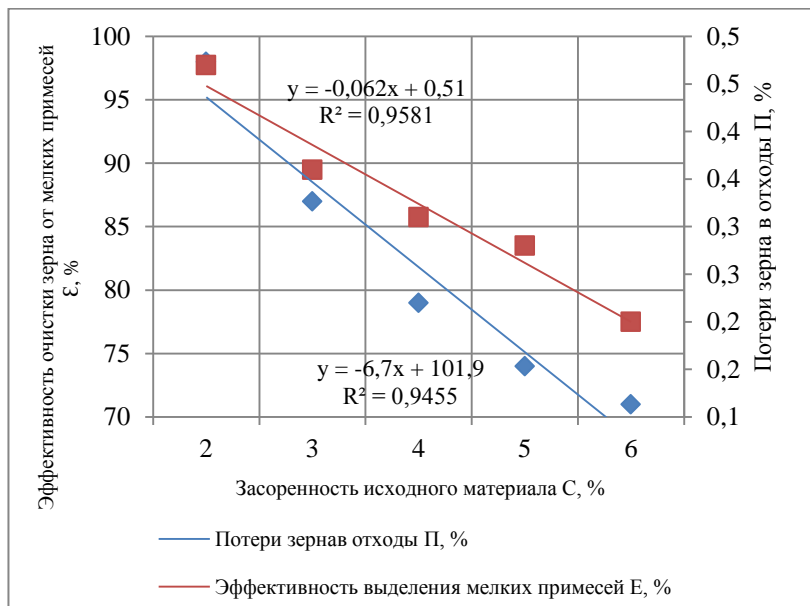


Рисунок 11 – Геометрические параметры пластин барабана центробежно-решетного сепаратора



Пластины с отгибом в конце цилиндра барабана способствуют снижению ускорения движения зерновой смеси по высоте решета, тем самым увеличивают время расслоения зерновой смеси, что повышает процент выделения мелких примесей из глубины зернового слоя.

Рисунок 12 – Влияние отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения на эффективность очистки зерна



Максимальное значение по засоренности мелкими примесями исходного материала в проведенных экспериментах составляло 6%. Такое содержание семян сорных растений, относящихся к мелким примесям, даже в свежесобранном зерновом материале встречается редко.

Рисунок 13 – Зависимость эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от засоренности исходного материала

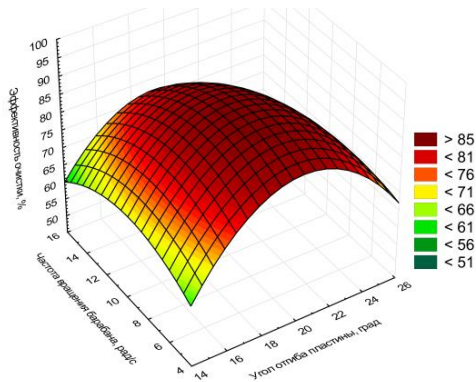
В результате проведенного отсеивающего эксперимента установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на эффективность очистки зерна, являются толщина активного слоя, угол отгиба пластин в основании цилиндра барабана по направлению его вращения, шаг расстановки пластин и угловая скорость барабана. На потери зерна в отходы особое влияние оказывают факторы - угловая скорость вращения барабана, подача зерновой смеси, угол отгиба пластин в основании цилиндра барабана по направлению его вращения и засоренность исходного материала.

Тогда функции зависимости эффективности очистки зерна и потери зерна в отходы от наиболее значимых факторов примут следующий вид:

$$E = f(h_A, \beta_0, S, \omega_B) \quad (22)$$

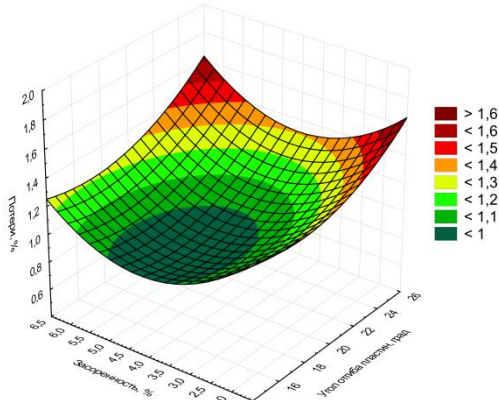
$$\Pi = f(C_0, \omega_B, \beta_0, Q) \quad (23)$$

Результаты многофакторных экспериментов представлены на рисунках 14,15.



На графике наблюдается совместное влияние значимых параметров частоты вращения барабана и угла отгиба пластин. С возрастанием частоты вращения барабана наблюдается повышение эффективности выделения мелких примесей, что говорит об изменении коэффициента трансформации силового давления. Это подтверждается и однофакторным экспериментом по влиянию угловой скорости на эффективность очистки. С увеличением угла отгиба пластин β_0 свыше 25° эффективность очистки снижается. Поэтому рациональное значение угла должно лежать в пределах $20 \dots 25^\circ$.

Рисунок 14 – Поверхности отклика для критерия оптимизации ε – эффективности выделения мелких примесей от X_2 (β_0) и X_4 (ω_B)



По графику видно, что влияние указанных параметров равнозначно. Это объясняется тем, что при увеличении значений этих параметров, главным образом угла отгиба пластин происходит рост давления на зерновой материал активного слоя и мелкое зерно начинает проходить через отверстия решета. Минимальные потери составляют $0,8 \dots 0,9\%$.

Рисунок 15 – Поверхности отклика для критерия оптимизации Π – потери зерна в отходы от X_2 (C_0) и X_3 (β_0)

В уборочный период 2021 года в ООО «Лео» Калманского района была проведена проверка работоспособности экспериментального образца.

Сепаратор включал в себя воздушный кольцевой пневмоканал с осадочной камерой, делительное решето, подсевное решето с пластинчатым барабаном. Решето использовалось с прямоугольными отверстиями, а барабан состоял из цилиндра с расположенными по образующей пластинами с отгибом в основании барабана по направлению его вращения. На рисунке 14 представлена хозяйственная проверка центробежно-решетного сепаратора с пластинчатым барабаном на подсевном решете.



Производственные испытания экспериментального образца сепаратора показали, что при производительности сепаратора 32,6 т/ч полнота выделения мелких примесей составила 89,8%, а потери зерна в отходы не превышали 0,5%.

Рисунок 16 – Воздушный центробежно-решетный сепаратор на испытаниях

В пятой главе «Технико-экономическая оценка центробежно-решетного сепаратора» центробежно-решетный сепаратор с подсевным решетом может использоваться для обработки продовольственного зерна как машина предварительной очистки в сочетании с кольцевым пневмосепарирующим каналом в стационарных и мобильных технологиях. Сравнение с серийно выпускаемой машиной МПР-50С предварительной очистки аналогичного типа и ВЦР-50 показывает, что годовой экономический эффект составит 148140 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ центробежно-решетных сепараторов показал, что обеспечение устойчивости рабочего процесса сепарирования на подсевном решете возможно за счет применения внутреннего пластинчатого барабана с радиальными пластинами. Анализ математических моделей движения зерновой смеси по поверхности цилиндрического подсевного решета показывает, что чем меньше путь проходит частица относительно сепарирующей поверхности, тем больше происходит относительное перемещение прилегающих к решету последующих слоев, следовательно увеличивается вероятность проникновения между слоями проходных частиц. Установлено, что основными факторами, управляющими процессами, являются

параметры пластинчатого барабана: угол наклона пластин барабана к радиусу β_1 , угол отгиба пластины в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения β_0 , шаг расстановки пластин S .

2. Определяющее влияние на процесс движения зерна оказывает коэффициент трансформации силового давления зерновой смеси μ , находящегося между пластинами барабана на зерновой материал активного слоя. Наибольшее влияние на коэффициент μ оказывают углы наклона и отгиба, приемлемые значения которых равны $\beta_1=0^\circ$ и $\beta_0=20^\circ$.

3. Экспериментальными исследованиями подтверждены теоретические выводы об эффективности применения подсевного решета с цилиндрическим барабаном и с радиальными пластинами с углом отгиба в основании барабана по направлению его вращения. Установлено, что при увеличении засоренности зернового материала от 2% до 6% полнота выделения мелких примесей снижается с 97% до 77,4% при диаметре отверстий решета 3,6 мм.

4. Производственные испытания экспериментального образца сепаратора с подсевным решетом показали, что при производительности сепаратора 32,6 т/ч полнота выделения мелких примесей составила 89,8%, а потери зерна в отходы не превышали 0,5%.

5. Центробежно-решетный сепаратор с подсевным решетом может использоваться для обработки продовольственного зерна как машина предварительной очистки в сочетании с кольцевым пневмосепарирующим каналом в стационарных и мобильных технологиях. Сравнение с серийно выпускаемой машиной предварительной очистки аналогичного типа показывает, что годовой экономический эффект составит 148140 руб.

Рекомендации производству

Результаты проведенных исследований по обоснованию конструктивно-режимных параметров пластинчатого барабана с радиальными пластинами и подсевного решета могут быть использованы конструкторскими и производственными организациями при разработке современных зерноочистительных машин и технологий на основе центробежно-решетного сепарирования.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования целесообразно вести в направлении разработки подсевного и зернового цилиндрических решет на данном принципе сепарации с последующим совмещением их в блок и создания ворохоочистителя, сочетающего работу цилиндрического решета и воздушного потока.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Стрикунов, Н. И. Пути повышения эффективности работы центробежно-решетного сепаратора в режиме овсюгоотборника / Н.И.

Стрикунов, С.В. Леканов, С.А. Черкашин, С.С. Щербаков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 4 (186).- 2020.- С. 167-173.

2. Стрикунов, Н. И. Методика расчета устройства для предварительной подготовки зернового материала центробежно-решетного сепаратора / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.А. Черкашин, С.С. Щербаков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 5 (187).- 2020.- С. 153-159.

3. Стрикунов, Н. И. Кинематические и энергетические характеристики центробежно-решетного сепаратора / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 6 (188).- 2020.- С. 144-150.

4. Щербаков, С. С. Исследование процесса самосортирования зернового материала / С.С. Щербаков, С.В. Леканов, Н.И. Стрикунов // // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 6 (188).- 2020.- С. 150-156.

5. Стрикунов, Н. И. Расчет основных параметров и режимов работы блока цилиндрических решет центробежно-решетного сепаратора / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков, М.Е. Микитюк Вестник // Алтайского государственного аграрного университета. - 2021. - № 1 (195). - С. 89-96.

6. Микитюк М.Е. Параметры движения зерна по конической обечайке со ступенчатой поверхностью/ М.Е. Микитюк, Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков // Вестник Алтайского аграрного университета. - 2021. - № 1 (195). - С. 96-101

Публикации в других изданиях

7. Патент № 2753865 Российская Федерация С1 МПК В07В 1/26 (2006.01), В07В 9/00 (2006.01)/ Центробежно – решетный сепаратор/ Стрикунов Н.И. Леканов С.В., Микитюк М.Е., Щербаков С.С.; заявитель и патентообладатель Барнаул, АлтГАУ. - № 2020144068; заявл. 29.12.2020; опубл.: 24.08.2021, Бюл. №24.

8. Патент № 2749395 Российская Федерация, МПК В07В 9/00 (2006.01)/ Мобильный зерноочистительный агрегат/ Стрикунов Н.И., Леканов С.В., Черкашин С.А., Щербаков С.С.; заявитель и патентообладатель Барнаул, АлтГАУ. № 2020132603; заявл. 01.10.2020; опубл.: 09.06.2021, Бюл. №16.