

На правах рукописи



МИКИТЮК МАКСИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ЗЕРНА НА
ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПОДСЕВНОМ РЕШЕТЕ**

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2023

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Стрикунов Николай Иванович

Официальные оппоненты: **Абидуев Андрей Александрович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Бурятская государственная
сельскохозяйственная академия им. В.Р.
Филиппова», доцент кафедры «Технический
сервис в АПК и общие инженерные
дисциплины»;

Черняков Алексей Витальевич,
кандидат технических наук, доцент, Тарский
филиал ФГБОУ ВО «Омский государственный
аграрный университет им. П.А. Столыпина»,
доцент кафедры «Агрономии и
агроинженерии».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И.
Ползунова».

Защита диссертации состоится «27» декабря 2023 года в 10 час. 00 мин.
на заседании диссертационного совета Д 24.1.211.01 при Федеральном
государственном бюджетном учреждении науки Сибирский федеральный
научный центр агробιοтехнологий 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: sibime@sfsc.ru.

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

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

Автореферат разослан «_____» _____ 202__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.В. Вахрушев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задачей агропромышленного комплекса является обеспечение продуктами питания и производственной безопасности нашей страны, что предопределяет устойчивое наращивание производства зерна.

Выполнение поставленной задачи требует комплексного развития материально-технической базы зернового производства, наиболее капиталоемкую часть, которой составляют объекты послеуборочной обработки и хранения зерна.

Повышение производительности зерноочистительных машин можно осуществить за счет увеличения удельной нагрузки их сепарирующих рабочих органов. Плоские пробивные решета исчерпали резервы повышения производительности. Поэтому они не могут удовлетворить все возрастающие потребности зернопроизводства в отношении производительности и качества их работы.

Наиболее перспективным направлением при предварительной очистке зерна является центробежно-решетное сепарирование.

При центробежно-решетном сепарировании сыпучих материалов выделение частиц через разделяющую поверхность происходит под действием инерционных сил, значительно превосходящих силы тяжести. Вероятность попадания зерна в отверстие выше за счёт постоянного контакта с сепарирующей поверхностью, а высокая скорость обрабатываемого материала увеличивает производительность центробежных сепараторов.

Применение предложенного способа сепарирования дает возможность для проектирования семейства машин на основе блочно-модульного построения самих сепараторов и технологических линий для очистки зерна.

В этой связи, разработка и совершенствование технических средств, для интенсификации процессов предварительной очистки зерна является актуальной научно-практической задачей.

Степень разработанности темы. Исследованию центробежно-решетного сепарирования зерна посвящены работы многих ученых, которые доказали их преимущество в сравнении с плоскорешетным сепарированием: Абидаева А.А., Авдеева Н.Е., Андреева В.Л., Барилла А.В., Бочкарева А.И., Васильковского О.М., Гончарова Е.С., Демчука Е.В., Заики П.М., Захарова С.Е., Иванова Н.М., Кима Р.А., Леканова С.В., Лузана П.Г., Мельникова Б.Н., Минаева В.Н., Несикова А.А., Патрина В.А., Полуэктова Н.И., Семенова В.А., Слепова А.П., Сороченко С.Ф., Стрикунова Н.И., Тарасова Б.Т., Тищенко Л.Н., Торопова В.Р., Ульянова А.Н., Харченко С.О. и многих других авторов.

Исходя из анализа исследований центробежно-решетного сепарирования, можно сделать вывод о том, что существенно интенсифицировать процесс сепарации можно за счёт применения предварительной подготовки зернового материала и решета с круглыми продольными перемычками.

Цель исследования - повышение эффективности процесса сепарирования при очистке зерна от мелких примесей на цилиндрическом подсевном решете.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель движения зерна в активном слое и процесса сепарации на подсевном решете.
2. Обосновать основные конструктивно-режимные параметры подсевного решета с продолговатыми отверстиями.
3. Провести производственную проверку экспериментального образца сепаратора и дать технико-экономическую оценку.

Объект исследования – технологический процесс сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете.

Предмет исследования - закономерности процесса сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете.

Научная новизна и теоретическая значимость.

1. Обоснована математическая модель и технологическая схема процесса сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете.

2. Определены зависимости, определяющие основные конструктивно-режимные параметры процесса сепарации на подсевном решете.

Новизна технического решения подтверждена патентами РФ на изобретения № 2777102, №2753865.

Практическая значимость научного исследования.

1. Обоснованы конструктивно-режимные параметры центробежно-решетного сепаратора с цилиндрическим подсевным решетом.

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 математической статистики, программ Microsoft Excel 2013, Statistica V12, Mathcad 15.

Научные положения, выносимые на защиту:

- результаты теоретических исследований процесса движения зерновых частиц в активном слое на цилиндрическом подсевном решете и процесса сепарации на нем;

- результаты экспериментальных исследований, подтверждающие теоретические предпосылки, по обоснованию процесса очистки зерна на подсевном решете с учетом его предварительной подготовки;

- обоснование конструктивно-режимных параметров подсевного решета.

Степень достоверности исследований подтверждается:

- применением математического аппарата при разработке математической модели движения зернового материала на цилиндрическом подсевном решете и процесса сепарации на нем;

- использованием стандартных методик, а также разработанных частных методик проведения исследований, с соблюдением требований и рекомендаций соответствующих стандартов;

- применением современных вычислительных средств с использованием программного обеспечения Statistica, Mathcad.

Реализация результатов исследований. Материалы теоретических и экспериментальных исследований были использованы при подготовке технического задания на разработку и изготовление макетного образца воздушного центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом, который прошел производственные испытания в КФХ Щербаков С.Г. Заринского района, Алтайского края. Результаты исследований применяются при проведении лекционных и практических занятий, согласно образовательной программе, по направлению подготовки «Агроинженерия» Алтайского государственного аграрного университета.

Апробация результатов исследований. Результаты исследований были представлены: на XXIII Всероссийской агропромышленной выставке «Золотая осень 2021» и награждены бронзовой медалью и дипломом III степени «За разработку технологии, обеспечивающей эффективную очистку зерна и технические средства для ее реализации на основе мобильных и стационарных технологий»; на XVI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» 9-10 февраля 2021 г., - Барнаул, Алтайский ГАУ; на XVII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» 9-10 февраля 2022 г. – Барнаул, Алтайский ГАУ;

на XVIII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» 9-10 февраля 2023 г. – Барнаул, Алтайский ГАУ; на II этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых аграрных образовательных и научных организаций России по Сибирскому федеральному округу в номинации: «Машины и оборудование для АПК», результат - диплом II степени, апрель 2023 г. - Новосибирск, Новосибирский ГАУ.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 3 патента РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 165 наименований и 4 приложений. Общий объем составляет 193 страницы машинописного текста, который включает 68 рисунков 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ 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 и задачи исследования» проанализированы конструкции центробежно-решетных сепараторов, выявлены их достоинства и недостатки, рассмотрены их характеристики. Существенный вклад в усовершенствование внесли А.А. Абидуев, Е.С. Гончаров, Е.В. Демчук, П.М. Заика, Н.М. Иванов, С.В. Леканов, А.А. Несиков, А.П. Слепов, С.Ф. Сороченко, Н.И. Стрикунов, Б.Т. Тарасов, Л.Н. Тищенко, В.Р. Торопов, В.Т. Яковлев, С.С. Ямпиллов и другие ученые.

Несмотря на очевидные достоинства, цилиндрические решета применяются реже, чем плоские. Однако рядом авторов установлено, что применение вертикальной оси вращения решета позволяет повысить удельную нагрузку и в два раза уменьшить длину решета, с сохранением эффективности очистки, использовать всю площадь решет в технологическом процессе, уменьшить энергоемкость процесса, так как зерно движется под собственным весом относительно решета, а также значительно уменьшить габаритные размеры. Проведенный обзор центробежных сепараторов показал, что из всех устройств наиболее перспективным направлением является центробежно-решетное сепарирование, позволяющее повысить производительность и эффективность выделения мелких примесей.

Во второй главе «Теоретические исследования процесса сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете с продольными круглыми перемычками» рассмотрен процесс движения зерна в активном слое и сепарации на нем, с использованием центробежных сил, обоснованы параметры устройства для предварительной подготовки зернового материала.

Центробежные подсевные решета с круглыми или продолговатыми отверстиями выделяют мелкие примеси из зернового материала. Центробежные зерновые решета с круглыми отверстиями обеспечивают выделение примесей из зернового материала по двум размерным признакам – длине и ширине. Благодаря этому из зернового материала выделяются крупные и длинные примеси (колосья и их части, соломистые примеси). Принципиальная схема воздушно-центробежно-решетного сепарирования представлена на рисунке 1.

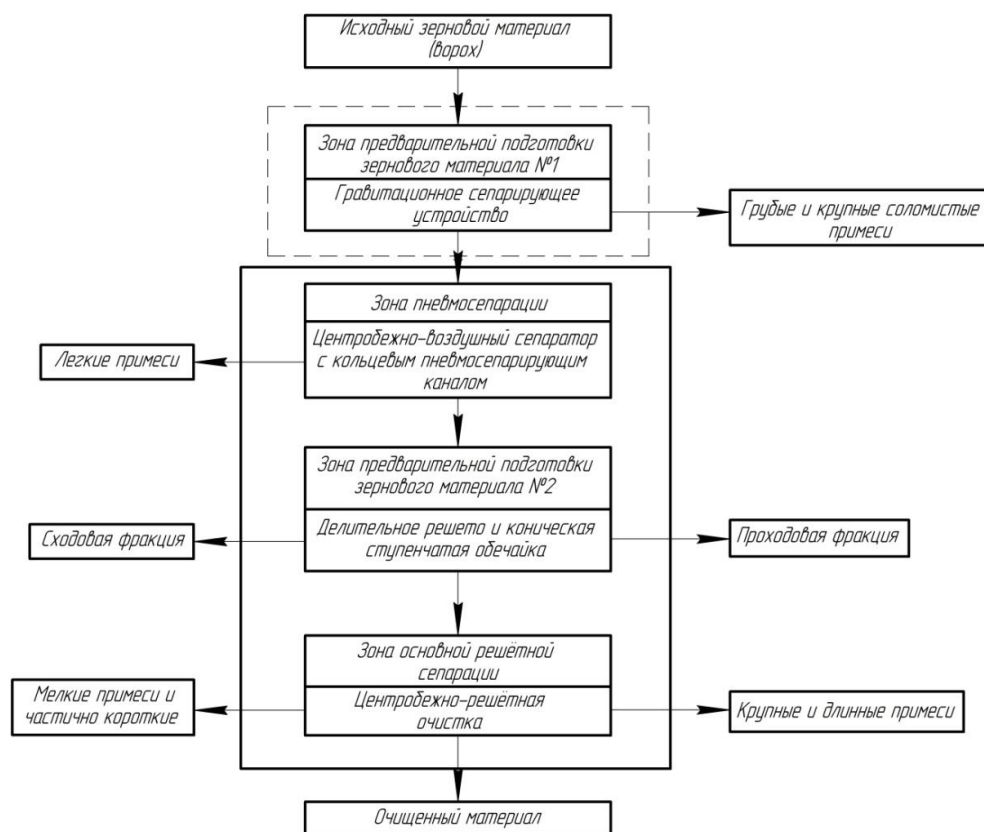


Рисунок 1 - Принципиальная схема воздушно-центробежно-решетного сепарирования

В данной принципиальной схеме выделено четыре зоны, характеризующие рабочий процесс предварительной очистки зерна воздушным центробежно-решётным сепаратором:

- зона предварительной подготовки зернового материала №1 может быть представлена отдельным рабочим органом или располагаться в верхней части сепаратора (в зоне загрузки зернового материала в сепаратор);
- зона пневмосепарации обеспечена центробежно-воздушным сепаратором с кольцевым пневмосепарирующим каналом;
- зона предварительной подготовки зернового материала №2 расположена между зоной пневмосепарации и первым решето (подсевным) центробежно-решётного сепаратора;
- зона загрузки решётного блока расположена в верхней части первого (подсевного) решета центробежно-решётного сепаратора.

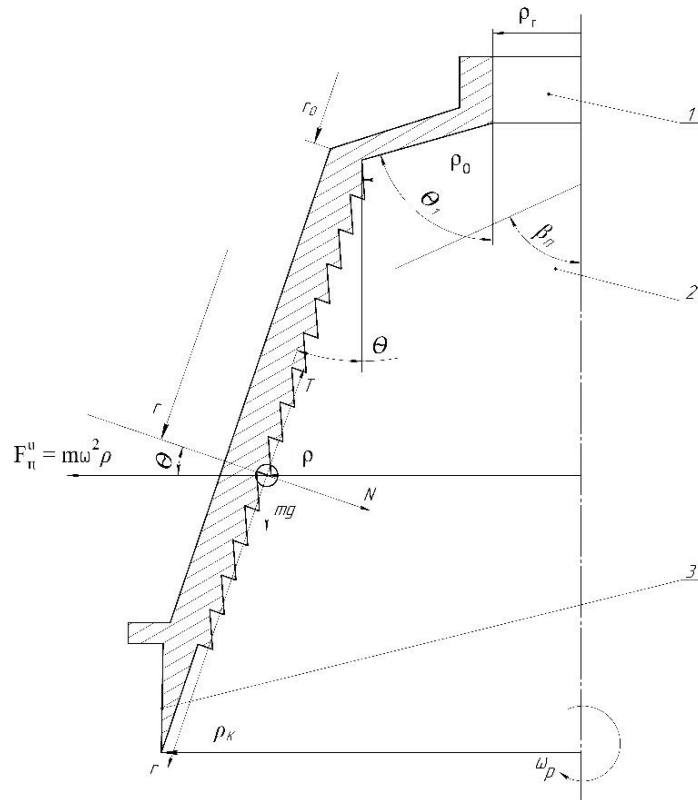
Многочисленные исследования в области сепарирования зерна показывают, что предварительная подготовка зернового материала существенно повышает эффективность очистки. Такие устройства целесообразны для центробежно - решётного сепарирования. Устройство для предварительной подготовки зернового материала представляет собой коническую обечайку со ступенчатой поверхностью. Для эффективного расслоения зернового материала коническая обечайка имеет на своей внутренней части ступенчатую поверхность.

Расчетная схема устройства для предварительной подготовки зернового материала представлена на рисунке 2.

Для безотрывного движения зерна по конусу необходимо, чтобы выполнялось условие, нормальная реакция $N > 0$.

Второе условие:

$$F_{ц}^{u} + G \geq F_{mp} . \quad (1)$$



1 – загрузочная горловина; 2 – питатель; 3 – коническая обечайка
 Рисунок 2 – Схема к определению параметров движения частицы по внутренней поверхности конической обечайки

На частицу действуют сила веса $G = m g$, сила трения $T = fN$ частицы о поверхность обечайки, центробежная сила инерции $F_{ц}^u = m\omega^2\rho$, нормальная реакция N поверхности конической обечайки.

Составим дифференциальное уравнение движения частицы по конусу:

$$m\ddot{r} = mg \cos\theta - fN + F_{ц}^u \sin\theta. \quad (2)$$

Расчеты показывают, что при $\theta > \theta_{кр}$, $\ddot{r} > 0$; при $\theta = \theta_{кр}$, $\ddot{r} = 0$; $W = 15 - 25\%$.

При углах трения $\varphi = 21^\circ - 28^\circ$ (угол трения зерна по стали) и при $K_p = 3,5$, получим:

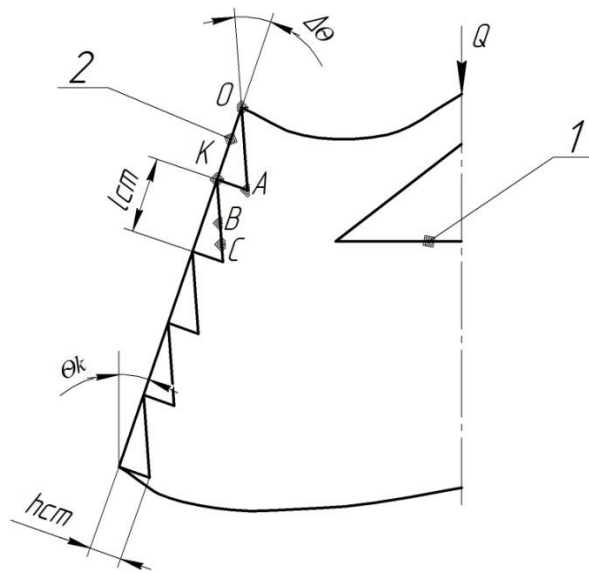
$$\theta_{кр}^{min} = \varphi - \arctg \frac{1}{K_p} \quad (3)$$

Тогда, $\theta_{кр}^{min} = 8,83^\circ$.

Угол раскрытия θ необходимо принять таким, чтобы зерно удерживалось на конусе. Исходя из конструктивных соображений, в сепараторе угол θ принят равным 18° , что не противоречит условию безотрывного движения.

Для нормального расслоения необходимо обеспечить движение зернового материала по ступенчатой поверхности конуса с началом в точке О (рисунок 3).

При движении зернового материала по рабочей поверхности обечайки мелкие и тяжелые частицы будут проникать ближе к конической поверхности, а крупные «всплывут» в верхний слой. Зерновой материал при движении по такой поверхности будет совершать своего рода колебания. При полёте частиц с вершины ступеньки (точка А), материал будет находиться в более разрыхлённом состоянии. При встрече со следующей ступенькой в зоне В-С будет происходить уплотнение (сжатие) порции материала.



1 – питатель; 2 – коническая ступенчатая поверхность

Рисунок 3 – Фрагмент процесса расслоения зернового материала на конической обечайке

Согласно теоретическим исследованиям, принимаем размеры ступенек такими: длина ступенек $OK = l_{cm} = 20$ мм, высота ступенек $AK = h_{ст} = 5$ мм, $\theta_k = 18^\circ$.

Размер l_{cm} также влияет на качество расслоения. При выборе этого размера использовались также исследования А.П. Слепова. При длине образующей конуса $L = 200 \dots 250$ мм размещалось 10 ступенек длиной $l_{cm} = 20$ мм. Поэтому по длине образующей конической обечайки $L = 360$ мм потребуется 18 ступенек.

Из принципиальной схемы (рисунок 1) видно, что в центробежно-решётный сепаратор с вертикальной осью вращения, сепарируемый материал поступает после предварительной подготовки и расслоения на конической обечайке со ступенчатой поверхностью, жёстко связанной с цилиндрическим подсевным решетом. В цилиндрическом подсевном решете центробежные силы используются для улучшения условий выделения проходовой (мелкой) фракции, а перемещение зерновых частиц происходит под действием сил тяжести. Рассмотрим силы, действующие на активный слой (рисунок 4).

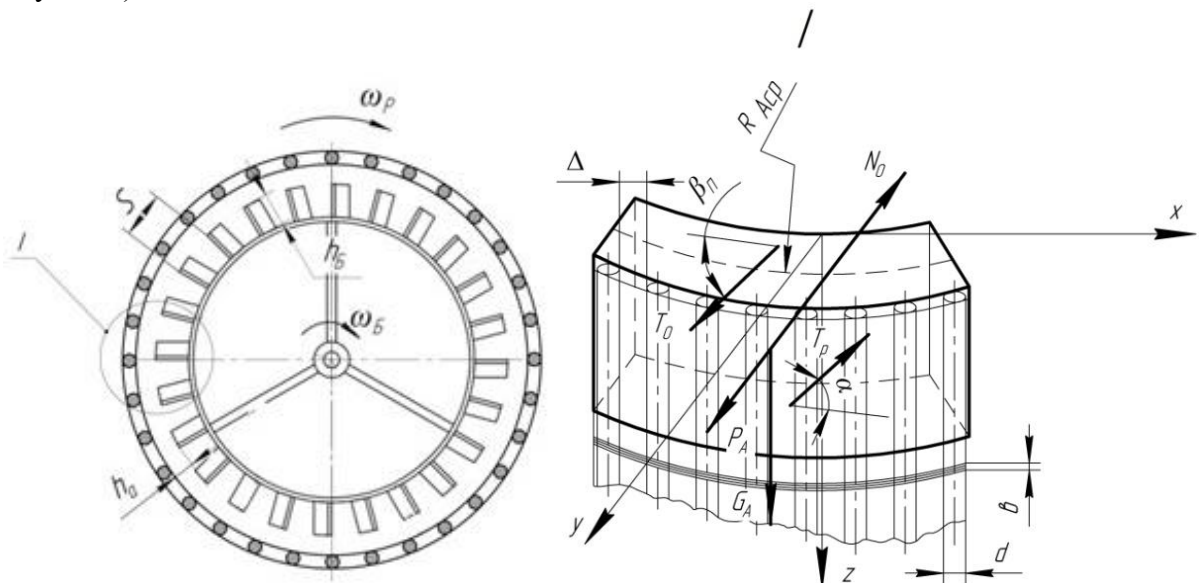


Рисунок 4 - Разрез подсевного решета и схема сил, действующих на зерновой материал выделенного элемента, соответствующая шагу расстановки пластин барабана

Рассмотрим равновесие зернового материала в активном слое:

$$\begin{cases} \Sigma x = T_p \cos\alpha - T_0 \cos\beta_{II} = 0, & (4) \\ \Sigma y = N_p - P_A - N_0 = 0, & (5) \\ \Sigma z = G_A - T_p \sin\alpha + T_0 \sin\beta = F_A^{III}. & (6) \end{cases}$$

Найдём осевое ускорение зернового материала в активном слое:

$$a_{ZA} = \frac{G_A - N_p \cdot f_p \sin\alpha + N_0 \cdot f \cos\beta_{II}}{m_A}, \quad (7)$$

$$a_{ZA} = g - (\omega_{cp}^2 R_{cp} + \mu \frac{S_B}{S_A} \omega_B^2 R_{Bcp}) f_p \sin\alpha + \mu \frac{S_B}{S_A} \omega_B^2 R_{Bcp} f \cos\beta_{II}. \quad (8)$$

Рассмотрим влияние шага расстановки пластин барабана на траекторию движения зернового материала в активном слое, выраженную углом α (рисунок 5).

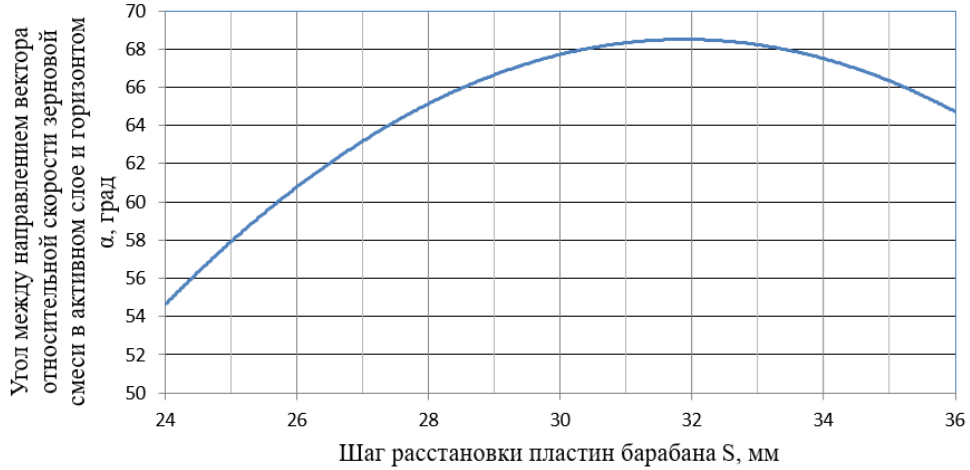


Рисунок 5 - Изменение угла α в зависимости от шага расстановки пластин барабана

Зависимость показывает, что при шаге расстановки пластин барабана $S = 31-33$ мм угол α будет максимальным, это будет способствовать увеличению диспергации зернового материала в активном слое, что способствует сегрегации и повышает эффективность выделения мелких примесей.

Процесс сепарации зернового материала на решётах протекает при взаимодействии двух основных стадий: сегрегации – проникновение частиц проходовой фракции через «толщу» зернового слоя, находящегося на поверхности решета и второй – просеивание проходových частиц через отверстия решета, что является по своей сути вероятностным процессом (рисунок 6).

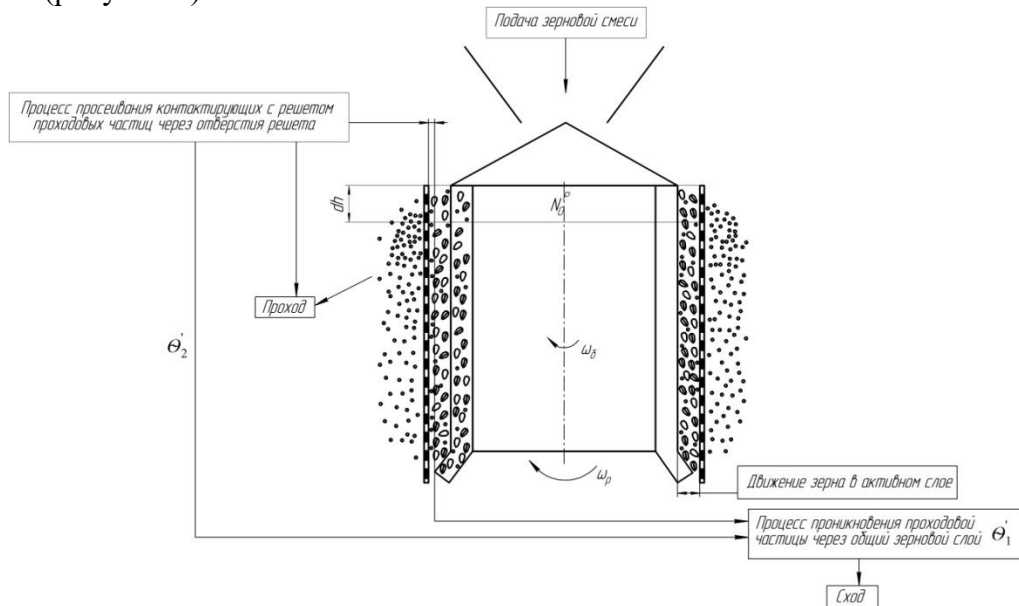


Рисунок 6 - Схема для обоснования модели двухступенчатого процесса сепарации

Выделим кольцевой слой зернового материала высотой dh в начале решета. Содержание проходных частиц в этом объеме обозначим N_0^P .

Вероятность того, что время пребывания проходной частицы в этом выделенном элементе будет заключено между t и $t+\Delta t$, может трактоваться как отношение числа частиц $N_k(t, \Delta t)$, покидающих k -ю ступень в этом интервале времени, к общему числу введенных в систему проходных частиц:

$$P_k(t \leq t_{\Pi} < t + \Delta t) = \frac{N_k(t, \Delta t)}{N_0^P}. \quad (9)$$

По физической сущности эта вероятность есть не что иное, как полнота выделения ϵ проходных частиц.

Плотность распределения вероятностей $\Phi_k(t)$ есть предел отношения вероятности $P_k(t \leq t_{\Pi} < t + \Delta t)$ к интервалу времени Δt при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\Phi_k(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_k(t \leq t_{\Pi} < t + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (10)$$

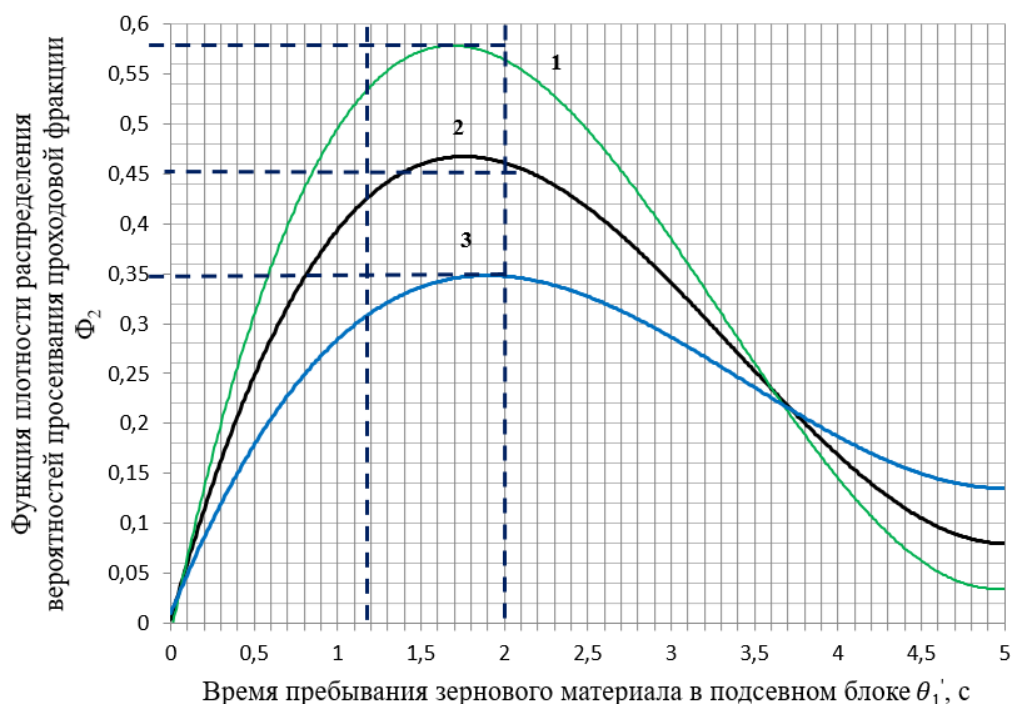
Чтобы сделать структуру уравнения более ясной, выпишем в развернутом виде выражение плотности распределения вероятностей времени пребывания проходной частицы в двухступенчатой модели процесса сепарации (при $k = 2$):

$$\Phi_2(t) = \frac{e^{-\frac{t}{\theta'_1}}}{\theta'_1 - \theta'_2} + \frac{e^{-\frac{t}{\theta'_2}}}{\theta'_2 - \theta'_1} = \frac{e^{-\frac{t}{\theta'_1}} - e^{-\frac{t}{\theta'_2}}}{\theta'_1 - \theta'_2}. \quad (11)$$

Влияние параметра θ'_1 на изменение плотности распределения вероятностей Φ_2 представлено на рисунке 7.

После проведенных преобразований, интересующая нас вероятность равна:

$$F_k(t) = P(0 < t_{\Pi} < t) = \int_0^t \Phi_k(t) dt. \quad (12)$$



1 - $\theta'_1 = 1,439$ и $\theta'_2 = 0,072$; 2 - $\theta'_1 = 1,927$ и $\theta'_2 = 0,072$; 3 - $\theta'_1 = 3,125$ и $\theta'_2 = 0,072$

Рисунок 7 – Плотность распределения вероятностей просеивания проходной фракции в зависимости от среднего времени θ'_1

Максимальная плотность распределения вероятностей просеивания проходной фракции Φ_2 наблюдается при диапазоне времени пребывания зернового материала в подсевном блоке θ'_1 от 1,3 – 2,1 с.

Полноту выделения мелких примесей через решетку можем выразить формулой:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\theta'_1 e^{-\frac{t}{\theta'_1}} - \theta'_2 e^{-\frac{t}{\theta'_2}}}{\theta'_1 - \theta'_2}. \quad (13)$$

Проеивание отдельной проходовой частицы через отверстие решетки является случайным событием, так как может наступить в случайный момент времени. Пренебрегая забиваемостью отверстий, можно принять живое сечение решетки $\mu_0 = \text{const}$ и считать процесс появления события (просеивание частицы через отверстие) пуассоновским процессом. При этих условиях вероятность P_n просеивания зерна через отверстие решетки не будет зависеть от положения выделенного элементарного участка и будет пропорциональна пути скольжения:

$$P_n = p_0 dl = \frac{1}{l_0} dl, \quad (14)$$

где $p_0 = \frac{1}{l_0}$ - коэффициент пропорциональности;

dl - элементарный путь скольжения проходовой частицы.

Найдём величину среднего пути скольжения зерна (проходовой мелкой фракции) по решетке при условии, что зерна проходовой фракции имеют форму шара диаметром d_0 . Для этого выделим на рабочей поверхности элементарный участок длиной dl (в направлении скольжения частицы) и шириной B (на рисунке выделенный участок цилиндрического решетки развёрнут на плоскость и повернут в плоскости на угол $90^\circ - \alpha$) (рисунок 8).

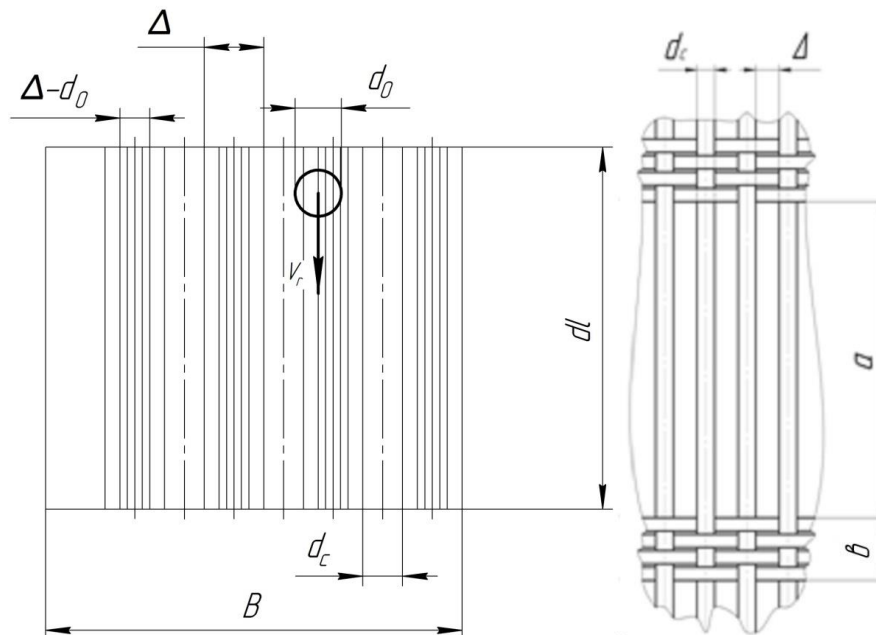


Рисунок 8 – Схема к определению вероятности просеивания проходовой частицы на элементарном пути dl скольжения и фрагмент рабочей поверхности решетки

Живое сечение решетки с шириной отверстия $\Delta = 2,0$ мм, диаметром продольной перемычки $d = 0,75\Delta$, длиной продолговатого отверстия $a = 24$ мм, равно $\mu_0 = 0,439$.

При известных значениях θ'_1 и θ'_2 , применяя выражение (13) рассмотрим изменение эффективности выделения проходových частиц в зависимости от среднего времени пребывания зернового материала в подсевном блоке для решет с различной шириной отверстий (рисунок 9).

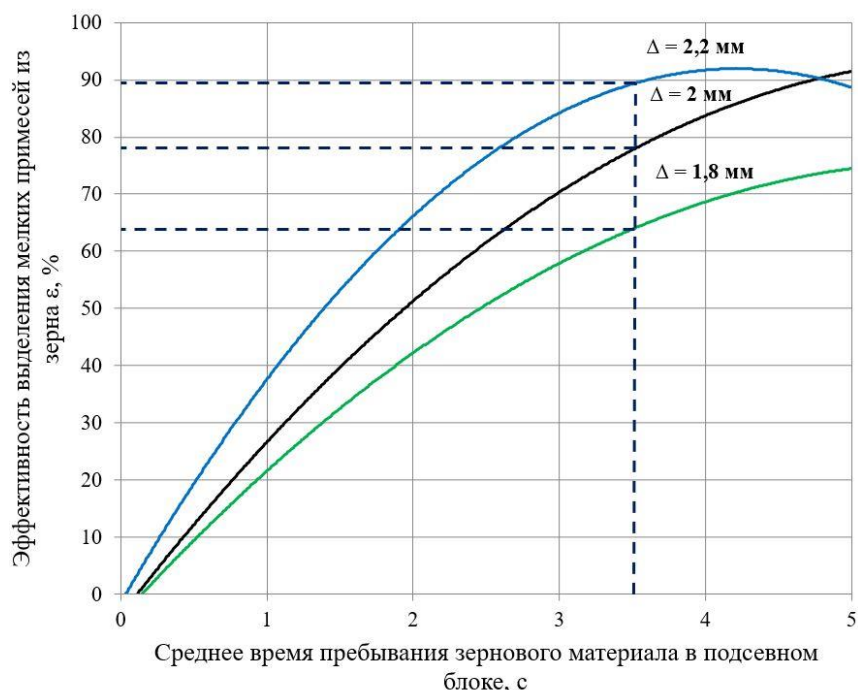


Рисунок 9 – Изменение полноты выделения проходовых частиц в зависимости от среднего времени пребывания зернового материала в подсевном блоке

Выявлены зависимости среднего времени пребывания зернового материала в подсевном блоке при различных размерах ширины отверстий решетки. С увеличением времени пребывания частиц на решетке эффективность сепарирования возрастает.

При среднем времени пребывания проходовых частиц, равным 3,5 с для решетки с шириной отверстия 2,0 мм эффективность сепарирования ϵ составляет 79%.

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

Выполненные теоретические исследования показали основные закономерности сепарирования зернового материала на подсевном решетке с пластинчатым барабаном, а также позволили выявить конструктивные и кинематические параметры решетки. Для подтверждения полученных теоретических результатов, были проведены ряд опытных исследований, для выполнения которых была разработана программа и методика экспериментальных исследований.

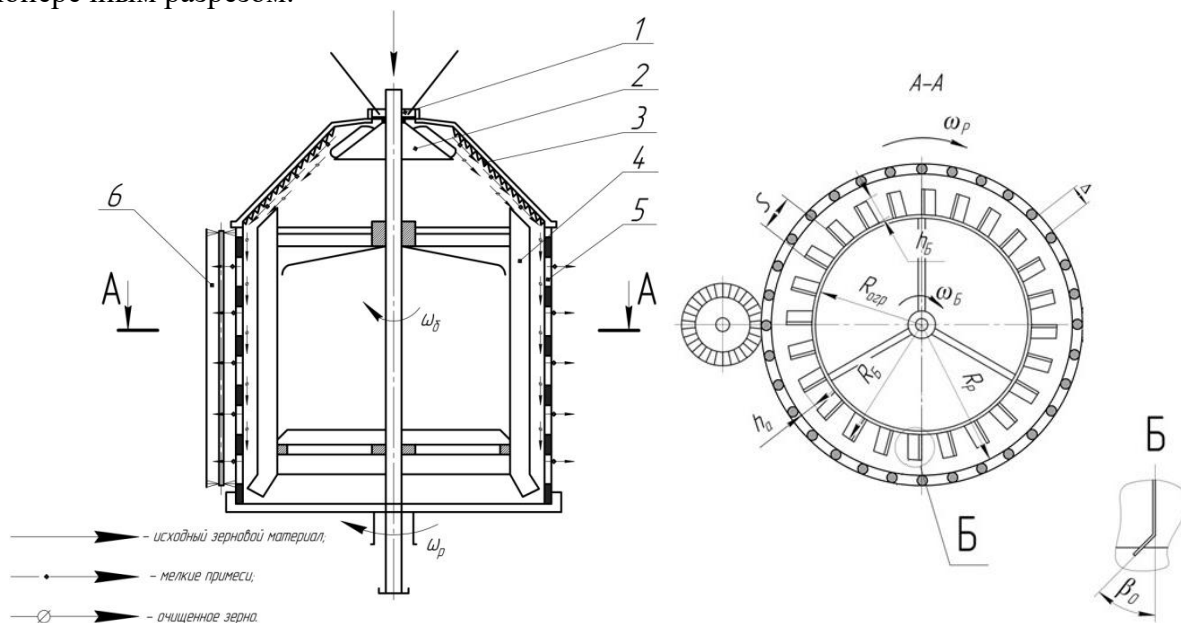
Для подтверждения основных теоретических положений работы экспериментальные исследования проводились согласно следующим положениям программы экспериментальных исследований:

- изучение влияния ширины отверстия между круглыми продольными перемычками подсевного решетки на эффективность очистки зерна от мелких примесей;
- опыты по влиянию размеров и формы отверстий решетки (с круглыми отверстиями и продолговатыми отверстиями с круглыми продольными перемычками) на эффективность сепарирования;
- изучение влияния шага расстановки пластин барабана на эффективность очистки зерна от мелких примесей;
- определение рациональных значений угловой скорости вращения барабана и решетки;
- определение оптимальных параметров удельной подачи зернового материала на полноту выделения мелких примесей;
- определение просеваемости по высоте цилиндрического решетки;
- опыты по определению влияния засоренности исходного материала на удельную производительность и полноту выделения мелких примесей;

- проведение многофакторного экспериментального исследования;
- производственные испытания макетного образца центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и пластинчатым барабаном, с радиально расположенными пластинами и его технико-экономическая оценка.

Представлены приборы и оборудование, использующиеся при проведении опытов.

На рисунке 10 представлена схема работы решетного подсевного блока с его поперечным разрезом.

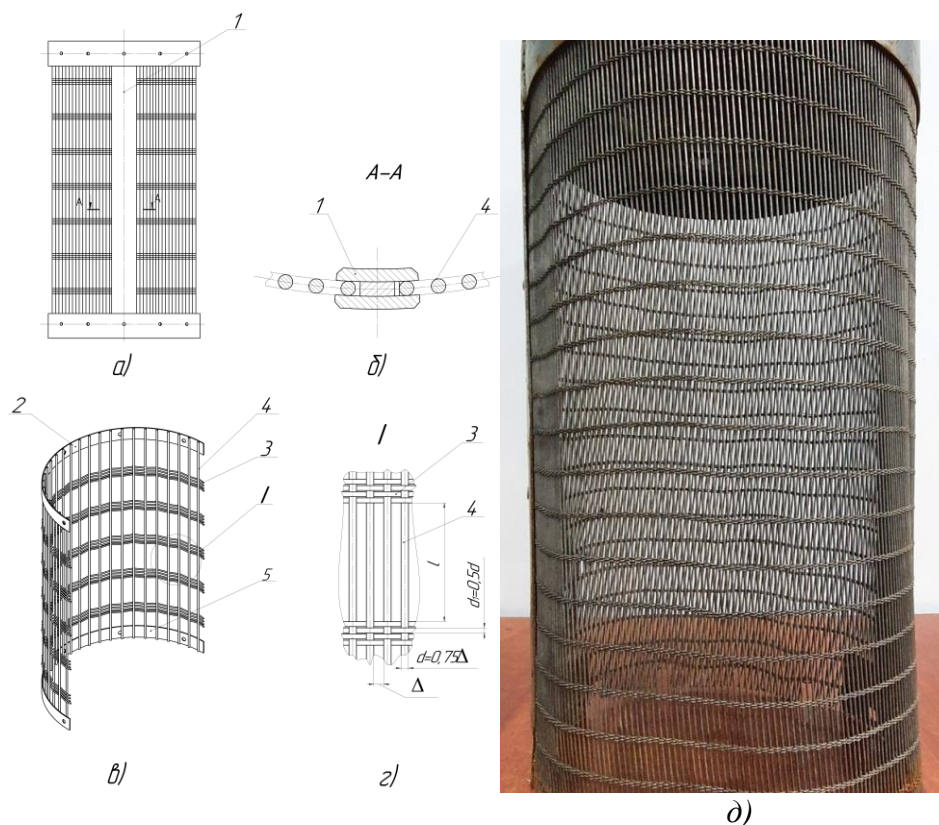


1 – загрузочная горловина; 2 – конический разбрасыватель; 3 – коническая обечайка со ступенчатой поверхностью; 4 – пластинчатый барабан; 5 – цилиндрическое подсевное решето; 6 – цилиндрическая щетка

Рисунок 10 – Схема работы подсевного решетного блока

Сепаратор работает следующим образом. Исходный зерновой материал поступает в загрузочную горловину 1 и подается на конический разбрасыватель 2, лопатки сообщают зерновому материалу угловую скорость равную угловой скорости разбрасывателя, далее зерновой материал поступает на ступенчатую поверхность конической обечайки 3, где происходит расслоение. После предварительной подготовки на конической обечайке зерновой материал поступает на цилиндрическое подсевное решето 5. Мелкие примеси просеиваются через отверстия решета, а очищенный материал идет сходом. Решето 5 и барабан 4 вращаются в одну сторону, но с разными скоростями ($\frac{\omega_б}{\omega_р} = 0,57$) благодаря приводу, при этом угловая скорость конического разбрасывателя равна угловой скорости решета. Очистка отверстий решета от застрявших зерен производится цилиндрической щеткой 6.

При проведении экспериментальных исследований на центробежно-решетный сепаратор с вертикальной осью вращения было установлено цилиндрическое подсевное решето с круглыми продольными перемычками, состоящее из двух полуцилиндров (рисунок 11).



1 – цилиндрический каркас; 2 – верхнее полукольцо; 3 – поперечные перемычки; 4 – продольные перемычки; 5 – нижнее полукольцо;
 а) – цилиндрическое подсевное решето в сборе; б) – цилиндрическое подсевное решето в разрезе (вид сверху); в) – 3D – модель полуцилиндра подсевного решета; г) – фрагмент цилиндрического подсевного решета; д) – опытный образец цилиндрического подсевного решета с круглыми продольными перемычками
 Рисунок 11 – Цилиндрическое подсевное решето с круглыми продольными перемычками

Каждый из полуцилиндров снабжен верхним 2 и нижним 5 полукольцами, чем обеспечивается их жесткость, причем верхняя часть полуцилиндра крепится к цилиндрической части конической обечайки, а нижняя часть полуцилиндра к приводной обечайке.

Постоянный рабочий размер отверстий, образованных круглыми продольными перемычками 4, диаметром $d=0,75\Delta$ ширины отверстий, обеспечивается поперечными перемычками 3, состоящими из тросиков, диаметром $d_1 = 0,5d$, вплетенными в продольные перемычки. Поперечные перемычки диаметром в два раза меньше, чем продольные перемычки, имеют четырехрядное вплетение и размещены с шагом вдоль образующей цилиндра, состоящего из двух полуцилиндров, равным $(2,0...2,5) h_a$ толщины активного слоя.

При проведении экспериментальных исследований приняты два критерия оптимизации.

Эффективность сепарации определяли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{P_1 a_{\text{вых}}^M}{P_0 a_{\text{исх}}^M} 100\% ; \quad (15)$$

где P_1 – масса проходовой фракции, кг;

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

P_0 – масса исходного материала, кг;

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

Потери зерна в отходы:

$$\Pi = \frac{P_1 a_{вых}^{кр}}{P_0 a_{исх}^{кр}} 100\% ; \quad (16)$$

где $a_{вых}^{кр}$ – содержание крупной фракции в проходе;

$a_{исх}^{кр}$ – содержание крупной фракции в исходном материале.

В ходе проведения экспериментальных исследований было выявлено 9 факторов, влияющих на процесс сепарации центробежно-решетного сепаратора (кинематических, технологических, конструктивных):

C_0 – исходная засоренность зернового материала, %;

Q – подача зернового материала, 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 – угловая скорость вращения решета, с⁻¹;

h_A – толщина активного слоя, мм;

W – влажность исходного материала, %;

Δ – ширина отверстия решета, мм.

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

При проведении экспериментов использовалась методика оптимального планирования эксперимента.

Опираясь на полученные экспериментальные данные, были определены 4 наиболее значимых параметра для проведения многофакторного эксперимента. Эксперименты проводились на трех уровнях для каждого из показателей. Факторы и уровни их варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значимые факторы и уровни их варьирования по эффективности очистки и потерям зерна в отходы

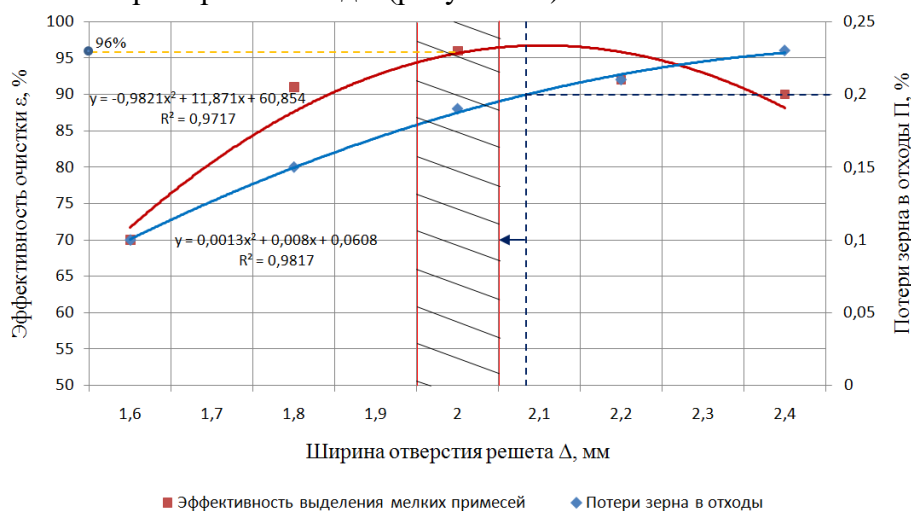
Факторы и их наименование	Обозначение	Интервал варьирования	Значение факторов соответствующим уровням		
			-1	0	+1
C_0 – засоренность исходного материала, %;	$X_1 (X_1)$	2	2	4	6
Δ – ширина отверстия решета, мм;	$X_2 (X_3)$	0,2	1,8	2,0	2,2
Q – подача зернового материала, т/(ч×м ²);	$X_3 (X_7)$	1,75	10,31	12,06	13,81
ω_p – угловая скорость решета, с ⁻¹ .	$X_4 (X_6)$	0,74	14,31	15,05	15,79

Для обоснования параметров и режимов работы подсевного решета центробежно-решетного сепаратора, 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 исследований были проведены однофакторные, отсеивающие и

многофакторные эксперименты. Основные экспериментальные исследования проводились с предварительной подготовкой зернового материала.

Экспериментальными исследованиями установлено, что при увеличении ширины продолговатого отверстия решета происходит возрастание эффективности очистки, при этом возрастают потери зерна в отходы (рисунок 12).

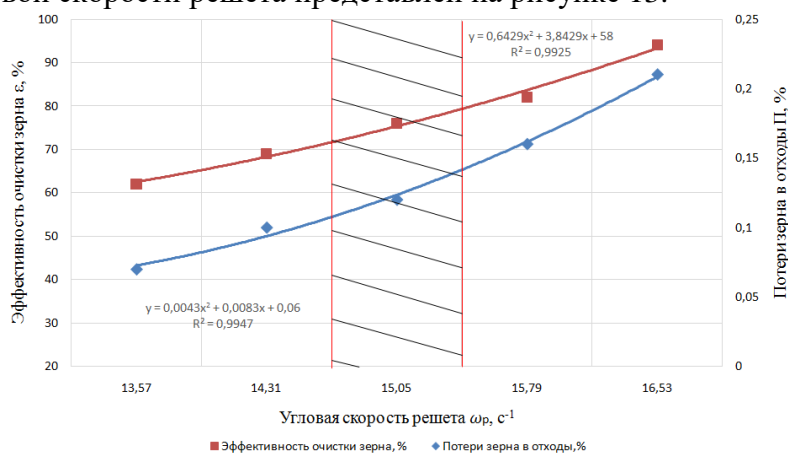


■ Эффективность выделения мелких примесей ◆ Потери зерна в отходы
 $\beta_0 = 20^\circ$; $S = 32$ мм; $\omega_p = 15,05$ с⁻¹; $Q = 12,06$ т/(м²×ч); $C_0 = 4$ % (по весу)

Рисунок 12 – Зависимость эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от ширины отверстия решета

Исходя из рисунка 12, можно сделать вывод о том, что высокая эффективность очистки зерна от мелких примесей равная 96%, при допустимых показателях потерь зерна в отходы 0,18 %, в центробежно-решётном сепараторе достигается, с помощью применения цилиндрического подсевного решета с шириной отверстия 2,0 мм и пластин с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения.

В ходе проведения экспериментов угловая скорость решета ω_p изменялась в пределах от 13,57 до 16,53 с⁻¹. Характер изменения эффективности очистки и потерь зерна в отходы от угловой скорости решета представлен на рисунке 13.



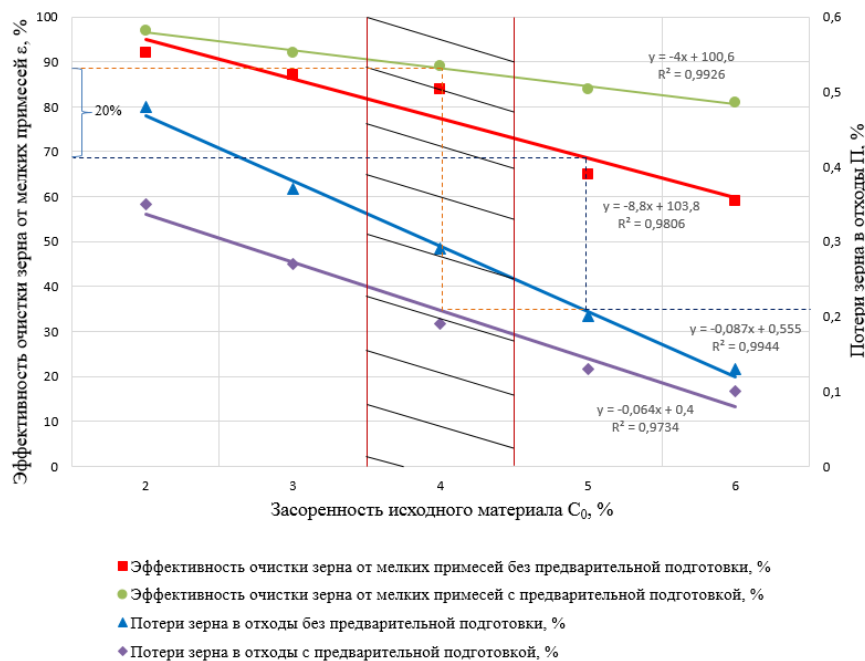
$\beta_0 = 20^\circ$; $S = 32$ мм; $Q = 12,06$ т/(м²×ч); $C_0 = 4$ % (по весу); $\Delta = 2,0$ мм.

Рисунок 13 – Влияние угловой скорости решета на эффективность выделения мелких примесей и потери зерна в отходы

Анализ результатов экспериментов свидетельствует о том, что при увеличении угловой скорости решета до 16,53 с⁻¹ рабочий процесс протекает устойчиво, эффективность очистки зерна возрастает. Однако увеличение угловой скорости свыше 16,53 с⁻¹ приводит к прекращению движения зернового материала относительно сепарирующей поверхности. Недостатком центробежных цилиндрических сепараторов с вертикальной осью вращения

является жесткий кинематический режим с узкими пределами регулирования. Поэтому наиболее приемлемыми угловыми скоростями являются скорости от 14,68 до 15,79 с⁻¹.

Одним из параметров, оказывающих влияние на эффективность работы зерноочистительных машин, является засоренность зернового материала. Получена зависимость эффективности выделения мелких примесей на центробежно-решетном сепараторе от засоренности исходного материала, которая представлена на рисунке 14. На графике прослеживается снижение эффективности очистки при увеличении засоренности.



$$\beta_0 = 20^\circ; S = 32 \text{ мм}; \omega_p = 15,05 \text{ с}^{-1}; Q = 12,06 \text{ т}/(\text{м}^2 \times \text{ч}); \Delta = 2,0 \text{ мм}.$$

Рисунок 14 – Зависимость эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от засоренности исходного материала

Приведены сравнительные результаты экспериментальных исследований базового варианта без предварительной подготовки, и варианта с применением предварительной подготовки зернового материала. Выявлено, что при засоренности исходного материала равной 4%, эффективность очистки при применении предварительной подготовки возросла на 11%, при этом потери зерна в отходы не превысили 0,2%. Установлено, что повышение засоренности зернового материала мелкими примесями с 2 до 6% приводит к снижению эффективности очистки с 94 до 60%, без применения предварительной подготовки. При применении предварительной подготовки эффективность снижается с 97 до 83%. Таким образом, при применении предварительной подготовки удалось повысить эффективность очистки при максимальных значениях засоренности на 23%, а при минимальных значениях на 3%. Потери зерна в отходы с увеличением засоренности снижаются. Это объясняется тем, что отверстия решета в процессе сепарации «заняты» проходовой фракцией.

В результате проведенного отсеивающего эксперимента установлено, что наиболее значимыми факторами являются: ширина отверстия Δ подсевного решета, засорённость исходного зернового материала C_0 , угловая скорость вращения решета ω_p и подача зернового материала Q .

Результаты проведенных многофакторных экспериментов представлены на рисунках 15, 16.

Уравнение регрессии в кодированном виде для критерия оптимизации \mathcal{E} после проверки и удаления незначимых коэффициентов имеет вид:

$$Y = 72,81 - 8,291X_1 + 18,974X_2 + 4,194X_3 + 5,149X_4 - 3,154X_1 X_3 - 4,485 X_2 X_3 - 1,425X_2 X_4 + 1,019X_3 X_4 + 11,157 X_1 X_2 - 13,218X_1^2 + 3,628 X_3^2 - 7,213X_4^2, \% \quad (17)$$

Уравнение регрессии в кодированном виде для критерия оптимизации П:

$$Y = 0,296 + 0,05X_2 + 0,034X_3 + 0,061X_4 + 0,016X_1X_2 + 0,018X_3X_4 - 0,052X_1^2 - 0,037X_2^2 - 0,047X_4^2, \%$$
(18)

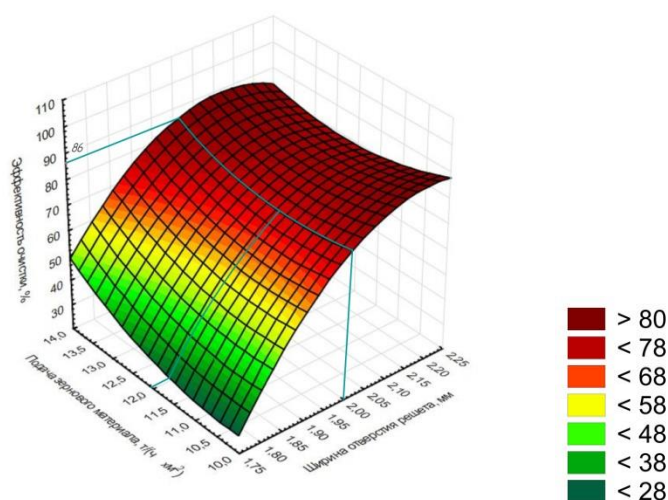


Рисунок 15 – Влияние подачи зернового материала Q и ширины отверстия решета Δ на эффективность очистки ε при $X_1 = 0, X_4 = +1$

Представим графики зависимости, описываемые уравнениями (17) и (18) в виде поверхности отклика в трехмерном пространстве (рисунок 15, 16). Подача зернового материала оказывает существенное влияние на эффективность процесса сепарирования.

При увеличении размера рабочей ширины отверстия решета эффективность сепарирования возрастает при всех значениях подачи. Дальнейшее увеличение подачи при определенном размере ширины отверстия приводит к снижению эффективности выделения мелких примесей и повышению потерь зерна. Различный характер изменения эффективности очистки наблюдается, когда сепаратор работает с предварительным расслоением зернового материала и без применения этой технологической операции.

График зависимости потерь зерна от подачи зернового материала Q и ширины отверстия решета Δ при фиксированных значениях засоренности исходного зернового материала C_0 и угловой скорости вращения решета ω_p представлен на рисунке 16.

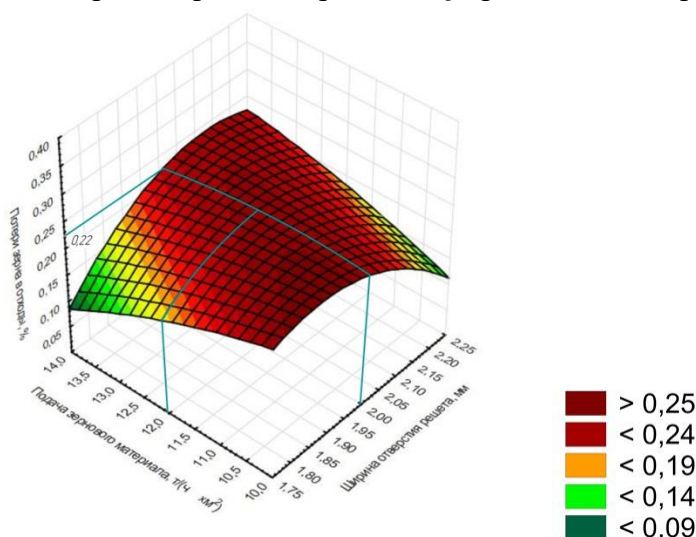


Рисунок 16 – Влияние подачи зернового материала Q и ширины отверстия решета Δ на потери зерна в отходы при $X_1 = 0, X_4 = +1$

При увеличении ширины отверстия решета и повышении подачи зернового материала потери зерна возрастают. То, что увеличение размера отверстия

цилиндрического подсевного решета приводит к повышению потерь зерна характерно и для подсевных решет плоскорешетных сепараторов. Повышение подачи зернового материала до максимально возможных значений способствует также повышению потерь зерна.

В уборочный сезон 2022 года была проведена проверка на соответствие расчетных конструктивных параметров макетного экспериментального образца центробежно – решетного сепаратора (рисунок 17).

Сепаратор включал в себя воздушный кольцевой пневмоканал с осадочной камерой, коническую обечайку со ступенчатой поверхностью, делительное решето, подсевное решето с пластинчатым барабаном. В ходе производственных испытаний использовалось решето с прямоугольными отверстиями с круглыми продольными перемычками, а барабан состоял из цилиндра с расположенными радиально по образующей пластинами с отгибом в основании барабана по направлению его вращения.



Рисунок 17 – Воздушный центробежно-решетный сепаратор на испытаниях

Производственные испытания экспериментального образца сепаратора показали, что при влажности зерна 14,4 %, производительности сепаратора 30,6 т/ч полнота выделения мелких примесей составила 85,4%.

В пятой главе «Технико-экономическая оценка центробежно-решетного сепаратора» проведена оценка экономической эффективности центробежно-решетного сепаратора с подсевным решето. Центробежно-решетный сепаратор 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 расчетная годовая экономия совокупных затрат денежных средств составляет около 517 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение центробежных цилиндрических решет с вертикальной осью вращения на очистке зерна от мелких примесей является наиболее перспективным способом сепарирования. Производительность такого решета выше, чем колеблющегося плоского. Предварительная подготовка зернового материала обеспечивает повышение эффективности процесса сепарации на подсевном решете.

2. Разработана математическая модель движения зерна в активном слое и процесса сепарации на подсевном решете. Установлено, что максимальная эффективность выделения мелких примесей достигнута при пребывании на решете проходových частиц не менее 3...4 секунд.

3. Обоснованы параметры устройства для предварительной подготовки зернового материала и решета. Оптимальные значения параметров: угол раскрытия конуса обечайки

со ступенчатой поверхностью $\Theta = 18^\circ$, длина ступенек $l_{ст} = 20$ мм, высота ступенек $h_{ст} = 5$ мм, шаг расстановки радиальных пластин барабана $S = 32$ мм, угловая скорость вращения решета $\omega_p = 15,05 \text{ с}^{-1}$, ширина отверстия $\Delta = 2,0$ мм.

4. Подтверждена экспериментально эффективность применения предварительной подготовки зернового материала. Определено, что при увеличении засоренности с 2 до 6%, с применением предварительной подготовки зернового материала эффективность выделения мелких примесей снижалась и изменялась с 97 до 83%, а без предварительного расслоения с 94 до 60%. Выявлено, что при засоренности исходного зернового материала 4%, эффективность очистки при применении предварительной подготовки возросла на 11%, а потери зерна в отходы составили 0,2%.

5. Производственные испытания экспериментального образца центробежно-решетного сепаратора показали, что при производительности 30,6 т/ч, полнота выделения мелких примесей составила 85,4 %.

6. Центробежно-решетный сепаратор с подсевным решетом в сочетании с воздушным потоком может использоваться в стационарных и мобильных технологиях для очистки продовольственного зерна для работы в режиме предварительной очистки. Годовая экономия совокупных денежных средств от внедрения предлагаемого сепаратора составляет 517 тыс. руб.

7. Дальнейшие исследования целесообразно вести в направлении совместной работы подсевного и зернового блоков на данном принципе сепарации в сочетании с кольцевым пневмосепарирующим каналом.

Совмещение подсевного и зернового блоков центробежно-решетной сепарации существенно может расширить функциональные возможности зерноочистительной машины, а с применением воздушной сепарации в кольцевом пневмосепарирующем канале эти возможности возрастают.

Рекомендации производству

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

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшую разработку темы необходимо вести в направлении совместной работы подсевного и зернового блоков на данном принципе сепарации в сочетании с кольцевым пневмосепарирующим каналом. Разработка совмещения подсевного и зернового блоков центробежно-решетного сепарирования с применением воздушной сепарации в кольцевом пневмосепарирующем канале позволит значительно расширить функциональные возможности зерноочистительной машины.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Микитюк, М.Е. Параметры гравитационного сепарирующего устройства к загрузочной норрии / М.Е. Микитюк, Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – №3(221). – С. 94-98.

2. Стрикунов, Н.И. К обоснованию параметров пластинчатого барабана центробежно-решетного сепаратора / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков, М.Е. Микитюк // Вестник АГАУ. – 2022. – №4(210). – С. 107-112.

3. Стрикунов, Н.И. Параметры движения зерна по конической обечайке со ступенчатой поверхностью / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков, М.Е. Микитюк // Вестник АГАУ. – 2021. – №1(195). – С. 101- 106.

4. 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 АГАУ.–2021. – №1(195). – С. 96-101.

5. Стрикунов, Н.И. Технология очистки зерна на основе центробежно-решетного сепарирования / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков, М.Е. Микитюк // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – №9(215). – С. 93-97.

Патенты Российской Федерации

6. 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., Щербаков С.С., Микитюк М.Е.; заявитель и патентообладатель Барнаул, Алтайский ГАУ. - № 2020144068; заявл. 29.12.2020; опубл.: 24.08.2021, Бюл. №24. – 11 с.

7. Патент № 2777102 Российская Федерация С1 МПК А01F 12/44 (2006.01), А01F 12/44 (2022.05)/ Способ послеуборочной обработки зерна / Стрикунов Н.И., Леканов С.В., Щербаков С.С., Микитюк М.Е.; заявитель и патентообладатель Барнаул, Алтайский ГАУ. - № 2021140025; заявл. 30.12.2021; опубл.: 01.08.2022, Бюл. №22. – 8 с.

8. Патент № 2749395 Российская Федерация С1 МПК В07В 9/00 (2006.01), В07В 9/00 (2021.02)/ Мобильный зерноочистительный агрегат / Леканов С.В., Стрикунов Н.И., Черкашин С.А., Щербаков С.С., Микитюк М.Е.; заявитель и патентообладатель Барнаул, Алтайский ГАУ. - № 2020132603; заявл. 01.10.2020; опубл.: 09.06.2021, Бюл. №16. – 10 с.

Публикации в других изданиях

9. Микитюк, М.Е. Анализ подсевных решет центробежно-решетного сепаратора / М.Е. Микитюк, Н.И. Стрикунов // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: в 2 кн. XVIII Международная научно-практическая конференция – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2023 – Кн. 1. – С. 141-143.

10. Микитюк, М.Е. Обоснование основных параметров цилиндрического подсевного решета центробежно-решетного сепаратора / М.Е. Микитюк, Н.И. Стрикунов // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: в 2 кн. XVI Международная научно-практическая конференция – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2021 – Кн. 2. – С. 25-27.

11. Леканов, С.В. Очистка зерна самопередвижными зерноочистительными машинами / С.В. Леканов, Н.И. Стрикунов, М.Е. Микитюк, Н.М. Чуклин // Молодой ученый. Международный научный журнал – 2020. – № 49 (339). – С.37-39.

12. Микитюк, М.Е. Эффективность очистки зерна на подсевном решете центробежно-решетного сепаратора / М.Е. Микитюк, Н.И. Стрикунов // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: в 2 кн. XVII Международная научно-практическая конференция - Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2022 – Кн. 2. – С. 57-59.