

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент  
Стрикунов Н.И.

Барнаул 2023

## Оглавление

Введение .....	5
Глава 1 Современное состояние вопроса сепарации зернового материала и задачи исследования .....	11
1.1 Анализ конструктивных решений центробежно-решетных сепараторов для очистки зерна и их технологические особенности.....	11
1.2 Достоинства и недостатки центробежных решет.....	18
1.3 Характеристика решет и отверстий решет зерноочистительных машин и их классификация.....	21
1.4 Процесс разделения зерна на различных решетях .....	24
1.5 Пути интенсификации процесса сепарации зерна на центробежных решётах. 31	
1.5.1 Предварительная подготовка зернового материала в центробежно-решетных сепараторах с вертикальной осью вращения.....	35
1.5.2 Аспирационные системы центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения.....	41
1.6 Выводы и задачи исследований.....	42
Глава 2 Теоретические исследования процесса сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете с продольными круглыми перемычками.....	45
2.1 Обоснование технологической схемы воздушного центробежно-решетного сепаратора.....	45
2.2 Обоснование параметров гравитационного сепарирующего устройства .....	51
2.3 Параметры кольцевого пневмосепарирующего канала .....	55
2.3.1 Технологическая эффективность центробежно-воздушного сепарирования 59	
2.4 Обоснование параметров устройства для предварительной подготовки зернового материала .....	61
2.4.1 Технологические особенности работы конической обечайки со ступенчатой поверхностью .....	61

2.4.2 Движение частицы по внутренней поверхности конической обечайки со ступенчатой поверхностью.....	63
2.4.3 Аналитическое исследование процесса движения зернового материала по внутренней поверхности конической обечайки .....	68
2.5 Движение зернового материала в активном слое цилиндрического подсевного решета .....	71
2.6 Уравнение процесса сепарации на подсевном цилиндрическом решете центробежно-решётного сепаратора.....	74
Выводы по главе .....	86
Глава 3 Программа и методика экспериментальных исследований .....	88
3.1 Программа экспериментальных исследований .....	88
3.3 Описание экспериментальной установки .....	93
3.4 Приборы и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях .....	101
3.5 Характеристика зернового материала.....	103
3.6 Методика проведения экспериментальных исследований .....	104
3.7 Методика проведения многофакторного эксперимента .....	109
3.8 Экспериментальные исследования гравитационного сепарирующего устройства.....	114
3.9 Методика производственных испытаний экспериментального образца центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и пластинчатым барабаном .....	117
Глава 4 Результаты экспериментальных исследований и их анализ.....	119
4.1 Влияние ширины отверстия решета на эффективность очистки и потери зерна в отходы.....	120
4.2 Влияние диаметра отверстий решета на эффективность очистки и потери зерна в отходы.....	121
4.3 Влияние шага расстановки пластин барабана на эффективность очистки зерна от мелких примесей .....	123
4.5 Энергетические затраты на работу сепаратора .....	127

4.7 Влияние удельной подачи зернового материала на полноту выделения мелких примесей .....	131
4.8 Влияние засоренности исходного зернового материала на показатели процесса сепарации.....	132
4.9 Результаты исследования гравитационного сепарирующего устройства.....	134
4.10 Параметры, определяющие эффективность процесса сепарации и их оптимизация .....	135
4.11 Результаты производственных испытаний центробежно-решетного сепаратора с подсевным блоком .....	145
Выводы по главе .....	148
Глава 5 Техничко-экономическая оценка центробежно-решетного сепаратора....	149
5.1 Цена реализации проектируемой машины заводом-изготовителем .....	150
5.2 Балансовая стоимость машины .....	152
5.3 Годовая выработка машины .....	152
5.4 Определение удельных эксплуатационных расходов .....	153
5.5 Удельная энергоемкость .....	155
5.6 Удельная металлоемкость.....	155
5.7 Расчет удельной трудоемкости работы машин .....	155
5.8 Удельные капиталовложения на единицу работы.....	155
5.9 Совокупные затраты денежных средств на единицу работы .....	156
5.10 Годовая экономия совокупных затрат денежных средств от внедрения предлагаемой зерноочистительной машины ВЦР – 50.....	157
5.11 Экономия капиталовложений в связи с внедрением новой машины .....	157
Общие выводы .....	160
Список литературы .....	162
Приложение А. Патенты Российской Федерации .....	183
Приложение Б. Акты внедрения .....	186
Приложение В. Техническая характеристика машины.....	192
Приложение Г. Исходная засоренность зернового вороха пшеницы .....	193

## Введение

Главной задачей агропромышленного комплекса является обеспечение 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.

Непрерывное и стабильное наращивание производства зерна должно основываться на росте урожайности зерновых культур, сокращении потерь зерна при уборке и послеуборочной обработке. Без своевременной и качественной послеуборочной обработки невозможно получить хороших семян. Сепарация является одной из основных технологических операций в процессах послеуборочной обработки зерна.

Повышение производительности зерноочистительных машин можно осуществить за счет их сепарирующих рабочих органов, так как плоские пробивные решета, практически исчерпали резервы повышения производительности. Поэтому они не могут удовлетворить все возрастающие потребности зернопроизводства в отношении производительности и качества их работы.

Наиболее перспективным направлением при разработке новых рабочих органов машин предварительной очистки является центробежно-решетное сепарирование.

Центробежно-решетное сепарирование зерновых материалов показало высокую эффективность, где 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 [164].

В этой связи, разработка и совершенствование технических средств, для интенсификации процессов предварительной и первичной очистки зерна является актуальной научно-практической проблемой, имеющей большое народно-хозяйственное значение.

Выбранное направление исследований весьма актуально и подтверждается Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы, утвержденной постановлением Правительства РФ от 25 августа 2017 года №996, государственной программой Алтайского края – «Развитие сельского хозяйства Алтайского края», утвержденной постановлением Администрации Алтайского края от 05 октября 2012 года №523 (с изменениями на 16 декабря 2019 года), планом НИР Алтайского государственного аграрного университета – «Разработка энерго-ресурсосберегающих технологий и технических средств, для возделывания зерновых культур и послеуборочной обработки зерна».

В работе дан анализ современного состояния процесса сепарации на решетках и рассмотрены факторы, влияющие на процесс сепарации. Были определены пути повышения эффективности за счет применения предварительной подготовки зернового материала и подсевного решета.

Теоретически рассмотрен вопрос движения зерновых частиц по конической обечайке со ступенчатой поверхностью и процесс движения зерна в активном слое цилиндрического подсевного решета.

Теоретическим моделированием на ЭВМ получено рациональное соотношение конструктивно-режимных параметров сепаратора, основных факторов, характеризующих процесс сепарации.

Разработана математическая модель процесса сепарации на цилиндрическом подсевном решете и на ЭВМ проверена оценка степени влияния отдельных факторов на результаты сепарирования.

Экспериментальные исследования подтвердили основные теоретические выводы. Получены аналитические выражения качественных показателей процесса сепарации.

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

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

**Предмет исследования** – закономерности процесса сепарации зерна 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.

**Научная гипотеза** – заключается в том, что повышение эффективности процесса сепарации зерна в центробежно-решетном сепараторе может быть обеспечено за счет применения цилиндрического подсевного решета.

**Научная новизна и теоретическая значимость:**

1. Предложена математическая модель и технологическая схема процесса сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете.
2. Получены зависимости, определяющие основные конструктивно-режимные параметры процесса сепарации подсевного решета.

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.

**На защиту выносятся следующие основные положения диссертации:**

- 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.

**Достоверность 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 Microsoft Excel 2013, Statistica V12, Mathcad 15.

**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 за III место «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, выводов по первой, второй, четвертой главе, общих выводов, библиографического списка, включающего 165 наименований, из них 19 на иностранных языках и 3 приложения. Общий объем составляет 193 страницы машинописного текста, который включает 68 рисунков 11 таблиц.

## **Глава 1 Современное состояние вопроса сепарации зернового материала и задачи исследования**

### **1.1 Анализ конструктивных решений центробежно-решетных сепараторов для очистки зерна и их технологические особенности**

Центробежно-решетному сепарированию зерна посвящены работы многих ученых, которые доказали их преимущество в сравнении с плоскорешетным сепарированием: Абидуева 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 А.В., 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., Хижникова А.А., Шилина В.В., Яковлева В.Т., Абдуева Ф.М., Бредихина В.В., Котова Б.И., Малюта С.И., Мандрика О.В., Ольшанського В.П., Півень М.В., Сліпченко М.В., Степаненко С.П., Yasuhiro Ikeda и других авторов.

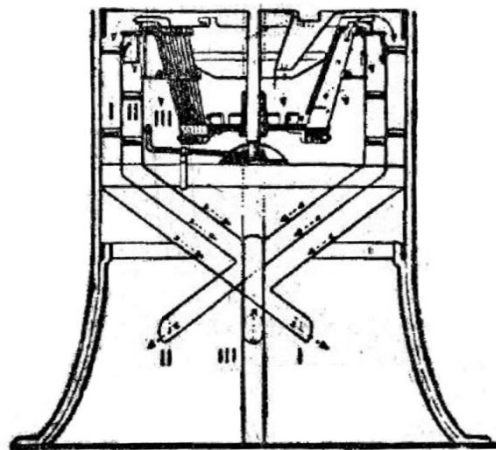
Основное разделение центробежно-решетных сепараторов происходит по расположению оси вращения, то есть они делятся на сепараторы с вертикальной, наклонной и горизонтальной осями вращения. Причем сепараторы с горизонтальной осью вращения называются с определенным допущением, так как принято называть так сепараторы, которые имеют небольшой угол наклона от горизонтальной оси (хотя с формальной точки зрения они не являются горизонтальными). В тоже время сепараторами с наклонной осью вращения принято считать сепараторы, которые имеют небольшое отклонение от вертикальной оси (не более 45 градусов).

Рядом авторов доказано, что применение вертикальной оси вращения решета позволяет уменьшить длину решета в два раза, с сохранением эффективности очистки [54,116], использовать всю площадь решет в

технологическом процессе, уменьшить энергоемкость процесса, т.к. зерно передвигается под собственным весом относительно решета, а также значительно уменьшить габаритные размеры (в проекции на горизонтальную плоскость).

Первые опыты по центрифугированию семенного материала были проведены в Германии Германом Кайзером (Herman Kayser) в 1912 году [10]. Его центрифуга проводила разделение семян по толщине при движении их вдоль конической щели. Автором Ланге А.П. в работе 1933 года описывается данная центрифуга как серийно выпускаемая машина для оборудования небольших элеваторов и амбаров и работающей по принципу отсеивания зерна под действием центробежной силы.

Центрифуга Кайзера представляет собой опрокинутый усеченный конус, стенки которого состоят из тонких стальных прутьев, сближающихся снизу и расходящихся кверху так, что между прутьями получаются щели, увеличивающиеся кверху (см. рисунок 1.1).



I – крупная фракция; II – средняя фракция; III – мелкая фракция

Рисунок 1.1 – Схема работы центрифуги Кайзера (1933 год)

На рисунках 1.2 представлены конструктивно-технологические схемы центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения.

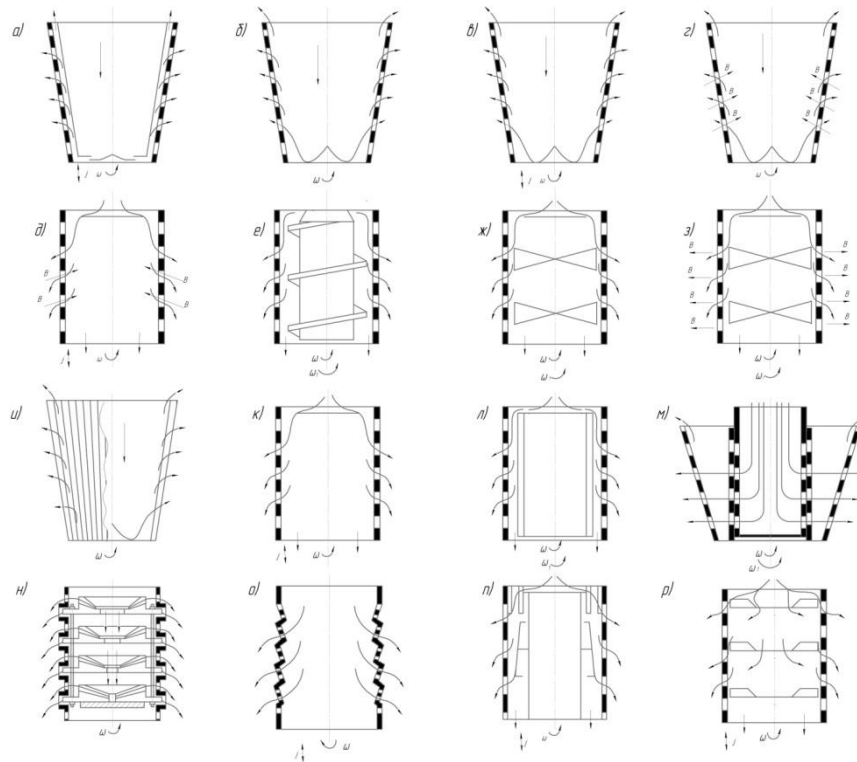


Рисунок 1.2 – Схемы центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения

На современном этапе развития центробежно-решетного сепарирования в направлении исследования конического решета с профилирующей поверхностью (прутковое решето) работали Иванов Н.М., Лузан П.Г., Сундеев А.А. и другие авторы (см. рисунок 1.2и) [39,56].

Основным преимуществом сепараторов с конической рабочей поверхностью является отсутствие «зависания» на решете с увеличением силы трения, которая может быть вызвана увеличением окружной скорости решета, либо увеличением влажности исходного материала, что является очень важным для машин предварительной очистки зерна [38].

Недостатком конической формы решета является увеличение скорости движения зерна от малого основания конуса к большому, что приводит к нестабильному протеканию процесса сепарации. Еще одним негативным фактором применения конической формы решета является сложность очистки сепарирующей поверхности, в связи с разностью

окружных скоростей (происходит неравномерный износ очищающей поверхности).

Для улучшения протекания процесса сепарации на коническом решете с целью выделения длинных примесей Несиков А.А. [67] и Минаев В.Н. [63] применили ограничивающую поверхность (см. рисунок 1.2а и 1.3в). Филатов Н.А. для выделения длинных примесей на конической поверхности применил лабиринтные решета (выполненные в виде двух сообщающихся каналов) (см. рисунок 1.3к) [5]. В сепараторах обоих авторов [63,67] решета помимо вращательного движения совершали также осевые колебания.

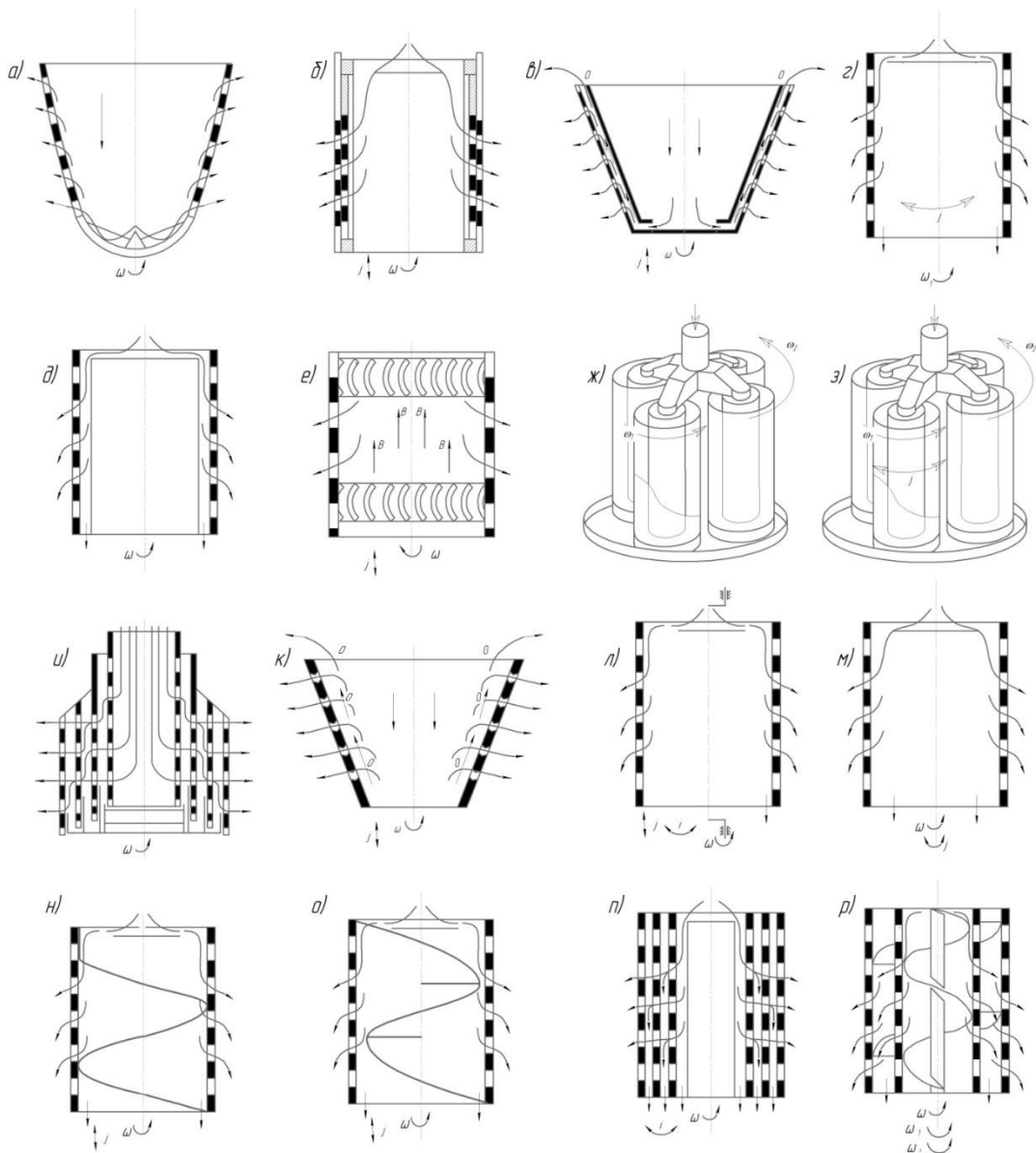


Рисунок 1.3 – Схемы центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения

В работах Кима Р.А. [43] исследованы конические ступенчатые центрифуги без использования вибрации (см. рисунок 1.2б). Использование вибрации на решетке с конической просеивающей поверхностью (см. рисунок 1.2в) позволило Авдееву Н.Е. [2] значительно повысить эффективность выделения проходовой фракции.

Воздушный поток, подающийся снаружи решета, способствует расслоению зернового материала и при наличии вибрации приводит к «псевдооживлению» зернового материала, что в свою очередь приводит к повышению качества разделения зернового материала (см. рисунок 1.2г) [13].

Наиболее выгодной с технологической точки зрения является цилиндрическая форма решета. Данные решета лишены недостатков присущих коническим решетам.

Наиболее близко к центробежным сепараторам с конической просеивающей поверхностью примыкают сепараторы с криволинейной поверхностью решета, а именно параболоид и гиперболоид вращения (см. рисунок 1.3в).

Рассмотрим основные технологические решения, способствующие повышению эффективности сепарации.

Наиболее распространенный способ повышения эффективности очистки это - применение вибрации. Промышленностью выпускаются центробежно-решетные сепараторы с цилиндрическими решетками и использованием вибрации в технологическом процессе: БЦСМ-50 (Украина), МЗП-25/10 (Россия), СЗА-25 (Польша).

Для увеличения прижатия слоя зерна к решетку и улучшения процесса просеивания проходовой фракции через зерновой слой и решето Бочкаревым А.Н. и Ульяновым А.Ф. [9] (см. рисунок 1.2д), а также Полуэктовым Н.И. [77] предложено применение потока воздуха внутри решета. Причем в сепараторе Полуэктова Н.И. отсутствует вибрация, но присутствуют пластинчатые ворошители, расположенные на осевом валу по винтовой линии. Благодаря ворошителям создавалось большее давление на зерновой

материал, при этом число оборотов ворошителей в 1,46 раза больше оборотов цилиндрического решета. Исследования Полуэктова Н.И. позволили установить, что разница в значении средних удельных весов фракций возрастает по мере увеличения центробежных сил. При этом им была определена допустимая скорость рабочих органов применительно для поля инерционных сил [77]:

$$V = \sqrt{\frac{2A}{m}}, \text{ м/с} \quad (1.1)$$

где  $A$  – кинетическая энергия, вызывающая разрушение зерна, Дж;  
 $m$  – масса зерна.

Для повышения эффективности разделения зернового материала авторами [76] были использованы стратифицирующие шипы (см. рисунок 1.2ж). Причем, конический шиповой сепарационный барабан при одинаковом выходе и чистоте зерна в сравнении с цилиндрической допускает повышение удельной нагрузки в 2 раза.

Возможность применения цилиндрических и конических решет, установленных концентрично, показал в своей работе Вихорнов В.Л. (см. рисунок 1.2м). В этом же сепараторе применены решета с регулируемыми отверстиями, которые получаются смещением двух соосных прилегающих друг другу решет в вертикальной плоскости. Такой же принцип регулирования размера отверстий применен в сепараторах Нилова В.П., Коваленко Н.В. и Н.В. Токмакова [5].

Ямпиров С.С. [154] также исследовал работу концентрически установленных цилиндрических решет, причем он исследовал решета с одинаковыми отверстиями. В работе [156] помимо вращательного движения концентрическим решетам придается еще знакопеременное ускорение в окружном направлении.

Возможность послойного разделения зернового материала по высоте цилиндрического решета рассмотрены в работах Тищенко Л.Н. и Прокопенко А.С. [121,122] (см. рисунок 1.2н, 1.2р, 1.2п).



Для увеличения просеивающей поверхности цилиндрического решета, решето в работе [123] выполнено ступенчатым.

Для выделения длинных примесей на цилиндрическом решете Минаев В.Н. [63] предложил использовать неподвижную ограничивающую поверхность внутри решета (см. рисунок 1.3д).

Для снижения вредного воздействия осевых колебаний цилиндрических решет Семенов В.А. и Зуева П.Г. использовали крутильные колебания, что позволило повысить эффективность очистки и увеличить долговечность работы сепаратора (см. рисунок 1.3г) [5,42].

Яковлев В.Т., исследуя работу подсевного решета с винтовым ротором (см. рисунок 1.2е) рассмотрел пять возможных вариантов протекания технологического процесса [152], а именно: движение материала сверху вниз при вращении решета и ротора в одном направлении (при скорости ротора больше скорости решета, скорость решета меньше скорости ротора); движение материала снизу вверх при вращении решета и ротора в одном направлении (при скорости ротора меньше скорости решета, скорость решета меньше скорости ротора); движение материала снизу вверх при вращении решета и ротора в противоположных направлениях (при скорости ротора не равной скорости решета). Наиболее рациональным по данным исследований был выбран вариант при движении материала сверху вниз при вращении решета и ротора в одном направлении и при скорости ротора больше скорости решета.

Центробежно-решетный сепаратор Verticleaner VCC-600, выпускаемый фирмой «Cimbria» (Дания), включает в себя винтовой ротор, который имеет окружную скорость в два раза большую окружной скорости решета, направление движения зернового материала сверху вниз (см. рисунок (1.2е) [159].

Использование планетарного движения цилиндрических решет в сепараторе «Sigma» фирмы «Damas» (Дания) позволяет добиться сдвигового эффекта зернового материала в окружном направлении, что способствует

просеиванию проходовой фракции (см. рисунок 1.3ж). В работах Холодилина А.Н., Вертякова Ф.Н. и В.Н. Михалева [5,36,42] (см. рисунок 1.3з) помимо планетарного движения решет в приводе используются крутильные колебания.

Для стабилизации режима движения зерна на решетке используются спирали (см. рисунки 1.3н и 1.3о).

На рисунке 1.2л представлена схема сепаратора, разработанного Тарасовым Б.Т. [112]. Особенностью данного сепаратора является то, что решето и внутренний пластинчатый барабан вращаются в одну сторону, но с разными скоростями, причем пластинчатый барабан вращается в два раза медленнее, чем решето. Далее в работах Стрикунова Н.И., Леканова С.В., Хижникова А.А., Щербакова С.С. была продолжена работа над данным принципом сепарирования [54,100,131,150].

## **1.2 Достоинства и недостатки центробежных решет**

Преимущество центробежно-решетных сепараторов состоит в том, что создается постоянный контакт частиц с сепарирующей поверхностью. Это повышает вероятность попадания частиц в отверстия, а большая скорость движения сепарируемого материала обеспечивает высокую производительность центробежных сепараторов [10]. В вертикальном цилиндрическом решете вес частиц полностью используется для сообщения им необходимой относительной скорости, а поле центробежных сил сохраняется неизменным по всей сепарирующей поверхности. Например, в виброцентробежных сепараторах траектории относительного движения частиц представляют собой прямые, параллельные оси вращения решета.

В цилиндрическом наклонном решете не полностью используется возможная удельная производительность его поверхности.

Анализ существующих технических решений показал, что общим недостатком цилиндрических решет является критическая скорость

движения частиц по сепарирующей поверхности, при которой происходит заклинивание материала.

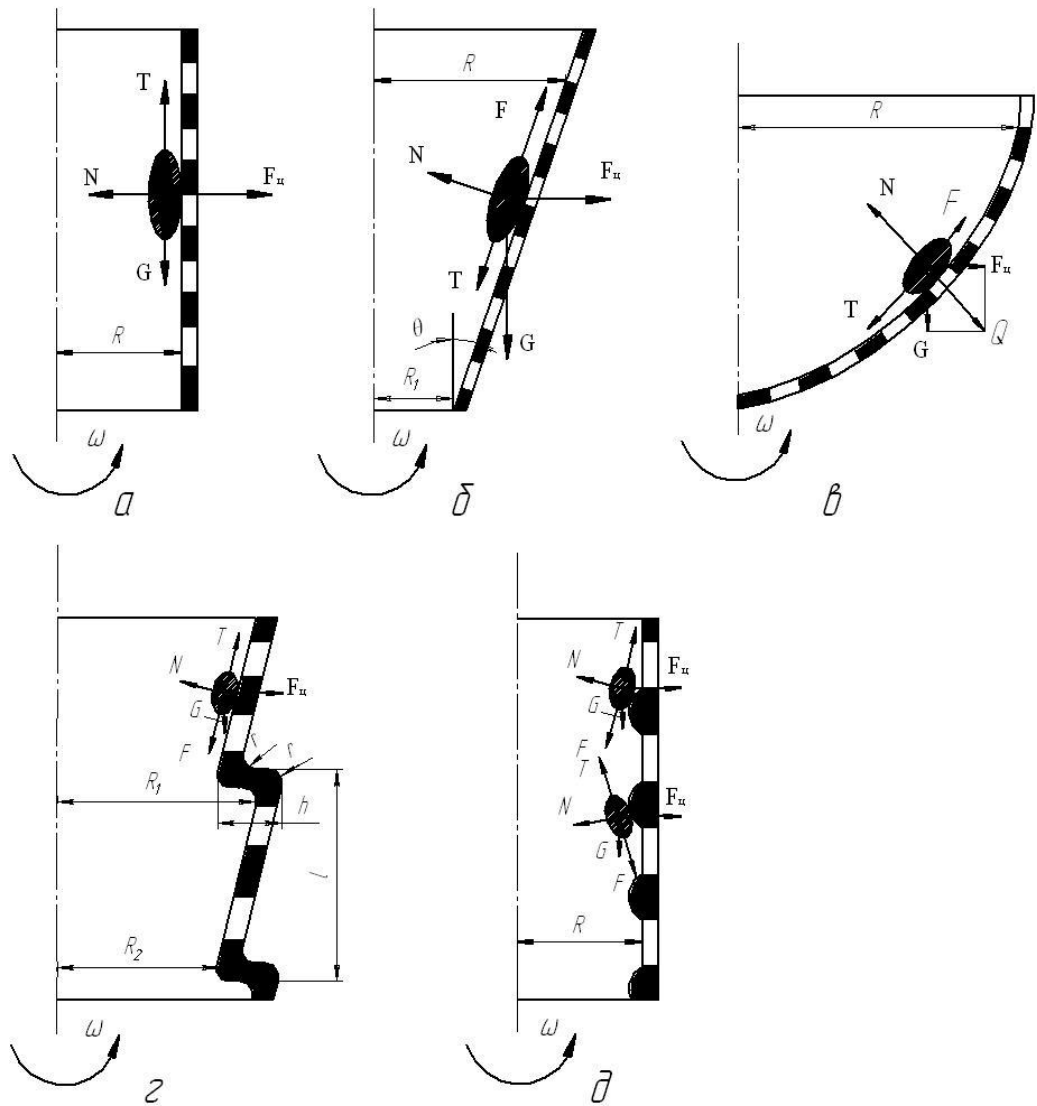
Коническое решето при соответствующем выборе угла конусности и равных с цилиндрическим решетом ускорениях вибраций дает возможность применить более высокие скорости вращения. С увеличением угла конусности возрастает неравномерность поля инерционных сил по длине образующей решета, в результате чего на участках с его меньшим диаметром эффективность сепарации ниже.

Общий недостаток конических сепараторов – движение сепарируемого материала по рабочей поверхности от вершины конуса к основанию с ускорением, за счет чего время прохождения частицы над отверстием резко уменьшается и частица меньшего диаметра, по сравнению с отверстием, может не успеть пройти через него.

Для параболоидного решета характерно несоответствие между направлением движения зернового слоя и условием наилучшего использования сепарирующей поверхности. Вследствие этого снижается удельная производительность решета [5].

В параболоидном решете, как и в коническом, частицы движутся не только вдоль образующей поверхности решета, но имеют отклонение за счет действия кориолисовой силы инерции.

В связи с этим сепарирующая поверхность должна выполняться как единое целое, что затрудняет динамическое уравнивание ротора. К тому же решето параболоидной формы, по сравнению с другими, значительно сложнее в изготовлении. На рисунке 1.4 представлены силы, действующие на зерно при движении его по центробежным решётам различной формы.



а – цилиндрическое решето, б – коническое решето, в – параболическое решето, г – зигзагообразное решето, д – цилиндрическое решето с рифами,  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  – радиусы решета;  $N$  – нормальная реакция решета;  $G$  – сила веса частицы;  $F_{ц}$  – центробежная сила инерции;  $T$  – сила трения зерновки о решето;  $F$  – движущая сила;  $Q$  – результирующая сила;  $r$  – радиус закругления;  $\omega$  – угловая скорость;  $\theta$  – угол наклона решета

Рисунок 1.4 – Силы, действующие на зерно при движении его по центробежным решетам различной формы

Проведенные теоретические исследования Е.С. Гончаровым показали, что перемещение частиц зернового слоя по сепарирующей поверхности цилиндрического решета с вертикальной осью вращения является наиболее эффективным [21].

### 1.3 Характеристика решет и отверстий решет зерноочистительных машин и их классификация

Современный уровень развития производства техники для послеуборочной обработки зерна значительно уступает уровню развития исследований в данной области. В связи с этим необходимо рассмотреть состояние исследований в области очистки зерна, классифицировать основные параметры машин и дать рекомендации для их дальнейшего совершенствования.

Основная классификация типов решет по назначению представлена на рисунке 1.5. Делительные решета предназначены для разделения зернового материала на две части (к примеру, для разделения материала на два решетных стана или работающие как обогатители). Фракционные решета предназначены для разделения исходного материала на две фракции, отличающиеся, как правило, по размерам. Проходовые решета имеют наиболее крупные отверстия в размерном ряду решет, пропускающими через себя основную часть зерна. Они предназначены для выделения из зернового вороха крупных и солоmistых примесей. Сходовые решета могут использоваться как сортировальные, или как подсевные для очистки зерна от мелких примесей.

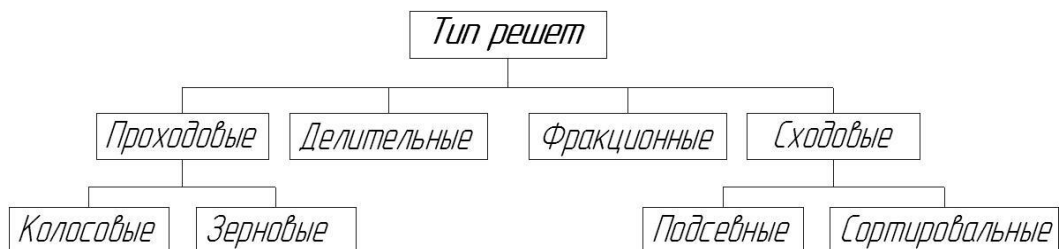


Рисунок 1.5 – Классификация решет по назначению

Наиболее важным в процессе сепарации является просеивание зерна через отверстия. На рисунке 1.6 приведена классификация отверстий решет зерноочистительных машин. По геометрии отверстия можно разделить:

круглые – для разделения зернового материала по ширине; прямоугольные – для разделения по толщине; овальные – для увеличения эффективности сепарации по ширине, в сравнении с круглыми. Щелевые решета (струнные) используются в плоскорешетных [39], цилиндрических и конических сепараторах [5]. В данном случае, щель получается увеличивающейся к большему основанию конуса. Треугольные, круглые лункообразные, квадратные используются для сепарации отдельных культур с специфическим строением семени – гречихи, кукурузы, сои и т.д.

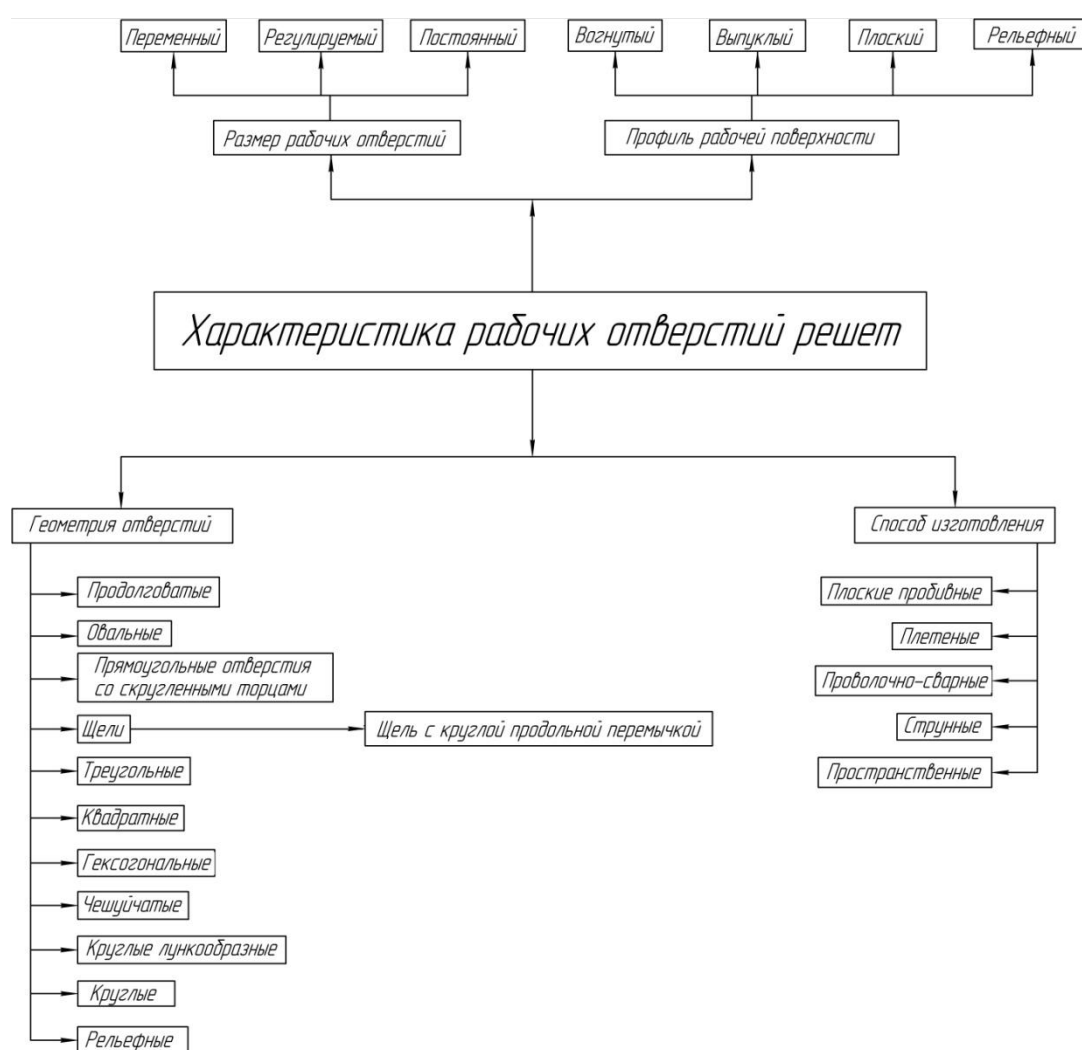


Рисунок 1.6 – Классификация отверстий решет зерноочистительных машин

Чешуйчатые и рельефные решета используются в машинах для обработки семян кукурузы [1].

Решета с гексагональными отверстиями, плоской и рельефной формы - это новый вид сепарирующей поверхности, пришедшей на смену решет с круглыми отверстиями. Преимущества заключаются в следующем: увеличенная просеивающая способность, благодаря дополнительным граням; большее живое сечение из-за уменьшения толщины перемычек; снижение забиваемости, так как площадь отдельно взятого отверстия больше по сравнению с круглым отверстием.

В плоскости решета отверстия круглой и гексагональной формы могут располагаться в виде треугольника, шестигранника и по квадрату.

По профилю поверхности они подразделяются на плоские (обычные пробивные решета), выпуклые и вогнутые, а также рельефной формы для интенсификации процесса очистки семян [5].

По размерам – отверстия постоянного размера, регулируемого (цилиндрическое спиральное решето Пинея с изменяющимся расстоянием между навивками) [55, 75] и переменными размерами отверстий [12], где изменение размера отверстий обеспечивается смещением подвижного решета относительно неподвижного, установленного вплотную к первому.

Все решета характеризуются общим показателем – коэффициентом живого сечения, который находится как отношение площади отверстий ко всей площади решета, на котором они располагаются. Широкое распространение получили плоские пробивные решета, главным недостатком которых является малое живое сечение из-за наличия широких перемычек.

Плетеные решета (тканевые сита) используются в основном в крупной и мукомольной промышленности, где требуются мелкие отверстия и не нужна их очистка.

Проволочные сварные решета имеют площадь живого сечения на 50 – 55% больше, чем пробивные решета с продолговатыми отверстиями [37,38,40]. Они широко применяются в конструкциях скельператоров, так как просты в изготовлении и имеют продолжительный срок службы.

Отличие струнных решет от проволочно-сварных в отсутствии перемычек и способность струн образовывать длинную щель любой ширины с возможностью её постепенного увеличения [39, 40,123].

Пространственные решета образуют длинные щели между ребрами различной формы. Профиль ребер может быть: треугольный [34], прямоугольный, овальный. Решета могут образовываться пластинами имеющих в верхней части круглые выступы [125] и т. д. Такой тип решет хорошо расслаивает материал и направляет его вдоль щели, где происходит просеивание частиц.

#### 1.4 Процесс разделения зерна на различных решетках

Работу решет принято оценивать коэффициентом полноты разделения или коэффициентом извлечения проходовой фракции  $\eta$ . Под коэффициентом извлечения  $\eta$  понимается отношение количества выделенных решетом частиц (по весу) проходовой фракции  $g_1$  ко всему количеству частиц  $g_0$  проходовой фракции, содержащейся в данном зерновом материале, поступившем на разделяющую поверхность, выраженном в процентах, т. е [5].

$$\eta = \frac{g_1}{g_0} \times 100\% \quad (1.1)$$

В результате многолетней практики эксплуатации плоскорешетных зерноочистительных машин установлено, что интенсивность выделения проходовой фракции через отверстия решета зависит от большого количества факторов, к числу которых относятся: [5]

- вид движения решета (прямолинейно-возвратное, круговое поступательное, вращательное);
- конструкция решета в целом; его кинематические параметры (амплитуда, число колебаний, угол наклона к горизонту);
- устройства для очистки решет от застрявших в нем частиц;
- длина решета;



- состав исходного зернового материала и его количество, поступающее в единицу времени, т. е. нагрузка на решето.

Несмотря на различие зернового материала по его составу в отношении крупности, кривые, выражающие зависимость  $\eta=f(q)$ , по своему характеру подобны и приближенно могут быть выражены показательной функцией вида:

$$\eta = ae^{-bq} \quad (1.2)$$

где  $q$  – удельная нагрузка в килограммах на 1 м ширины решета в час;

$a, b$  – опытные коэффициенты.

Влияние крупности зерна пшеницы на коэффициент извлечения в первом приближении может быть учтено постоянным множителем –  $K$ , т. е. с учетом крупности зерна: [5]

$$\eta = Kae^{-bq} \quad (1.3)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий крупность зерна, исходя из соотношения фракций, его составляющих.

Для управления процессом сортирования и очистки зерна и его оптимизации нужно располагать прямой зависимостью показателей качества процесса от установочных параметров, кинематических режимов и нагрузки на решето.

Обычно рассматривается случай равномерного распределения мелкой фракции семян в начальный момент поступления на решето, когда концентрация таких зерен в слое постоянна. Это реализуется как в лабораторной практике, так и в производственных условиях. В.И. Дашевский [75] получил следующее уравнение для извлечения зерна:

$$\eta = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(m+1)^2} e^{-\frac{(2m+1)^2 \pi^2 bt}{8h^2}} \quad (1.4)$$

где  $h$  – толщина слоя зерна;

$b$  – коэффициент сепарации;

$m$  – целое число;

$t$  – время просеивания.

Непомнящим Е.А. [65] выявлен универсальный параметр сепарирования  $H = \frac{h}{\sqrt{2bt}}$ , который в данном случае является единственным параметром, определяющим качество процесса сепарирования. С помощью этого параметра выражение (1.4) приобретает вид:

$$\eta = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{16H^2}} \quad (1.5)$$

Были проведены сравнения теоретических закономерностей с опытными данными, полученными при сортировании кукурузы и гороха [1].

Опыты производились на лабораторной установке с возвратно-поступательным движением решета в горизонтальной плоскости. Полученные данные практически полностью согласовываются с теоретическими зависимостями.

Полноту просеивания  $\varepsilon$  однородных частиц  $i$  – го компонента зернового материала по длине решета при подаче материала слоем небольшой толщины Ямпиров С.С.[153] определил выражением:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\mu_i x} \quad (1.6)$$

где  $\mu$  – интенсивность просеивания  $i$  - го компонента.

$$\mu_i = \frac{1}{x} \ln(1 - \varepsilon_i); \quad (1.7)$$

где  $x$  – длина решета.

Зависимость эффективности выделения примесей от подачи, полученная по результатам экспериментов, представлена на рисунке 1.7.

При этом эффективность выделения коротких и мелких примесей с увеличением подачи зернового материала падает. Так при увеличении подачи зернового материала с  $15 \text{ т/ч} \times \text{м}^2$  до  $20 \text{ т/ч} \times \text{м}^2$ , эффективность выделения мелкой примеси уменьшается на 25%, а короткой примеси на 20%.

Следующий параметр, который можно использовать при теоретических расчетах процесса сепарирования, это вероятность просеивания.

Опишем вероятность просеивания частиц различной длины в отверстия решета прямоугольной формы.

Когда частица движется или в момент остановок расположена под углом к длинной стороне прямоугольного отверстия решета вероятность просеивания частицы можно определить по формуле:

$$P = \frac{ab - l^2 / 4 \sin \alpha \cos \alpha}{ab} \quad (1.8)$$

где  $\alpha$  – угол наклона частицы к длинной стороне отверстия решета;

$a$  – длина отверстия решета;

$l$  – длина проходовой частицы;

$b$  – ширина отверстия решета.

По выражению можно определить вероятность прохождения частицы через прямоугольное отверстие решета.

Таким образом, анализ результатов исследований показал, что вероятность просеивания частиц различной длины в одни и те же отверстия неодинакова, при этом различие вероятностей просеивания частиц различной длины в отверстия круглой формы наибольшая.

Большое количество работ уделено исследованию расположения отверстий относительно движения зернового материала.

А.В. Зильбернагель [37] исследовал влияние угла наклона продолговатых отверстий относительно направления движения зернового материала на плоских решетах. Согласно его теоретическим исследованиям вероятность просеиваемости записывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{h_0}{h_0 + h_{II}} + \frac{ltg \alpha}{2(h_0 + h_{II})} \\ n_{пу} \rightarrow 0 \pm \leq \alpha \leq \arctg \frac{h_{II}}{l} \\ 1 - \frac{h_{II}^2 ctg \alpha}{2l(h_0 + h_{II})} \\ n_{пу} \rightarrow \arctg \frac{h_{II}}{l} < \alpha < \frac{\pi}{2} \end{array} \right. \quad (1.9)$$

где  $l$  – длина отверстия;

$\alpha$  – угол наклона отверстия;

$h_0$  – ширина отверстия;

$h_n$  – ширина перемычки.

Данные, которые получил Зильбернагель А.В., согласуются с теоретической работой проведенной Климком А.И. [44] из которой следует, что в среднем около 80% частиц требуют продольной ориентации относительно отверстий решета. При этом разворот частиц должен производиться до угла  $20^\circ$  по отношению к продольной оси отверстий.

Гончаров Е.С. [19] для виброцентробежного сепаратора с вертикальной осью вращения вывел формулу вероятности просеивания частицы сквозь отверстие решета, отличающуюся от известных тем, что в ней функционально объединены в явной форме все существенные параметры решета и сепарируемого материала:

$$P_0 = \mu_p P_k \left( \frac{d_0 - a_{nc}}{d_0} \right) \quad (1.10)$$

где  $\mu_p$  – параметр решета, характеризующий его "живое" сечение;

$d_0$  – диаметр отверстия решета;

$a_{nc}$  – средняя ширина проходовой частицы;

$P_k$  – кинематическая вероятность просеивания частиц.

$$P_k = \frac{\Delta a_g + \Delta a_n + \Delta a}{2\pi} \quad (1.11)$$

где  $\Delta a_g$ ,  $\Delta a_n$ ,  $\Delta a$  – интервалы фазового угла колебательного движения решета, соответствующие продолжительности относительного движения частицы вверх, вниз и отрезку времени, когда относительная скорость частицы превышает предельную величину. Эти интервалы фазового угла определяются с помощью разработанной номограммы.

Просеиваемость для конического центробежного решета, работающего на выделении длинных примесей, имеет другое выражение. Технологический процесс работы сепаратора осуществляется в условиях неполной загрузки и просеиваемость  $P$  его может быть определена выражением [21]:

$$P = Q_0 \left( 1 - e^{-\frac{L_k q_{\max}}{V \gamma'}} \right) \quad (1.12)$$

где  $P$  – просеваемость;

$Q_0$  – начальная подача зернового материала, кг/с;

$L_k$  – длина образующей конусного решета, м;

$q_{\max}$  – максимальная удельная просеваемость, кг/(м<sup>2</sup>×с);

$\gamma'$  – масса семян, заполняющих площадь в 1 м<sup>2</sup> сплошным слоем по 1 зерну, кг/м<sup>2</sup>.

Используя определение полноты выделения короткой фракции  $\varepsilon$  при отсутствии длинной примеси, ее выражение имеет вид:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{L_k q_{\max}}{V \gamma'}} \quad (1.13)$$

Таким образом, в результате теоретических исследований установлено, что эффективность работы сепаратора зависит от большого количества факторов: кинематических, конструктивных, физических (состав зернового материала) и т. д.

Торопов В.Р., исследуя очистку зерна пшеницы, пришел к выводу, что в результате действия центробежных сил и высоких скоростей цилиндрического решета процесс просеивания при планетарном движении значительно интенсифицируется.

Теоретическая просеваемость в первом приближении характеризует максимально возможную просеваемость решета и может быть определена по формуле:

$$P_m = \frac{0,6 \mu n_2}{v \left( \frac{l_m}{\Delta m} + \frac{l_k}{\Delta k} \frac{1 - a_0}{a_0} \right)} \quad (1.14)$$

где  $\mu$  – относительное живое сечение решета;

$n_2$  – частота вращения цилиндрического решета;

$v$  – ширина отверстий, мм;

$l_m, l_k$  – средняя длина мелких и крупных зерен, мм;

$\Delta_m, \Delta_k$  – масса 1000 мелких и крупных зерен, г;

$a_0$  – относительное содержание мелких зерен в зерновом материале.

Результаты испытаний показывают, что одна и та же полнота разделения  $\varepsilon = 80\%$  при планетарном движении, в пробивном цилиндре обеспечивается при нагрузке в 3,6 раза большей, чем при обычном вращении [126].

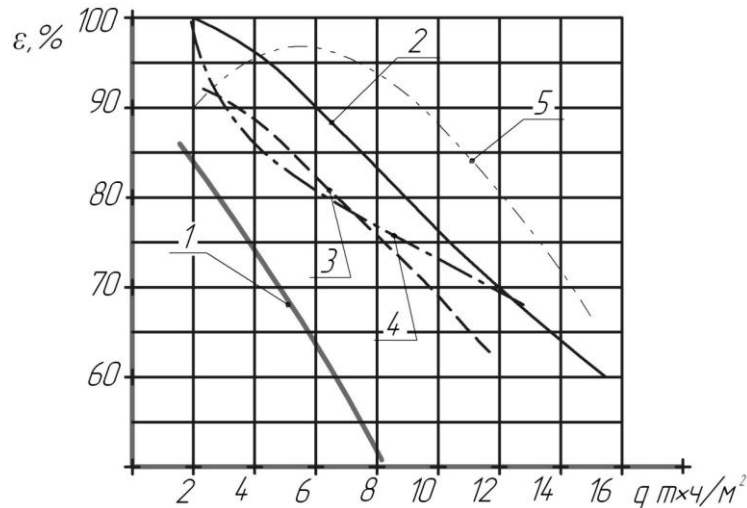


Рисунок 1.7 – Зависимость полноты выделения мелкой фракции от удельной загрузки решета

1 – Зависимость эффективности выделения примесей от нагрузки на плоском решете 2×25 [21];

2 – Эффективность выделения на виброцентробежном сепараторе Гончарова Е.С. с цилиндрическим решетом (диаметр решета 240 мм длина решета 500 мм, размер отверстий 2,3×20 мм, коэффициент центробежности 4,35; амплитуда колебаний  $A = 6$  мм, частота 800 в минуту) [19];

3 – Зависимость, полученная на планетарном сепараторе Торопова В.Р. с цилиндрическим решетом (диаметр 200 мм, 2,4×25 мм, обороты водила 200, обороты решета 70 об/мин,  $\omega_p/\omega_b = 2,4$ ,  $R_p/R_{ц} = 2$ ) [126];

4 – Зависимость, полученная Васильковским М.И. на центробежном сепараторе с горизонтальным цилиндрическим решетом (диаметр 345 мм, длина решета 100 мм, размер отверстий 2×25 мм) [13];

5 – Зависимость полноты выделения примесей от нагрузки на решето в многоярусном сепараторе конструкции Ямпилова С.С. (плоскорешетный сепаратор с 10-ю ярусами решет, количество колебаний решет – 360 кол/мин, угол наклона решет к горизонту и угол направлений колебаний – 6°, амплитуда колебаний – 7,5 мм, диаметр отверстий второй секции решет  $d = 5,5\text{мм}$ ) [153].

На рисунке 1.7 видно, что при увеличении загрузки решет эффективность выделения мелких примесей падает. Однако в центробежных сепараторах, в отличие от плоскорешетных, качество очистки с ростом объема поступающего зерна снижается постепенно.

### **1.5 Пути интенсификации процесса сепарации зерна на центробежных решётах**

На эффективность решётного сепарирования в целом влияют многочисленные факторы, характеризующие свойства и концентрацию компонентов зернового материала, его поступления в единицу времени: размеры отверстий, материал и конструкция решета, способ очистки отверстий решета, кинематический режим рабочего органа. Действие некоторых из этих факторов можно оценить только совокупно, поскольку изменение одного из них может оказать на результаты сепарирования не только прямое влияние, но и косвенное – через изменение других факторов.

Вероятностный характер свойств частиц каждого компонента зернового материала и многократность взаимодействия их между собой и с поверхностью решета свидетельствуют о влиянии на процесс сепарирования случайных факторов, накладывающих на него черты стохастичности.

Для того, чтобы существенно интенсифицировать технологические процессы сепарации, повысить в несколько раз удельную производительность сепарирующих органов и улучшить качество их работы, необходимо идти по пути изыскания и исследования новых рабочих органов [51].

Интенсификация процессов сепарации означает повышение их продуктивного функционирования в единицу времени. Следовательно, количественным показателем интенсификации будет удельная производительность:

$$q = \frac{W}{R} \quad (1.15)$$

где  $W$  – производительность рабочего органа;

$R$  – показатель рабочего органа (площадь, масса и т.д.).

Для повышения нормального давления, увеличения относительной скорости движения зерна по рабочей поверхности целесообразно использовать поле инерционных сил.

В основном, для разделения зерна по различным признакам нашли применение конические цилиндрические и лопастные центробежные сепараторы. Так в цилиндрических сепараторах с вертикальной осью вращения разделяемый материал поступает на распределительный диск, установленный в верхней части цилиндрического решета. Под действием центробежных и кориолисовых сил инерции зерновой материал подаётся на сепарирующую поверхность и движется по ней сверху вниз под действием силы тяжести.

Выделение проходовой фракции через отверстия решета происходит под действием центробежных сил, а движение по сепарирующей поверхности под действием гравитационных сил.

Исследования Гончарова Е.С. [19] показали высокую эффективность наложения высокочастотных колебаний. Удельная производительность повысилась в 3 – 5 раз. На очистке семенного зерна ( $\varepsilon = 90 - 95\%$ ) нагрузка на решето составляла 45 – 60 кг/ч×дм<sup>2</sup>. Длина сортировальных и подсеменных



решёт сокращается в 2 – 3 раза по сравнению с такими же плоскими решётами за счёт интенсификации процесса.

Тарасовым Б.Т. разработан новый технологический процесс сепарации зерна по размерам, основанный на принципе самоориентации зерновых частиц в активном слое, примыкающем к поверхности решета.

При самоориентации зёрен в кольцевом активном слое создаётся возможность обеспечить полную загрузку всей решётной поверхности обрабатываемым материалом и использовать для сепарации центробежные силы.

Полная загрузка всей решётной поверхности цилиндра зерновым материалом при выделении длинных примесей обеспечивает производительность в 2,5 – 3,0 раза выше, чем у плоских решёт.

Лабораторно – производственные опыты показали, что полнота выделения овсюга решётным овсюгоотборником составила 78, 74 – 84, 18% при удельной производительности 18, 33 – 21, 45 т/м<sup>2</sup>×ч. Потери зерна в отходы составили 0,19 – 0,27%.

Дальнейшие исследования центробежно-решётного сепарирования, основанного на вышеуказанном принципе, были проведены Стрикуновым Н.И. [99,100]. В ходе исследований было обосновано применение предварительной подготовки зернового материала для интенсификации процесса сепарирования. Экспериментальные данные показали, что эффективность сепарирования повысилась на 9 – 11%, а производительность на 15 – 18% при использовании обоснованной схемы подготовки зернового материала.

Другие варианты устройств, для предварительной подготовки зернового материала для интенсификации процесса сепарирования будут рассмотрены выше.

Во всех центробежных сепараторах применяются пробивные решёта с присущими им недостатками: плоская форма продольных перемычек, наличие поперечных перемычек, низкий коэффициент «живого» сечения.

Сравнительные испытания, проведенные Гороповым В.Р. [126], пробивного и щелевых цилиндров показали, что при планетарном движении одна и та же полнота разделения  $\varepsilon = 0,8$  в щелевом цилиндре с треугольными перемычками обеспечивается при нагрузке в 1,7 раза большей, чем пробивном решётном цилиндре на тех же режимах и в 6 – 7 раз большей, чем при простом вращении пробивного цилиндра.

Вопросам использования конических сепарирующих, обладающих повышенной ориентирующей способностью в поле инерционно-гравитационных сил для интенсификации процесса сепарации посвящены работы Иванова Н.М. [38,39], Лузана П.Г. [56] и других исследователей [124,127].

Ивановым Н.М. обоснованы параметры и режимы работы конического струнного решета [39], при этом получены следующие результаты: радиус нижнего основания решета 0,305 – 0,365 м; угол профилирования сепарирующей поверхности 30 – 38°; угол раствора решета 36°; частота вращения решета 9,8-11,7 с<sup>-1</sup>; величина зоны выделения мелких примесей 0,124 – 0,170 м. Очистка от мелких примесей в режиме предварительной очистки происходила с эффективностью 63,5% с величиной потерь 0,17% при нагрузке 19,8 т/ч×м<sup>2</sup>. Профилирование струнного решета заключалось в расстановке струн в шахматном порядке, таким образом, исключалось движение частиц в трансверсальном направлении.

Лузаном П.Г. [56] установлено, что увеличение разницы ширины щели в конце струнного конического решета на 1,5 мм существенно не влияет на качественные показатели работы сепаратора. Максимальное значение эффективности сепарации на подсевном решете достигается при показателе кинематического режима решета  $K = 4 - 6$  (радиус решета  $R = 0.2 - 0.4$  м).

Из проведённого анализа процесса сепарации можно выделить три, основные направления его интенсификации:

1. Применение поля инерционно-гравитационных сил.
2. Увеличение площади «живого» сечения.

3. Использование различных устройств, для предварительной подготовки зернового материала.

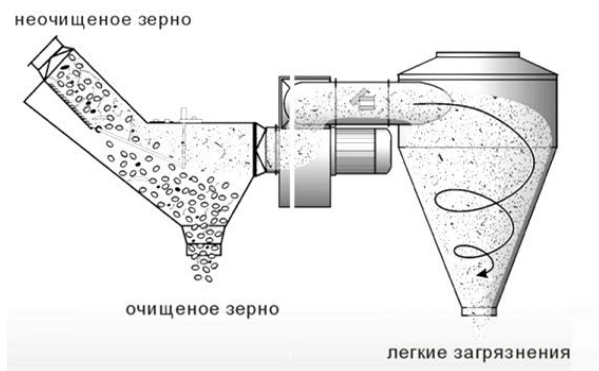
### **1.5.1 Предварительная подготовка зернового материала в центробежно-решетных сепараторах с вертикальной осью вращения**

Предварительная очистка свежееубранного зернового вороха, имеющего большое содержание сорных примесей и, как правило, повышенную влажность, является наиболее значимой технологической операцией при послеуборочной обработке зерна.

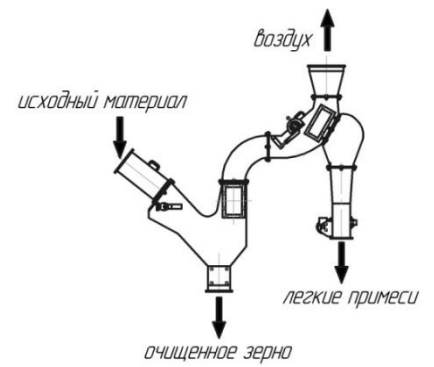
Многочисленные исследования показывают, что предварительная подготовка зернового вороха до поступления на основные органы машин повышает эффективность последующего сепарирования.

Установка дополнительного aspirатора типа «КОМ» фирмы «Pat» (Польша) (см. рисунок 1.8а) позволяет повысить эффективность очистки в целом на 8-10%. Разрабатывался aspirатор для совместной работы с сепараторами CZA-50 фирмы «Araј» (польский аналог сепаратора БЦС-50). Однако в настоящее время находит применение и для других зерноочистительных машин, в том числе и плоскорешетных. Выпускается aspirатор с производительностью 25, 40, 60 т/ч. Датская фирма «Cimbria» разработала высокоэффективный aspirатор CR 163 (см. рисунок 1.8б) для совместной работы с центробежно-решетными сепараторами серии «Verticlean» с производительностью 40, 60 и 100 т/ч. Итальянская фирма «Zanin» выпускает aspirаторы серии PA двух типов I и T (см. рисунок 1.8в и 1.8г), соответственно производительностью 30, 50, 80, 100, 120 и 25, 40, 60, 80, 120.

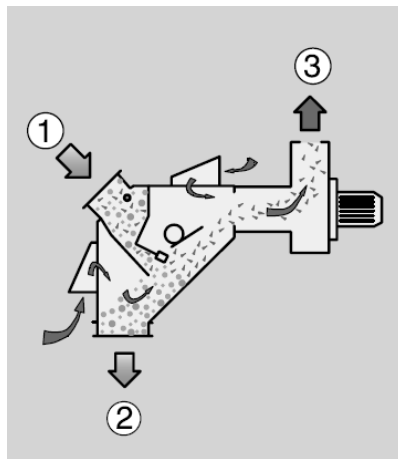
Aspirаторы типа «КОМ» применяются также в современных зерносушилках, в частности финского производства фирм «Meru» и «Antti-Teollisuus», как в мобильном, так и в стационарном исполнении [62].



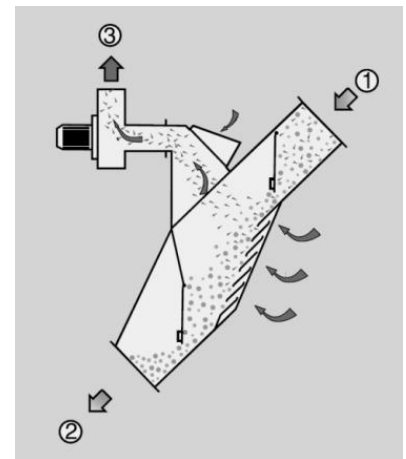
а



б



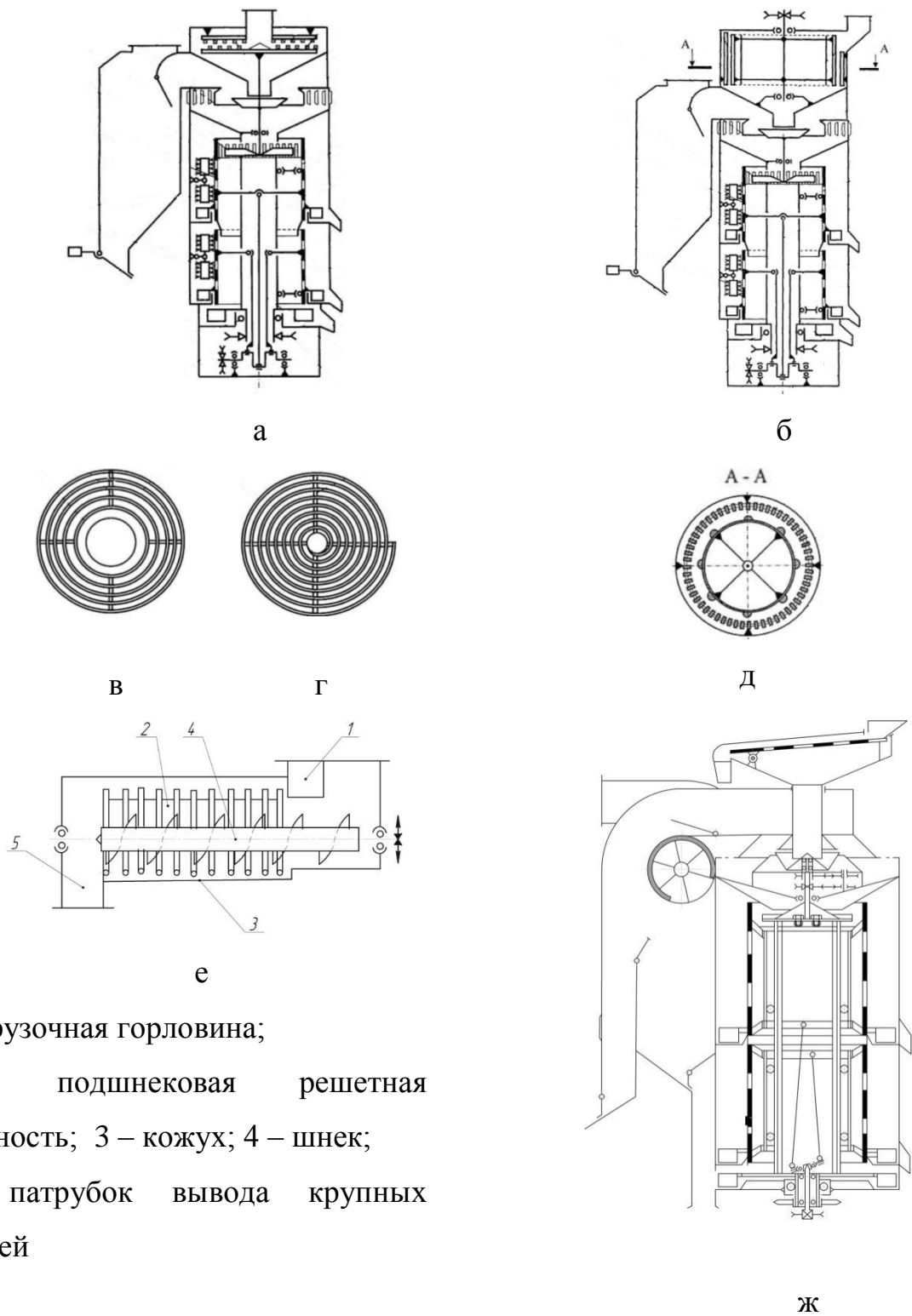
в



г

Рисунок 1.8 – Аспираторы предварительной подготовки материала

Установка домолачивающего устройства (см. рисунки 1.9а – 1.9д) позволяет значительно уменьшить потери зерна, а также машина может эффективно работать на очистке вороха, полученного с использованием технологий сбора "Невейка" или очесывания растений на корню, так как такой ворох содержит значительное количество невымолоченных колосьев и их частей [46].



- 1 – загрузочная горловина;  
 2 – подшнековая решетчатая поверхность; 3 – кожух; 4 – шнек;  
 5 – патрубок вывода крупных примесей

Рисунок 1.9 – Устройства для дополнительного обмолота и выделения крупных примесей

Зерновой ворох, поступающий с поля или с открытых площадок, после дополнительной просушки, содержит большое количество грубых примесей (камни, ветки и т.д.), которые могут повредить центробежно-

решетный сепаратор. Поэтому целесообразно установить плоское решето (см. рисунок 1.9ж) над сепаратором для задержания данных примесей [37]. С этой же целью устанавливается нормализатор вороха (см. рисунок 1.9е), выполненный в виде шнека с подшнековой решетной поверхностью, заключенного в кожух, нижняя часть которого выполнена жалюзийной, для регулирования размера отверстий.

Известно, что в момент подачи зернового материала на внутреннюю поверхность вертикального виброцентробежного решета имеет место неустойчивость траекторий движения частиц, т.е. не сразу частицы начинают двигаться сверху вниз по образующим цилиндрического решета.

Используя идею транспортирующей спирали, разработанную Тарасовым Б.Т. [112] для центробежного сепаратора, в Харьковском институте механизации и электрификации сельского хозяйства Мазоренко Д.И. и Тищенко Л.Н. усовершенствовали виброцентробежный сепаратор с вертикальной осью вращения [121]. В данном сепараторе спираль была закреплена на ободах решета, а решето снабжено приводом для сообщения продольных колебаний. Спираль со стороны загрузки имела прямолинейный участок (см. рисунок 1.10в), параллельный образующей решета, что исключало возможность вмешательства витка в процесс сепарации в зонах загрузки и интенсивного просеивания зернового материала. Это значительно снижало процент проходовых частиц в сходовой фракции. Кроме повышения эффективности работы решета данное решение снизило трудоемкость при замене решет.

Профессор Дринча В.М., также использовав идею [31] установил спираль с постоянным зазором относительно решета, угол наклона выполнен монотонно увеличивающимся от загрузочного конца к разгрузочному. Толщина спирали была больше размера отверстий решета (см. рисунок 1.10а). Стабилизации движения в верхней части решета также служит внутренний эластичный шнек, касающийся решета (см. рисунок 1.10е) [97].

С целью торможения зернового слоя в виброцентробежном сепараторе в верхней части решета авторы [97] предлагают использовать фрикционную поверхность, причем дальнейшее движение частиц будет происходить между пластинами, установленными радиально вдоль образующей на внутренней стороне решета. Устройство решета из отдельных секций, установленных с зазором, позволяло выделять короткую фракцию (см. рисунок 1.10г). Другой вариант стабилизации скорости зернового материала заключается в установке в верхней части подсевного решета радиальных лопаток, при этом в верхней части решета установлена коническая обечайка с целью уменьшения давления в нижележащих слоях (см. рисунок 1.10б) [96].

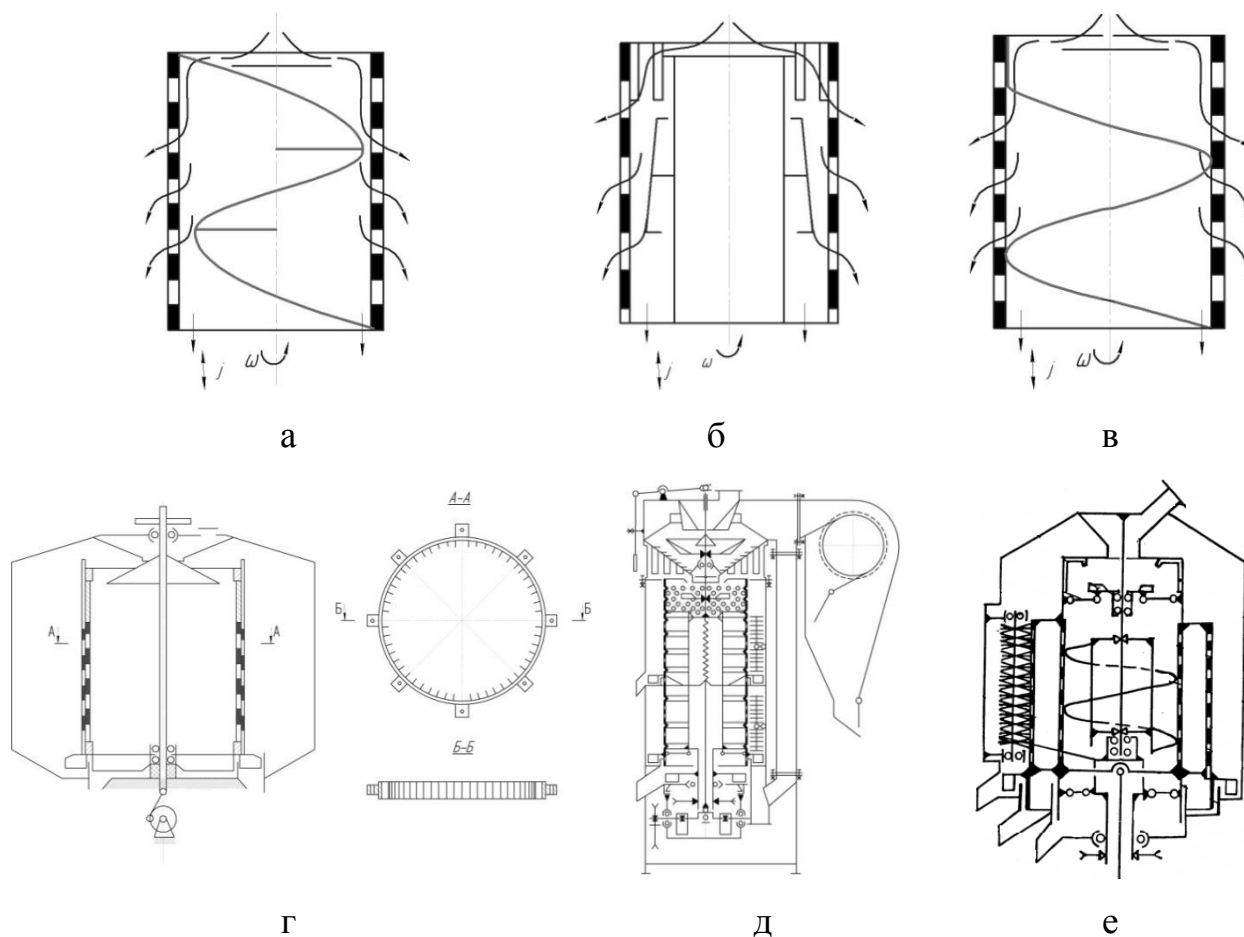


Рисунок 1.10 – Устройства для стабилизации зернового материала в верхней части цилиндрического решета

Следующим вариантом подготовки материала является использование неперфорированного верхнего участка цилиндрических решет, который

имеет конусообразные выступы, направленные вершинами к оси вращения решет и размещены в шахматном порядке, при этом конусообразные выступы имеют высоту не менее 0,015 м, угол при вершине конуса около одного радиана, а расстояние между вершинами соседних выступов составляет не менее двух высот конусообразного выступа (см. рисунок 1.10д) [111].

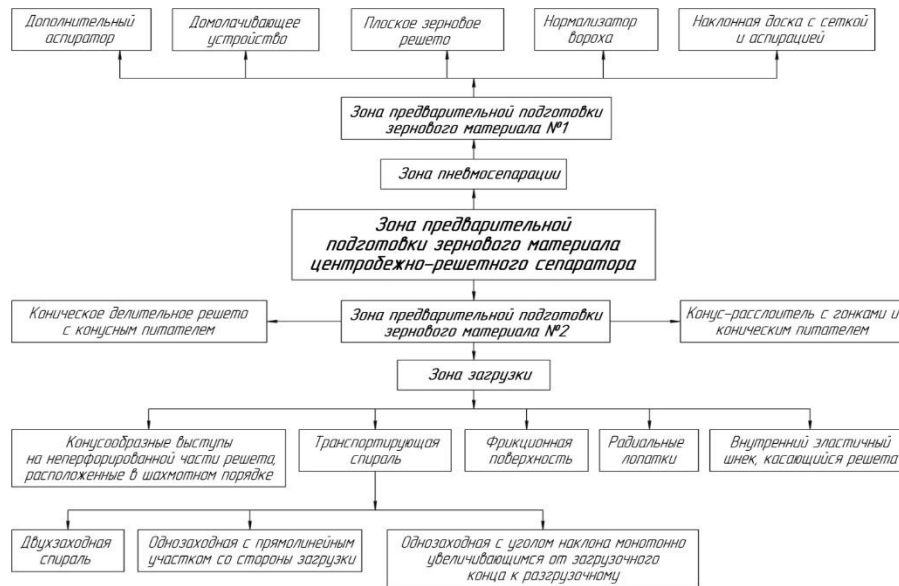


Рисунок 1.11 – Классификация способов предварительной подготовки зернового материала центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения

На основании вышесказанного нами предлагается классификация способов предварительной подготовки зернового материала центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения (см. рисунок 1.11). В данной классификации выделено четыре зоны предварительной подготовки материала:

- зона предварительной подготовки материала №1: расположена в верхней части сепаратора (в зоне загрузки зернового материала в сепаратор);
- зона пневмосепарации;



- зона предварительной подготовки материала №2: расположена между зоной пневмосепарации и первым решетом центробежно-решетного сепаратора;

- зона загрузки: расположена в верхней части первого решета центробежно-решетного сепаратора с вертикальной осью вращения.

Нами выявлены четыре зоны, в которых возможна предварительная подготовка материала в центробежно-решетных сепараторах с вертикальной осью вращения.

Предложенная классификация способов предварительной подготовки зернового материала позволяет упорядочить знания и наметить новые пути интенсификации процесса сепарации на центробежно-решетных сепараторах с вертикальной осью вращения.

### **1.5.2 Аспирационные системы центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения**

Постоянное совершенствование центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения привело к тому, что в настоящее время выпускаются сепараторы типа БЦС уже третьего поколения со значительно измененными конструктивными параметрами [123].

Центробежно-решетные сепараторы в значительной степени эффективнее плоскорешетных машин по ряду показателей: большая удельная производительность (в 5 раз и более), меньшая энерго и металлоемкость, значительно меньшие габариты, высокая эффективность очистки.

Одним из наиболее важных элементов центробежно-решетных сепараторов, особенно работающих в режиме предварительной очистки зерна, является аспирационная система.

Немаловажным фактором, определяющим эффективность системы аспирации, является применение различных лопаток на тарелке [111]. При определенных кинематических параметрах тарелки, возможно отказаться от

использования лопаток [117]. Для увеличения процесса сегрегации исходного материала лопатки выполняют с зазором на конической части тарелки [81]. Также для интенсификации сепарирования используются лопатки двух типоразмеров, попеременно установленные, активные цилиндрической формы, с изменяемым углом наклона, с увеличивающимся углом наклона относительно диска по дуге окружности [53, 132].

Для более интенсивного воздействия на зерновой материал в аспирационной камере необходимо правильно размещать воздухозаборные окна в кольцевом аспирационном канале. Применяются лопатки для «закручивания» воздушного потока [133]. Использование воздухозаборных окон жалюзийного типа позволяет избежать потерь зерна [3, 124].

Приемный конус-распределитель на тарелке позволяет регулировать начальную скорость зернового материала по тарелке [142], он может быть, как с прямолинейной направляющей, так и в виде брахистохроны [124].

С целью изменения скорости движения воздушного потока устанавливаются различные заслонки [3]. Помимо использования двух осадочных камер [161] некоторые производители сепараторов (CZA-25 фирмы «Агај» (Польша) используют дополнительную установку циклона, для улучшения осаждения пылевидных частиц. С этой же целью (обеспыливание) после прохода решетной очистки зерно дополнительно обеспыливается.

Описанные варианты аспирационных систем центробежно-решётных сепараторов с вертикальной осью вращения раскрывают возможности их дальнейшей интенсификации с технологической точки зрения.

## **1.6 Выводы и задачи исследований**

1. Проведенный анализ центробежно-решётных сепараторов показал на преимущество цилиндрической формы решета, а также на отсутствие вибрации в технологическом процессе.

2. Разработанный способ центробежно-решётного сепарирования является наиболее перспективным из всех анализируемых устройств, однако возможности данного способа сепарирования полностью не реализованы.

3. На основе анализа предложены классификация способов предварительной подготовки зернового материала и классификация отверстий решет, описание аспирационных систем центробежно-решётных сепараторов, являющихся основными направлениями повышения эффективности работы подсевных решёт. Существенно интенсифицировать процесс сепарации можно за счёт применения в технологической схеме кольцевого пневмосепарирующего канала, устройства для предварительной подготовки зернового материала и цилиндрического подсевного решета.

Из проведенного анализа процесса сепарации на цилиндрических подсевных решетках можно выделить основные направления их интенсификации:

1. Применение поля центробежных сил с движением зерна в активном слое и без вибрации.
2. Применение подсевного решета с круглыми продольными перемычками.
3. Создание условий для предварительной подготовки зернового материала.

В связи с этим выдвигается научная гипотеза работы, которая заключается в том, что интенсифицировать процесс сепарации можно в результате использования сепарирующей поверхности с предварительным расслоением зернового материала в поле центробежных сил.

Поэтому основное внимание в данной работе уделено аналитическому и экспериментальному исследованию рабочего процесса воздушного центробежно-решётного сепаратора с подсевным решетом.

**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.

## **Глава 2 Теоретические исследования процесса сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете с продольными круглыми перемычками**

### **2.1 Обоснование технологической схемы воздушного центробежно-решетного сепаратора**

Предварительная очистка зернового вороха на ворохоочистителях имеет большое значение при послеуборочной обработке. Она обеспечивает увеличение сыпучести зернового материала и его скважности; снижение влажности вороха за счёт выделения примесей – наиболее влажных компонентов зернового вороха, что способствует сохранению качества зерна при временном хранении и снижает затраты на послеуборочную сушку; повышение производительности машин на последующих операциях обработки.

Выпускаемые в настоящее время отечественные и зарубежные ворохоочистители, не в полной мере удовлетворяют современным требованиям ни по производительности, ни по качеству очистки [4].

Исследования инерционных сепараторов [5] на очистке зернового вороха показали, что они не могут выделять длинные соломистые примеси, грубые примеси, колосья и их части. Кроме того, они характеризуются повышенной энергоёмкостью. Такие примеси должны выделяться рабочими органами как отдельная машина, либо могут быть включены в технологические схемы ворохоочистителей, перед пневмосепарирующими каналами, а перед поступлением зерна на решетную сепарацию необходимо использовать предварительную подготовку.

В современных машинах для разделения зернового материала используются различия компонентов зернового вороха в основном по парусности и размерам. При обработке в несколько стадий традиционно

рабочие скорости воздушного потока, размеры отверстий решет от стадии к стадии возрастают:

$$V_1 < V_2; \quad (2.1)$$

$$b_1 < b_2, \quad (2.2)$$

где  $V_1, V_2$  – рабочие скорости воздушного потока в зоне сепарации соответственно при 1-й и 2-й стадиях сепарирования;

$b_1, b_2$  – рабочий размер отверстий решета соответственно на 1-й и 2-й стадиях сепарирования

Как показывают теоретические исследования, это не всегда целесообразно. Если обработка зернового материала осуществляется, например, в две последовательные стадии, то общую полноту выделения проходовой (выносимой воздушным потоком) фракции можно определить по формуле:

$$\mathcal{E}_{об} = \mathcal{E}_1 \frac{C_1}{C_0} + \mathcal{E}_2 \left(1 - \frac{C_1}{C_0} \cdot \mathcal{E}_1\right), \quad (2.3)$$

где  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$  – полнота выделения проходовой (выносимой) фракции соответственно в 1-й и 2-й стадиях обработки;

$C_1$  – доля зернового материала (по массе) проходовой (выносимой) фракции в общем зерновом материале, поступающем на обработку в 1-й стадии;

$C_0$  – доля зернового материала, выделяемого в проходovou (выносимую) фракцию на 2-й стадии обработки, причём эта доля вычисляется без учёта выделения проходовой (выносимой) фракции на 1-й стадии.

Как следует из формулы (2.3) при заданных  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  общая полнота выделения  $\mathcal{E}_{об}$  больше в том случае, чем больше соотношение  $\frac{C_1}{C_0}$ . Полнота выделения при совместных двух стадиях обработки будет наибольшей при  $\frac{C_1}{C_0} = 1$ .

Таким образом, для достижения наибольшей полноты выделения отделяемой фракции целесообразно устанавливать параметры сепарирующих

рабочих органов такими, при которых будет  $C_1 = C_0$ , а это обеспечивается, если  $V_1 = V_2$  и  $b_1 = b_2$ . Однако при этом необходимо будет обеспечить фракционность обработки, чтобы выделить в отдельные фракции ценные компоненты.

Как известно, при последовательном сепарировании наибольший эффект обеспечивается, если используются различные физико-механические свойства (парусность, размеры). Установлено, что наиболее целесообразно на 1-й стадии осуществлять разделение зернового материала по парусности, что существенно облегчит последующую работу решётных рабочих органов.

Исследования [19] показали, что на современном этапе наиболее эффективным является сепаратор с кольцевым пневмосепарирующим каналом. В таком рабочем органе обеспечивается тонкослойная подача зернового материала, повышенная скорость воздушного потока, встречное движение зернового материала и воздуха. Однако, для повышения эффективности сепарирования при предварительной обработке в таком сепараторе целесообразно обеспечить выделение грубых и крупных солоmistых примесей (возможно, как отдельное устройство) и расслоение компонентов вороха перед вводом его в зону сепарации.

Результаты исследований Гончарова В.С., Тарасова Б.Т. [19,115] и других учёных показывают, что наиболее эффективным методом интенсификации процесса сепарирования на решетках является применение центробежных сил и предварительная подготовка зернового материала. Так центробежные зерновые решета с круглыми отверстиями обеспечивают выделение примесей из зернового вороха по двум размерным признакам – длине и ширине. Благодаря этому из зернового вороха выделяются крупные и длинные примеси (колосья и их части, солоmistые примеси). Центробежные подсевные решета с круглыми или продолговатыми отверстиями выделяют мелкие примеси из зернового вороха.

Принципиальная схема воздушно-центробежно-решетного сепарирования представлена на рисунке 2.1.

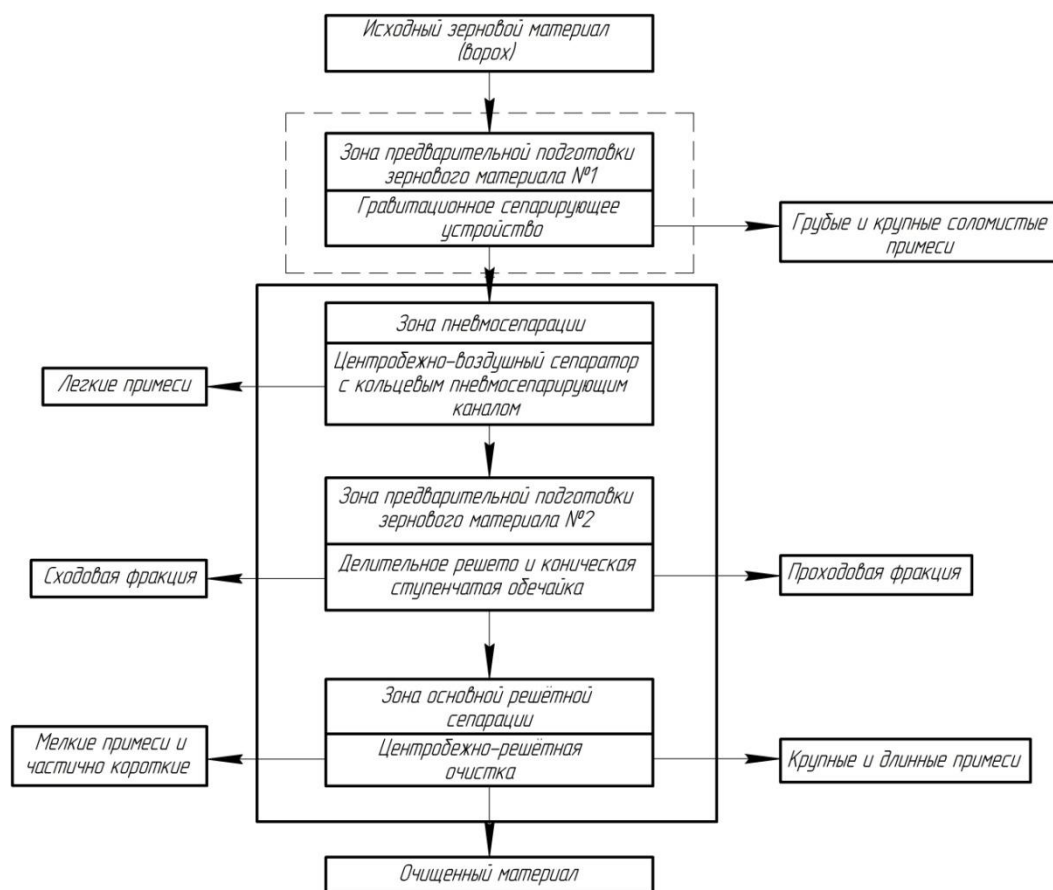


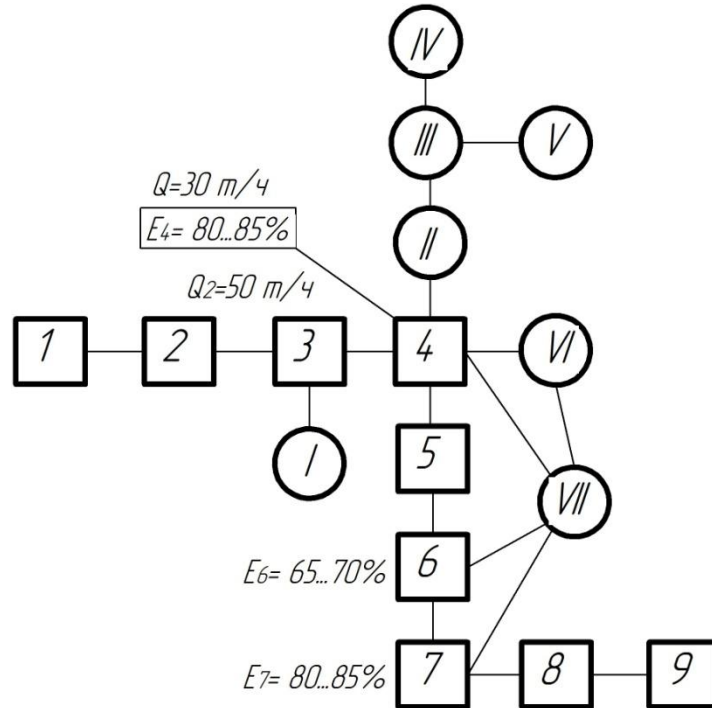
Рисунок 2.1 – Принципиальная схема воздушно-центробежно-решётного сепарирования

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 решетом (подсевным) центробежно-решётного сепаратора;
- зона загрузки решётного блока расположена в верхней части первого (подсевного) решета центробежно-решётного сепаратора.



В соответствии с принципиальной схемой (см. рисунок 2.1) представляем структурную схему технологического процесса воздушного-центробежно-решётного сепаратора (см. рисунок 2.2).



1 – приём зерна (завальная яма); 2 – транспортирование зерна на ворохоочиститель (нория НПЗ-50); 3 – подача зерна в пневмоканал ворохоочистителя; 4 – воздушное сепарирование кольцевым пневмосепарирующим каналом; 5 – предварительная подготовка зерна на делительном решете и конической ступенчатой поверхности конической обечайки; 6 – сепарирование на подсевном решете; 7 – сепарирование на зерновом решете; 8 – подача зерна в бункер очищенного зерна; 9 – кратковременное хранение и выгрузка очищенного зерна; I – отбор крупных солоmistых и грубых примесей гравитационным сепарирующим устройством; II – отсос воздуха из пневмосепарирующего устройства; III – очистка воздуха в пылеотделителе (циклоне); IV – выход очищенного воздуха в атмосферу; V – выделение лёгких примесей в первую секцию бункера; VI – осаждение лёгких примесей в осадочной камере; VII – объединение отходов ворохоочистителя

Рисунок 2.2 – Структурная схема технологического процесса воздушного центробежно-решётного сепаратора

Исследования режимов сепарирования показывают на широкие функциональные возможности воздушного центробежно-решётного сепаратора. Блочная компоновка решёт с различной формой и размерами отверстий при ориентации зёрен в активном слое позволяет работать сепаратору в режиме ворохоочистителя, первичной очистки (центробежно-решётное сепарирование в режиме триерования, в основном на выделении длинных примесей, как овсюгоотборник).

Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что на основе центробежно-решётного сепарирования появляется реальная возможность создания технологии для очистки продовольственного зерна с прохождением всех технологических операций [164]. На окончательной очистке может быть использован центробежно-воздушный сепаратор.

Структурная схема технологического процесса работы воздушного центробежно-решётного сепаратора приведена с указанием производительности и эффективности очистки при воздушной и решётной сепарации. Схема даёт представление о дифференциации процесса, основных и вспомогательных операциях, рассчитать эффективность сепарирования в зависимости от исходной засорённости зерна.

При продовольственной очистке зерна в соответствии со схемой определим эффективность процесса [2]:

$$E_0 = \left[ \frac{A-B}{A} \right] \cdot 100\%; \quad (2.4)$$

$$B = A - a_2 \cdot \eta_3 - a_l \cdot \eta_4 - a_k \cdot \eta_7 - a_m \cdot \eta_6, \quad (2.5)$$

где  $A$  – исходная засорённость зерна, %;

$B$  – остаточная засорённость зерна, %;

$a_2, a_l, a_k, a_m$  – засорённость зерна, соответственно, грубыми примесями, аэродинамическими лёгкими, крупными и мелкими (подсев);

$\eta_i$  – эффективность соответствующей операции сепарирования.

Следует отметить, что здесь при определении технологической эффективности операций очистки зерна речь идёт о выделении примесей,

отделимых по основному признаку разделения, характерному для данной операции.

## **2.2 Обоснование параметров гравитационного сепарирующего устройства**

Проблема предотвращения попадания грубых и крупных солоmistых примесей на сепарирующие поверхности зерноочистительных машин решается применением в самих машинах камнеотделительных и улавливающих устройств, например, скельператорных барабанов, сетчатых транспортёров – скельператоров, вибрационных сепарирующих поверхностей и других устройств. Одним из технологических решений задачи по удалению тонких примесей может стать применение элементов технологического процесса гравитационных сепараторов.

Предлагаемый сепарирующий корпус камнеотборника собран из отдельных базовых элементов. Базовые элементы выполнены из стальной проволоки. Отдельные элементы соединяются в единую жёсткую конструкцию с помощью специальных элементов, обеспечивающих размещение прутков с определённым шагом. Боковые стенки корпуса камнеотборника являются одновременно направляющими для наклонной части прутковой решётки и плавно переходящей в винтовую поверхность, и отводящими примеси с сепарирующей прутковой поверхности. Очистительных устройств, для камнеотборника не требуется.

Сепарирующий корпус камнеотборника крепится к верхней головке загрузочной норрии таким образом, что зерновой материал после удаления примесей перемещается по своей самотечной трубе, а грубые примеси по отдельной трубе (лотку) в приёмную ёмкость.

В технологических линиях мехтоков и хлебоприёмных пунктов применяются норрии высокой производительности. Поэтому диаметр самотечных труб должен иметь соответствующую пропускную способность.

Учитывая, что диаметр самотечных труб в современных поточных технологических линиях для обработки продовольственного зерна составляет 200-250 мм, то диаметр выбранного отверстия нории назначаем в этих пределах. Для этих отверстий справедлива формула истечения зернового материала (для пшеницы)

$$V_{ист} = 1,91F^{0.25}, \quad (2.6)$$

$$V_{ист} = 0,1 \text{ м/с.}$$

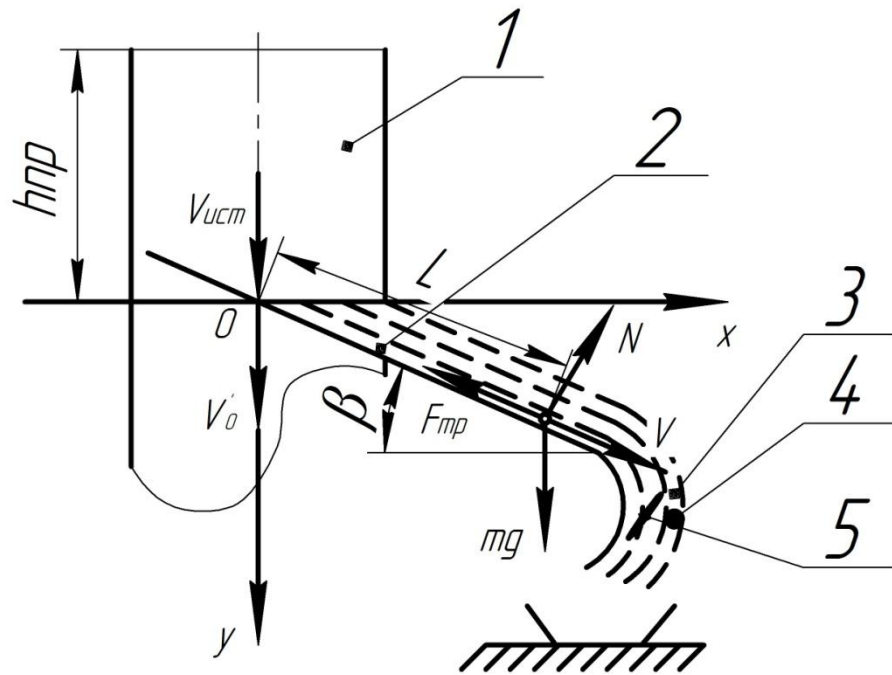
После прохождения зерновым материалом выбранного отверстия нории он встречается с наклонной сепарирующей плоскостью гравитационного сепаратора. Зная скорость истечения  $V_{ист}$  по выбранному отверстию, можно определить скорость  $V'_0$  движения частиц по сепарирующему элементу до момента касания поверхности прутковой решётки:

$$V'_0 = V_{ист} + \sqrt{2gh_{пр}}, \quad (2.7)$$

где  $h_{пр}$  – высота падения зерна после гашения скорости, равная в нашем случае 0,2 м.

Определим основные кинематические и динамические характеристики перемещения частиц примесей по гравитационному сепаратору с учётом их формы, как плоские неопрокидывающиеся частицы (крупные части соломы, камни и т.д.)

Далее будем рассматривать движение частицы по плоскости, наклоненной к линии горизонта под углом  $\beta$  с коэффициентом трения  $f$ . Определим основные кинематические параметры частицы, когда ею пройден отрезок пути длины  $L_1$  (см. рисунок 2.3).



1 – выбросное отверстие нории; 2 – наклонная часть прутковой решётки; 3 – участок винтовой прутковой поверхности; 4 – тяжёлые грубые примеси, расположенные ближе к периферии винтовой поверхности; 5 – крупные солоमистые частицы, расположенные ближе к центру винтовой поверхности

Рисунок 2.3 – Схема к определению параметров пруткового сепаратора-камнеотборника

Исходными данными для определения основных параметров работы камнеотборника являются:  $V_0' = 2,08$  м/с;  $\beta = 30^\circ$ ;  $f = 0,3$ ;  $L_1 = 0,2$  м. Дифференциальное уравнение движения частицы по наклонной сепарирующей поверхности будет иметь вид:

$$\frac{d^2L}{dt^2} = g(\sin\beta - f\cos\beta). \quad (2.8)$$

Решение уравнения (2.8) будет таким:

$$L(t) = V_0't + g(\sin\beta - f\cos\beta)\frac{t^2}{2}, \quad (2.9)$$

при этом:

$$V(t) = L(t) = V_0' + g(\sin\beta - f\cos\beta)t. \quad (2.10)$$

Подставив время  $t$  из (2.10) в (2.9), получим взаимосвязь между пройденным путём и величиной скорости в этот момент:

$$L = V_0' \frac{V - V_0'}{g(\sin\beta - f\cos\beta)} + g \frac{\sin\beta - f\cos\beta}{2g^2(\sin\beta - f\cos\beta)^2} \cdot (V - V_0')^2 = \frac{V^2 - V_0'^2}{2g(\sin\beta - f\cos\beta)},$$

Откуда находим скорость движения:

$$V = \sqrt{V_0'^2 + 2g(\sin\beta - f\cos\beta) L}. \quad (2.11)$$

Подставив численные значения, входящих в формулу (2.11) параметров получим  $V = 1,977$  м/с.

Как следует из формулы (2.8) величина ускорения постоянна:

$$a = \frac{d^2L}{dt^2} = g(\sin\beta - f\cos\beta). \quad (2.12)$$

После подстановки известных величин в формулу (2.12), получим  $a = 2,35$  м/с<sup>2</sup>. Благодаря большому живому сечению сепарирующей решётки (расстояние между прутками  $S = 10$  мм) зерновой материал просеивается и далее движется по самотечной трубе, а крупные солоmistые и тяжелые грубые примеси двигаются по винтовой поверхности с постоянным шагом винта  $h = const$ .

Зерновой материал, после сепарации на наклонной части прутковой решётки, поступает на винтовую поверхность, имея в своём составе частицы примесей, отличающихся формой, плотностью, шероховатостью. Крупные круглые минеральные примеси  $m_k$  при движении по винтовой поверхности имеют большую центробежную силу, поэтому приобретают большую скорость, чем лёгкие солоmistые (плоские)  $m_c$ .

Исходя из вышесказанного, можно записать неравенство:

$$m_k \omega_k^2 r_k > m_c \omega_c^2 r_c, \quad (2.13)$$

где  $m_k$  – плотные частицы;

$m_c$  – солоmistые частицы.

За счёт большой плотности и близкой к круглой форме частиц  $m_k$  они стремятся к периферии винтовой поверхности, а солоmistые лёгкие к центру. Происходит отдельный отвод частиц из этих областей, хотя для данного технологического процесса сепарирования такое разделение не требуется.

В разработанном устройстве с элементами наклонной и винтовой поверхностями имеется неподвижный, состоящий из прутков наклонный желоб. Сепарирующее устройство может быть установлено в верхней головке загрузочной норрии или перед входом зерна в сепаратор, оно не имеет движущихся частей и не требует привода.

### **2.3 Параметры кольцевого пневмосепарирующего канала**

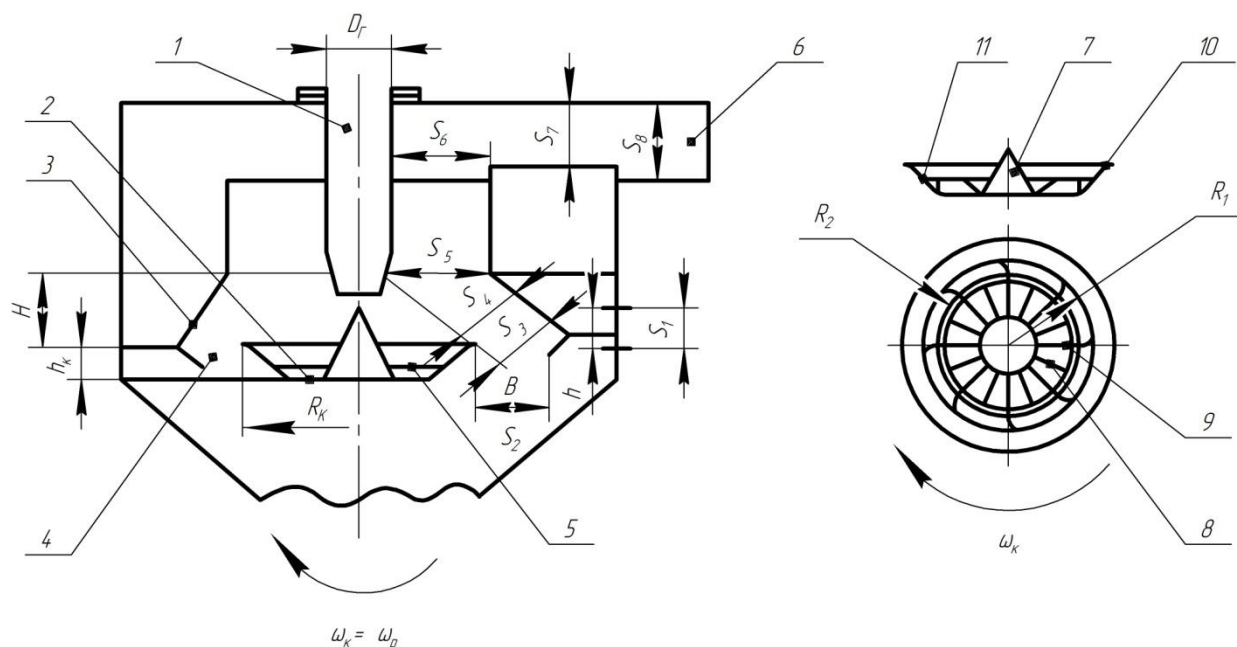
Технологические возможности разделения компонентов зернового материала по парусности с использованием принципов «взвешивания» частиц в восходящем потоке и отклонения траекторий, практически исчерпаны, так как невозможно существенно увеличить скорость воздушного потока в рабочей зоне. Для обеспечения высокой производительности 25-50 т/ч скорость ввода зерна в зону сепарации должна быть достаточно высокой, соответственно, и скорость воздушного потока должна быть высокой. Этим условиям удовлетворяют кольцевые пневмосепарирующие каналы с вводом зернового материала в рабочую зону сепарации центробежными разбрасывателями.

Проведенный анализ кольцевых пневмосепарирующих каналов и их применение в центробежно-решётных сепараторах показывают, что они имеют преимущества в сравнении с плоскорешётными сепараторами с вертикальными пневмоканалами [80, 147]. Практика показывает, что цилиндрические решёта с вертикальной осью вращения компактно сочетаются с кольцевыми пневмосепарирующими каналами [19, 116].

Известно, что интенсифицировать процесс сепарирования в таких каналах можно за счёт увеличения скорости движения частиц зернового материала, и скорости воздушного потока. Когда зерновой материал в сепарирующих каналах вводится центробежным разбрасывателем, то процесс сепарирования называют центробежно-воздушным.

Используя конический разбрасыватель, подавать зерновой материал в кольцевой сепарирующий канал предпочтительно в горизонтальном направлении, а воздушный поток в канале направлять навстречу зерновому потоку, сходящему с разбрасывателя, под углом, близким к  $45^\circ$ .

В разработанном устройстве (см. рисунок 2.4) конический отражатель 3 сепарирующей зоны канала представляет собой форму полого усечённого конуса, внутри которого соосно расположен конический разбрасыватель 2, обеспечивающий равномерную подачу зернового материала в кольцевой пневмосепарирующий канал 4.



1 – загрузочная горловина; 2 – конический разбрасыватель; 3 – конический отражатель; 4 – кольцевой пневмосепарирующий канал; 5 – разгонные лопатки; 6 – выпускной патрубок; 7 – направляющий конус; 8 – короткие разгонные лопатки; 9 – длинные разгонные лопатки; 10 – плавно отогнутая наружу кромка конической части разбрасывателя; 11 – боковина чаши разбрасывателя;  $D_r$  – диаметр загрузочной горловины;  $h_k$  – высота конического разбрасывателя;  $H$  – высота сепарирующей зоны кольцевого канала;  $B$  – ширина канала;  $R_k$  – радиус кромки конического разбрасывателя;

$\omega_k$  – угловая скорость конического разбрасывателя

Рисунок 2.4 – Принципиальная схема к определению параметров центробежно-воздушного сепарирующего устройства



В этом случае воздушный поток в пределах зоны сепарации выше и становится восходяще-ускоряющимся. В нижней части конического разбрасывателя на диске установлены разгонные лопатки 5 для сообщения зерновому материалу начальной угловой скорости.

Лопатки большей длины имеют изгиб на конус в сторону, противоположную относительно возможного направления вращения разбрасывателя 2. Для более равномерного распределения зерна по поверхности отражателя радиус изгиба их концов определяется из выражения:

$$R_2 \geq 1,5R_1, \quad (2.14)$$

где  $R_1$  – радиус концов длинных лопаток;

$R_2$  – радиус изгиба концов длинных лопаток.

Рабочий процесс сепаратора протекает следующим образом. Исходный зерновой материал поступает в загрузочную горловину 1, имеющую в нижней части конусное сужение, обеспечивающее равномерную с определённой скоростью его подачу на конический разбрасыватель 2.

Короткие и длинные лопатки конического разбрасывателя сообщают зерновому материалу угловую скорость, равную угловой скорости разбрасывателя. Равномерность движения с требуемой скоростью зерновой струи, сходящей с разбрасывателя и поступающей в пневмосепарирующий канал 4, обеспечивается за счёт конструкции лопаток и плавно отогнутой наружу кромки конической его части. В этом канале выделяются лёгкие примеси, которые по патрубку 6 поступают в осадочную камеру (на рисунке 2.4 не указана). Эффективность выделения лёгких примесей достигается за счёт оптимальной скорости ввода зернового материала в пневмосепарирующий канал и конического отражателя с обратным конусом в нижней его части, обеспечивающий двойное воздействие воздушного потока на сепарируемый материал в рабочей зоне. В результате действия этих факторов удаётся извлечь больше лёгких примесей. Это способствует повышению качества сепарирования.

Проведём расчёт воздушной очистки.

Определим потребный расход воздуха исходя из заданной скорости воздушного потока в рабочей зоне сепарации [110]:

$$Q_c = F_k \cdot V_g, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.15)$$

где  $F_k$  – площадь канала в конкретном сечении,  $\text{м}^2$ ;

$V_g$  – рабочая скорость воздуха (принимается  $V_g = 9 \text{ м/с}$ ).

Площадь канала определяется как площадь боковой поверхности усечённого конуса:

$$F_k = 2\pi R_{cp} \cdot S_3, \text{ м}^2 \quad (2.16)$$

где  $R_{cp}$  – средний радиус кольцевого воздушного канала в рабочей зоне;

$S_3$  – ширина канала в рабочей зоне.

Исходя из принятых геометрических размеров характерных сечений пневмосепарирующего канала, определим потери давления на всём пути движения воздуха по формуле:

$$\Delta P = \sum \xi_i \cdot \frac{\rho V_{bi}^2}{2} = \sum \xi_i \cdot \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q_c}{F_k} \right)^2, \text{ Па} \quad (2.17)$$

где  $\xi$  – коэффициент местных сопротивлений;

$\rho$  – плотность воздуха;

$V_b$  – скорость воздуха,  $\text{м/с}$ ;

$Q_c$  – расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Зная потери давления при каждом сопротивлении, определим общие потери давления:

$$\Delta P = \Delta P_{1-8}, \text{ Па} \quad (2.18)$$

Определим скорость воздушного потока в осадочной камере с учётом цилиндрического расширения после зоны сепарирования:

$$V_{ок} = V_{cp} \cdot \frac{F}{F_{ок}}, \text{ м/с} \quad (2.19)$$

где  $F_{ок} = B \cdot L$  – площадь осадочной камеры;

$B$  – ширина осадочной камеры;

$L$  – длина осадочной камеры.

С учётом расхода воздуха и потерь давления можно определить мощность, необходимую для привода вентилятора:

$$N = \frac{Q \cdot H}{1000 \eta}, \text{ кВт} \quad (2.20)$$

где  $H$  – развиваемое давление, Па;

$Q$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;

$\eta$  – КПД вентилятора,  $\eta = 0,74$ .

Рациональный ввод частиц в пневмосепарирующий канал будет обеспечиваться при угле между образующей поверхности и осью разбрасывателя, близком к величине угла внешнего трения частиц, при этом величина  $h_k = 0,05 - 0,07$  м.

Скорость вращения разбрасывателя зависит от величины параметра  $R_k = 0,25-0,3$  м, что составляет, соответственно,  $\omega_k = 10,9-11,15$  с<sup>-1</sup>, когда привод разбрасывателя осуществляется от конической ступенчатой обечайки, а не от вала пластинчатого барабана.

Приведённые кинематические параметры конического разбрасывателя свидетельствуют о том, что имеется реальная возможность сочетания пневмосепарирующего канала с решётным блоком центробежно-решётного сепаратора. Совмещение блоков центробежно-воздушной сепарации и центробежно-решётной сепарации цилиндрическими решётами с вертикальной осью вращения существенно расширяет технологические возможности разработанного способа решётного сепарирования.

### **2.3.1 Технологическая эффективность центробежно-воздушного сепарирования**

В настоящее время ряд исследователей и конструкторов придерживаются мнения о том, что наиболее полно требованиям эффективной очистки и рациональной компоновки машины отвечают каналы кольцевой формы [79,147]. В современных зерноочистительных машинах

при очистке зерна средней засорённости эффективность выделения лёгких примесей составляет 60-70% при требуемой четкости сепарирования.

Оценивать эффективность воздушного сепарирования будем показателем  $E$ , представляющим собой отношение количества примесей, выделенных из зерна, к количеству их в исходном зерновом материале [28],

$$E = \frac{A-B}{A} \cdot 100\%, \quad (2.21)$$

где  $A$  – содержание отделимых воздушным потоком примесей в исходном зерновом материале, кг;

$B$  – количество выделенных примесей (масса отходов), кг.

Исходя из формулы (2.21) рассмотрим работу двух последовательных воздушных очисток.

Остаточная засорённость будет равна:

$$B = A - A_{л}^{выд} - \sum A_{пр}^{выд}, \quad (2.22)$$

где  $A_{л}^{выд}$  – выделенные лёгкие примеси, %;

$$A_{л}^{выд} = A_{л1}^{выд} + A_{л2}^{выд} = a_{л} \eta_{\epsilon1} + A_{л2}^{пост} \eta_{\epsilon2}^{пост} = a_{л1} \eta_{\epsilon1} + a_{л} (1 - \eta_{\epsilon1}) \eta_{\epsilon2} = a_{л} (\eta_{\epsilon1} + \eta_{\epsilon2} - \eta_{\epsilon1} \eta_{\epsilon2});$$

Тогда остаточная засорённость лёгкими примесями составит:

$$B = A - a_{л} (\eta_{\epsilon1} + \eta_{\epsilon2} - \eta_{\epsilon1} \eta_{\epsilon2}) - \sum A_{пр}^{выд}, \quad (2.23)$$

$$\eta_{\epsilon2} = \frac{A_{л2}^{выд}}{A_{л2}^{пост}}; \quad A_{л2}^{пост} = a_{л} (1 - \eta_{\epsilon1});$$

$$\eta_{\epsilon1} = \frac{A_{л1}^{выд}}{a_{л}} = \frac{a_{л} - A_{л1}^{пост}}{a_{л}} = \frac{a_{л} - a_{л2}^{пост}}{a_{л}},$$

где  $\eta_{\epsilon1}$ ,  $\eta_{\epsilon2}$  – соответственно эффективность первого и второго воздушного сепарирования.

Эффективность первого и второго воздушного сепарирования определяется как отношение выделенных примесей на  $i$ -той операции  $A_{ли}^{выд}$  к поступившим  $A_{ли}^{пост}$ .

Тройная воздушная очистка предусматривает получение семенного материала. Здесь можно использовать пневмосепаратор, как отдельную машину.

Для этого случая можно записать:

$$A_{л}^{6ы\delta} = A_{л1}^{6ы\delta} + A_{л2}^{6ы\delta} + A_{л3}^{6ы\delta}. \quad (2.24)$$

Запишем определения, составляющих компонентов этого уравнения:

$$A_{л1}^{6ы\delta} = a_{л} \eta_{61};$$

$$A_{л2}^{6ы\delta} = A_{л2}^{\text{пост}} \cdot \eta_{62} = A_{л1}^{\text{ост}} \cdot \eta_{62} = a_{л} (1 - \eta_{61}) \eta_{62};$$

$$A_{л3}^{6ы\delta} = A_{л3}^{\text{пост}} \cdot \eta_{63} = (a_{л} - A_{л1}^{6ы\delta} - A_{л2}^{6ы\delta}) \eta_{63} = (a_{л} - a_{л} \eta_{61} - a_{л} \eta_{62} + a_{л} \eta_{61} \eta_{62}) \eta_{63};$$

Тогда для этого случая можно записать:

$$A_{л}^{6ы\delta} = a_{л} \eta_{61} + a_{л} (1 - \eta_{61}) \eta_{62} + a_{л} (1 - \eta_{61} - \eta_{62} + \eta_{61} \eta_{62}) \eta_{63} = a_{л} (\eta_{61} + \eta_{62} - \eta_{61} \eta_{62} + \eta_{63} - \eta_{61} \eta_{63} - \eta_{62} \eta_{63} + \eta_{61} \eta_{62} \eta_{63});$$

Окончательно количество выделенных примесей после третьей воздушной сепарации составит:

$$A_{л}^{6ы\delta} = a_{л} (\eta_{61} + \eta_{62} + \eta_{63} - \eta_{61} \eta_{62} - \eta_{61} \eta_{63} - \eta_{62} \eta_{63} + \eta_{61} \eta_{62} \eta_{63}). \quad (2.25)$$

Таким образом, если при  $\eta_{61} = 1$  или при  $\eta_{62} = 1$ , или при  $\eta_{63} = 1$ , получим  $A_{л}^{6ы\delta} = a_{л}$ .

Проведённые расчёты показывают, что технологические возможности разработанного способа сепарирования могут быть расширены при совмещении кольцевого пневмосепарирующего канала с решётным блоком центробежно-решётного сепаратора.

## **2.4 Обоснование параметров устройства для предварительной подготовки зернового материала**

### **2.4.1 Технологические особенности работы конической обечайки со ступенчатой поверхностью**

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 представляло собой коническую обечайку, где устанавливалось делительное решето, которое

было исследовано в работе Стрикунова Н.И. [100] на выделении длинных и крупных примесей.

Исследования Гольдина Е.М. [25] позволили установить, что при движении зернового материала по ступенчатой конической поверхности траектории частиц получались отклонёнными в сторону, противоположную вращению, т.е. абсолютная скорость частиц при этом уменьшилась. Таким образом, уменьшение скорости приводит к уменьшению силы тяжести частиц к стенке конуса. Положительное значение уступов заключается во встряхивании материала во время его движения, однако встряхивание (отрыв материала от поверхности) наблюдается только мелких частиц; более крупные частицы проходили через уступы плавно, без заметного встряхивания.

Для эффективного расслоения зернового материала коническая обечайка имеет на своей внутренней части ступенчатую поверхность. При движении по этой поверхности зерновой материал должен расслаиваться: длинные и крупные примеси при движении по ступенчатой поверхности, оказываются в верхнем слое, в нижнем слое, контактирующем с поверхностью ступенчатой обечайки, оказываются мелкие примеси. Поэтому при подходе такого расслоенного зернового материала к цилиндрическому подсевному решету в первую очередь просеиваются мелкие частицы. При движении по конусу зерновой материал разрыхляется, и между частицами образуются поры. Зная средний размер частиц  $\bar{\delta}$ , можно определить средний размер пор  $\bar{\varepsilon}$ , если учесть, что в среднем число пор равно числу частиц.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum^N \varepsilon_j}{N} = \frac{L}{N} \left(1 - \frac{\bar{\delta} N}{L}\right) = \frac{L}{N} \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma}\right), \quad (2.26)$$

где  $N = \frac{\gamma_0^L}{\gamma^{\delta}}$ ,

$\gamma_0$  – объёмный вес дисперсной среды;

$\gamma$  – удельный вес частиц.

Подставляя  $N$  в уравнение (2.26), получим:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\delta} \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} - 1\right). \quad (2.27)$$

Основными параметрами зернового материала, определяющими его физические и механические свойства, является плотность укладки частиц, оцениваемая коэффициентом плотности  $k = \frac{\gamma_0}{\gamma}$ .

Для пшеницы этот коэффициент колеблется в пределах  $k_{min}=0,55$  и  $k_{max}=0,655$  [76]. Если  $k = 0,55$ , то подставляя его значение в формулу (2.27) получим средний размер пор.

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\delta} \left( \frac{\gamma_0}{\gamma} - 1 \right) = \bar{\delta} \left( \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0} \right) = \bar{\delta} \left( \frac{1-k}{k} \right) = 0,82 \bar{\delta},$$

При  $k = 0,655$  средний размер пор принимает значение  $\bar{\varepsilon} = 0,503 \bar{\delta}$ . Если принять для пшеницы  $\bar{\delta} = 3$  мм, то:

$$\bar{\varepsilon}_{k \min} = 0,82 \bar{\delta} = 2,46 \text{ мм},$$

$$\bar{\varepsilon}_{k \max} = 0,503 \bar{\delta} = 1,509 \text{ мм}.$$

Отсюда следует, что через поры могут проходить частицы, средний размер которых колеблется от 1,5 мм до 2,46 мм и больше.

Исходя из полученных значений, высота ступенек на конической обечайке должна быть 4-5 мм.

Эффект разрыхления зернового материала, при котором образуются поры, может быть использован и в межпластинчатом пространстве внутреннего барабана центробежно-решётного сепаратора.

#### **2.4.2 Движение частицы по внутренней поверхности конической обечайки со ступенчатой поверхностью**

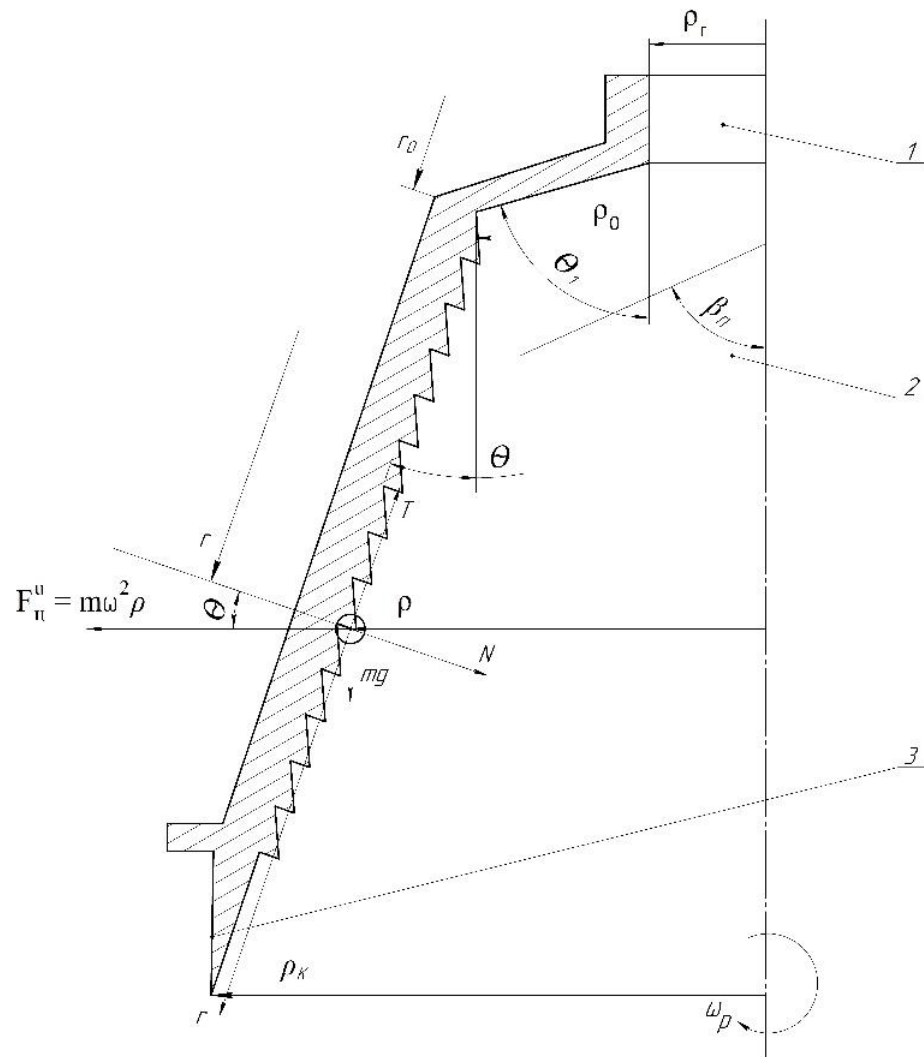
Коническая обечайка является одновременно как рабочим органом за счёт устройства ступенчатой расслоительной поверхности, так и несущей конструкцией. В верхней части обечайка заканчивается загрузочной горловиной, а нижняя её часть жёстко закрепляется к цилиндрическому подсевному решету и вращается со скоростью последнего  $\omega_k = \omega_p$ .

С целью обоснования угла раскрытия конуса обечайки, представим расчётную схему устройства (см. рисунок 2.5).

Для движения зерна по конусу необходимо, чтобы выполнялось условие  $N > 0$ , особенно в верхней части конуса, где сила инерции не больше 1 [108].

Второе условие:

$$F_y^u + G \geq F_{mp}. \quad (2.28)$$



1 – загрузочная горловина; 2 – питатель; 3 – коническая обечайка

Рисунок 2.5 – Схема к определению параметров движения частицы по внутренней поверхности конической обечайки

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



Составим дифференциальное уравнение движения частицы по конусу:

$$m\ddot{r} = mg\cos\Theta - fN + F_u^u \sin\Theta. \quad (2.29)$$

Подставим значения величин в формулу (2.29):

$$\begin{aligned} m\ddot{r} &= mg\cos\Theta + mgf\sin\Theta + m\omega^2\rho f\cos\Theta - 2m\omega f\dot{r} + m\omega^2\rho\sin\Theta; \\ \text{или } \ddot{r} - \omega^2(\sin^2\Theta - f\sin\Theta\cos\Theta) r &= g(\cos\Theta + f\sin\Theta) \end{aligned} \quad (2.30)$$

При  $\Theta > \Theta_{кр}$  будет  $\ddot{r} > 0$ ; при  $\Theta = \Theta_{кр}$ ,  $\ddot{r} = 0$ .

Найдём этот угол  $\Theta_{кр}$  из выражения (2.30), приняв в нём  $\ddot{r} = 0$ .

$$\begin{aligned} -\omega^2 \sin \Theta_{кр} r (\sin \Theta_{кр} - f \cos \Theta_{кр}) &= g (\cos \Theta_{кр} + f \sin \Theta_{кр}); \\ r \sin \Theta_{кр} &= \rho_0. \end{aligned}$$

Поделив на ускорение свободного падения  $g$ , получим:

$$\frac{\omega^2 \rho_0}{g} (f \cos \Theta_{кр} - \sin \Theta_{кр}) = (\cos \Theta_{кр} + f \sin \Theta_{кр}).$$

Полученное выражение умножаем на  $\frac{1}{\cos \Theta_{кр}}$ , тогда

$$\frac{\omega^2 \rho}{g} (f - \operatorname{tg} \Theta_{кр}) = 1 + f \operatorname{tg} \Theta_{кр},$$

где  $\frac{\omega^2 \rho}{g} = K_\rho$ , а  $f = \operatorname{tg} \varphi$ .

Тогда:

$$K_\rho (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \Theta_{кр}) = 1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \Theta_{кр} \quad \text{или} \quad K_\rho \frac{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \Theta_{кр}}{1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \Theta_{кр}} = 1,$$

$$K_\rho \operatorname{tg}(\varphi - \Theta_{кр}) = 1,$$

$$\text{отсюда } \Theta_{кр} = \varphi - \operatorname{arctg} \frac{1}{K_\rho}. \quad (2.31)$$

Рабочий угол раскрытия конуса  $\Theta_{раб}$  должен быть больше  $\Theta_{кр}$  ( $\Theta_{раб} > \Theta_{кр}$ ).

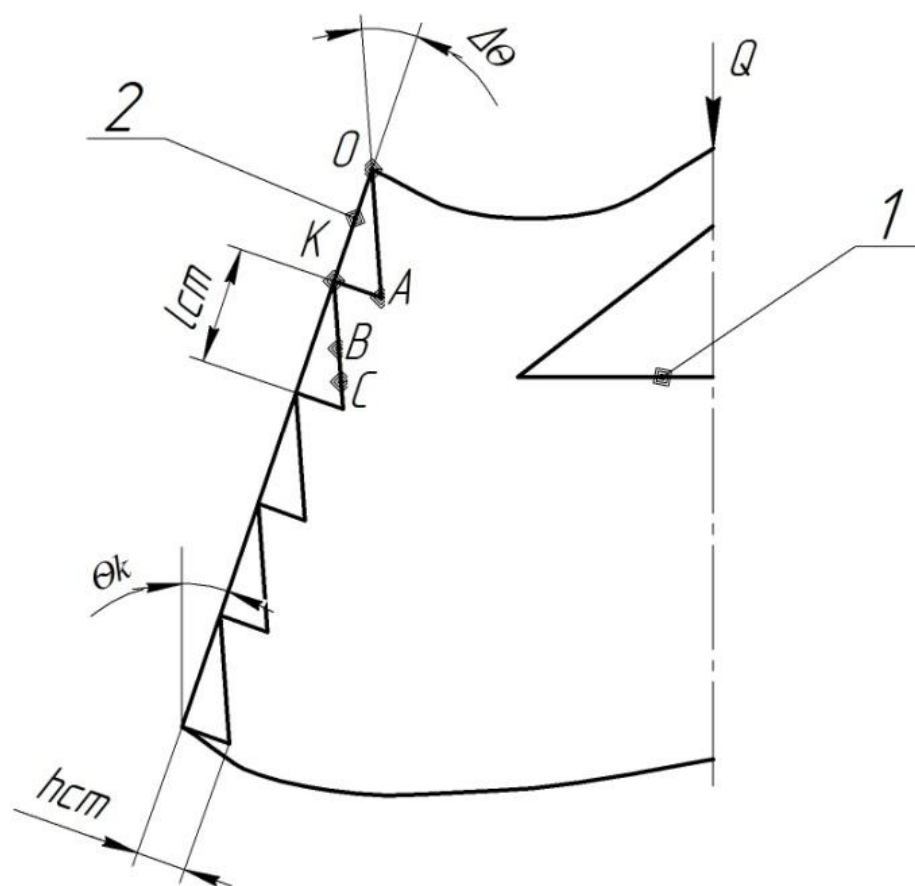
Определим угол  $\Theta_{кр}$  обечайки в конце конуса:

$$K = \frac{\omega^2 R}{g} = \frac{\omega^2 \rho \cdot R}{\rho g} = \frac{\omega^2 \rho}{g} \cdot \frac{R}{\rho} = K_\rho \cdot \frac{R}{\rho}, \quad \text{отсюда } K_\rho = \frac{\rho}{R}.$$

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

$$\Theta_{кр}^{min} = \varphi - \operatorname{arctg} \frac{1}{K_\rho} = 25 - 16,17 = 8,83^\circ.$$

Угол раскрытия  $\theta$  необходимо взять таким, чтобы зерно удерживалось на конусе, так как слою зерна надо двигаться и расслаиваться. Исходя из конструктивных соображений в сепараторе  $\theta$  принят равным  $18^\circ$ , что не противоречит условию безотрывного движения [108]. Угол раскрытия  $\theta_1$  в нижней части загрузочной горловины выбираем конструктивно  $\theta_1 = 45^\circ$  с учётом ограниченности высоты конуса. Для нормального расслоения необходимо обеспечить движение зернового материала, прошедшего по ступенчатой поверхности конуса с началом в точке 0 (см. рисунок 2.6). Это условие обеспечивается.



1 – питатель; 2 – коническая ступенчатая поверхность

Рисунок 2.6 – Элемент расчета процесса расслоения зернового материала на конической обечайке

Проходовая фракция поступает на ступенчатую поверхность конической обечайки. При движении зернового материала по рабочей

поверхности обечайки мелкие и более 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, при котором мелкие и тяжёлые частицы в результате действия инерционных сил, способны проникнуть еще глубже, чем крупные и менее плотные частицы.

При прохождении нескольких таких ступенек происходит распределение материала на мелкую фракцию, которая сосредотачивается ближе к поверхности ступенек, и крупную, частицы которой всплывают (вытесняются более мелкими и тяжелыми) в верхний слой. Этим достигается повышение эффективности очистки зерна от мелких примесей на цилиндрическом подсевном решете, а при очистке зерна от длинных примесей на цилиндрическом зерновом решете.

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

Размер  $h_{ст}$  принят из условия достаточно интенсивного встряхивания. Исследования по расслоению зернового материала на колеблющейся поверхности показывает, что для достаточного расслоения необходимо, чтобы амплитуда колебаний была не меньше эффективного диаметра частиц ( $d_o = 4,4$  мм). В данном случае роль амплитудных колебаний будет выполнять высота ступенек  $h_{ст}$ .

Размер  $l_{cm}$  также влияет на качество расслоения. При выборе этого размера использовались исследования А.П. Слепова [85]. При длине образующей конуса  $L = 200...250$  мм размещалось 10 ступенек длиной  $l_{cm} = 20$  мм. Поэтому по длине образующей конической обечайки  $L = 360$  мм потребуется 18 ступенек.

Предложенные варианты интенсификации процесса очистки зерна от мелких, длинных и крупных примесей на центробежно-решетном сепараторе позволяет повысить полноту выделения этих примесей.

Эффект расслоения зернового материала на конической обечайке со ступенчатой поверхностью даёт возможность использовать этот процесс при работе пластинчатого барабана центробежно-решетного сепаратора.

### **2.4.3 Аналитическое исследование процесса движения зернового материала по внутренней поверхности конической обечайки**

Коническая обечайка, обращённая большим основанием вниз, используется в качестве расслаивающей поверхности при предварительной подготовке зернового материала.

Безотрывное движение зерна по внутренней поверхности конуса обеспечивается при условии, когда нормальная реакция  $N$  конуса будет больше нуля. Величина этой реакции зависит от угла раскрытия конуса  $\Theta$  и кинематического режима. Проведём аналитическое исследование движения зерна по конической обечайке.

Авдеев Н.Е. [2] указал, что пренебрежение влиянием гравитационного поля или действия кориолисовых сил инерции [25,43] для упрощения математической модели процесса сепарации приводит к принципиальным ошибкам в определении основных параметров процесса.

Для описания процесса относительного движения частицы по внутренней поверхности конической обечайки воспользуемся уже полученными Авдеевым Н.Е. дифференциальными уравнениями. Уравнение описывает движение частицы по конусу снизу-вверх [2].

Чтобы использовать эти уравнения для решения нашей задачи, достаточно в них поменять знак на обратный, перед ускорением свободного падения  $g$ . Тогда система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{r} = r(\omega - \dot{\varphi})^2 \sin^2 \Theta + g \cos \Theta - \frac{fN\dot{r}}{m \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\varphi} \sin \Theta)^2}}, \end{array} \right. \quad (2.32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\varphi} = \frac{2}{r} \dot{r}(\omega - \dot{\varphi}) - \frac{fN\dot{\varphi}}{m \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\varphi} \sin \Theta)^2}}, \end{array} \right. \quad (2.33)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N = m[r(\omega - \dot{\varphi})^2 \cos \Theta - g] \sin \Theta, \end{array} \right. \quad (2.34)$$

где  $f$  – коэффициент, учитывающий сопротивление движению частицы по поверхности конической обечайки;

$N$  – нормальная реакция поверхности конуса;

$g$  – ускорение свободного падения;

$r$  – радиус конуса в текущей точке;

$m$  – масса зерновой частицы;

$\omega$  – частота вращения конической обечайки;

$\dot{r}$  – скорость частицы в меридиональном направлении;

$\dot{\varphi}$  – скорость частицы в трансверсальном направлении.

Подставив значение нормальной реакции  $N$  в  $\ddot{r}$  и  $\ddot{\varphi}$ , сделав преобразование, окончательно получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{r} = r(\omega - \dot{\varphi})^2 \sin^2 \Theta + g \cos \Theta - \frac{f\dot{r}[r(\omega - \dot{\varphi})^2 \cos \Theta - g] \sin \Theta}{\sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\varphi} \sin \Theta)^2}}, \end{array} \right. \quad (2.35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\varphi} = \frac{2}{r} \dot{r}(\omega - \dot{\varphi}) - \frac{f\dot{\varphi}[r(\omega - \dot{\varphi})^2 \cos \Theta - g] \sin \Theta}{\sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\varphi} \sin \Theta)^2}}. \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Система нелинейных дифференциальных уравнений описывает движение частицы по внутренней поверхности конической обечайки, вращающейся с постоянной угловой скоростью относительно вертикальной оси. В уравнение входят переменные величины  $t$ ,  $r$ ,  $\dot{r}$ ,  $\dot{\varphi}$  и постоянные величины  $\omega$ ,  $\Theta$ ,  $f$ ,  $g$ , причём  $\omega = \omega_p$ , то есть коническая обечайка вращается с такой же скоростью, что и цилиндрическое подсевное решето, но при этом  $\dot{\varphi} < \omega$ .

Начальные условия такие: при  $t = 0$ ,  $r = r_0$ ,  $\dot{r} = \dot{r}_0$ ,  $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_0$  и  $\varphi_0 = 0$ . Начальные условия  $\dot{r}_0$  и  $\dot{\varphi}_0$  движения частиц зернового материала

определяется конструкцией и кинематическим режимом питающего устройства, изменить их невозможно и зависеть они будут от физико-механических свойств исходного материала и диаметра нижнего основания конуса питателя [100]. Уравнения (2.35) и (2.36) решались при помощи компьютера численным методом Рунге-Кутты 4 порядка.

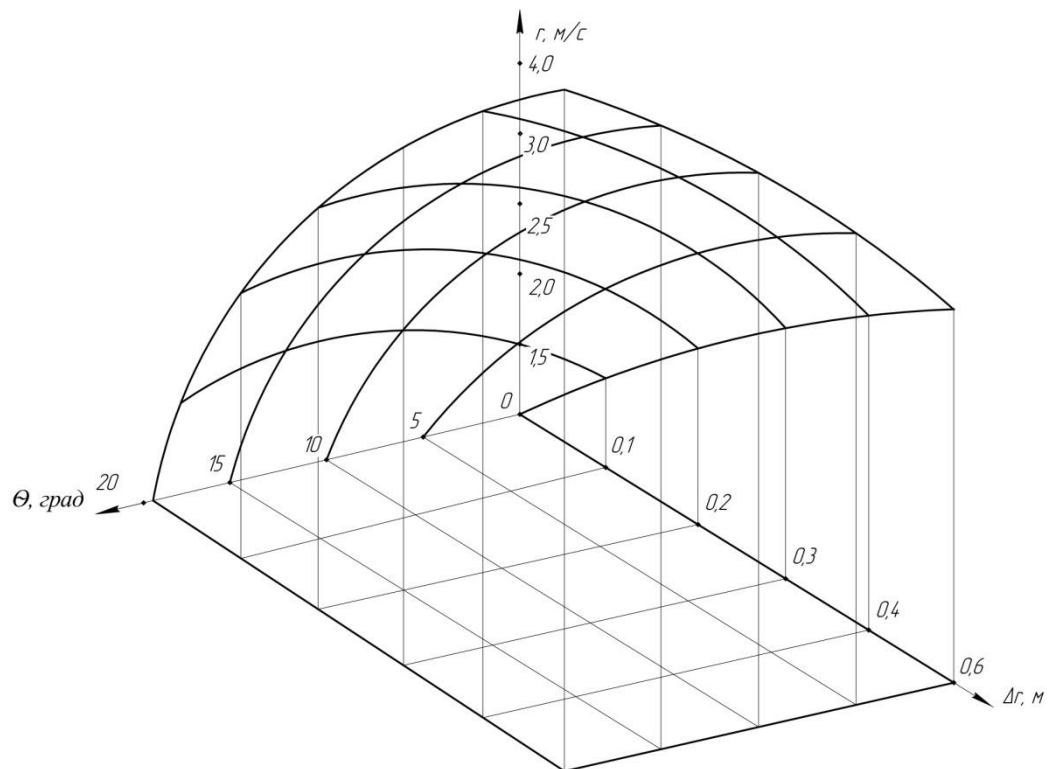


Рисунок 2.7 – Изменение меридиональной скорости частицы по конической обечайке

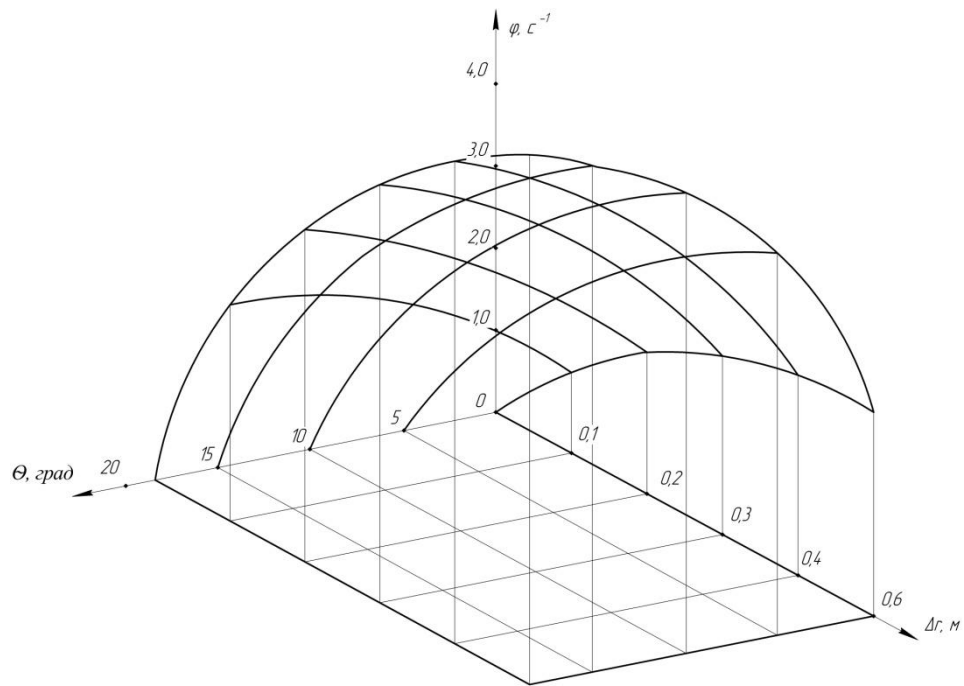


Рисунок 2.8 - Изменение трансверсальной скорости частицы по конической обечайке

На рисунке 2.7, 2.8 приведены графики зависимости  $\dot{r} = \dot{r}(r)$  и  $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}(r)$  от основного параметра конической обечайки - угла при вершине конуса. Как видно из графиков, меридиональная скорость частицы при движении к выходу конической обечайки возрастает при всех значениях  $\Theta$ , причем наиболее значительно возрастает трансверсальная составляющая относительной скорости при заданном начальном значении  $\dot{\varphi}_0 = 0$  и других параметрах.

## 2.5 Движение зернового материала в активном слое цилиндрического подсевного решета

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 (см. рисунок 2.9). Для этого выделим элемент, соответствующий шагу расстановки радиальных пластин барабана и определим силы, действующие на этот элемент, при допущении, что окружное ускорение активного слоя равно нулю:

$N_p$  – нормальная реакция решета;

$G_A = m_A g$  – сила веса выделенного элемента активного слоя;

$T_p = f_p N_p$  – сила трения зернового материала о решето ( $f_p = tg\varphi$  – коэффициент трения о решето);

$T_0 = f N_0$  – сила трения зернового материала, заключённого между пластинами барабана о зерновую массу активного слоя;

$P_A = m_A \omega_A^2 R_{ACP}$  – центробежная сила инерции выделенного элемента;

$F_A^{un} = m_A a_{zA}$  – сила инерции, действующая на зерновой материал выделенного элемента в осевом направлении ( $m_A$  – масса зернового слоя,  $a_{zA}$  – осевое ускорение активного слоя).

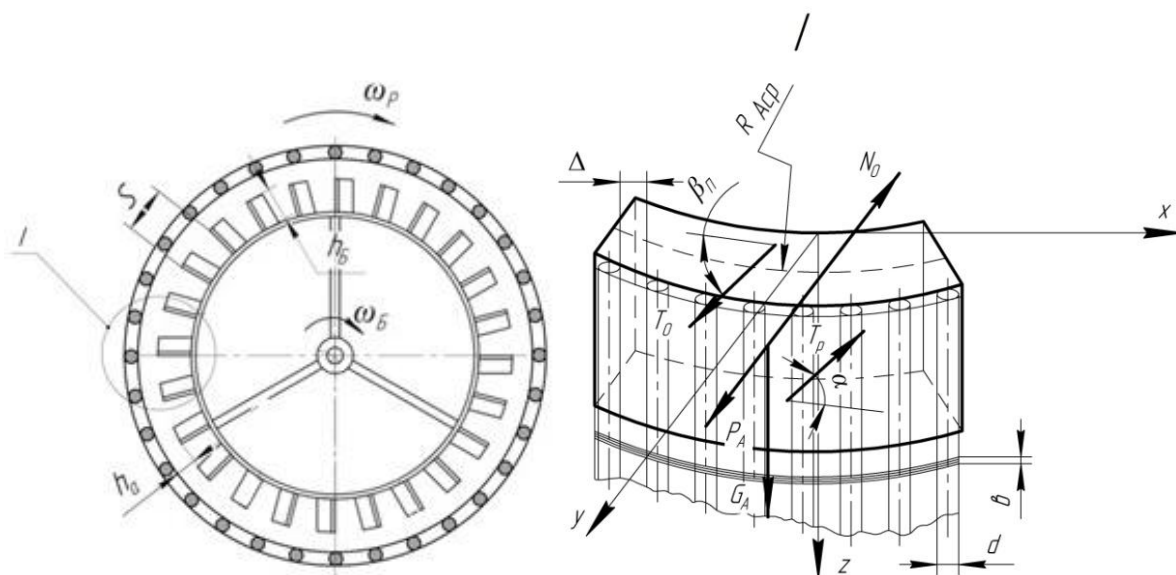


Рисунок 2.9 – Разрез подсевного решета и схема сил, действующих на зерновой материал выделенного элемента, соответствующая шагу расстановки пластин барабана



Рассмотрим равновесие зернового материала в активном слое:

$$\Sigma x = T_p \cos \alpha - T_0 \cos \beta_{II} = 0, \quad (2.37)$$

$$\Sigma y = N_p - P_A - N_0 = 0, \quad (2.38)$$

$$\Sigma z = G_A - T_p \sin \alpha + T_0 \sin \beta = F_A^{ин}. \quad (2.39)$$

Перепишем уравнения (2.37)-(2.39) с учётом сил трения, сил инерции и силы веса:

$$\Sigma x = N_p f_p \cos \alpha - N_0 f \cos \beta_{II} = 0, \quad (2.40)$$

$$\Sigma y = N_p - P_A - N_0 = 0, \quad (2.41)$$

$$\Sigma z = G_A - N_p f_p \sin \alpha + N_0 f \sin \beta_{II} = m_A a_{ZA}. \quad (2.42)$$

Из уравнения (2.41) выразим:

$$N_p = P_A + N_0. \quad (2.43)$$

Поделим выражение (2.40) на  $F_{\sigma}^{ин}$  с учётом выражения (2.43) и выразим  $\cos \alpha$ :

$$\cos \alpha = \frac{\mu f \cos \beta_{II}}{(\mu + \delta) f_p}, \quad (2.44)$$

где  $\delta = \frac{P_A}{F_B^{ин}}$ ;

$F_B^{ин}$  – центробежная сила инерции барабана.

Найдём осевое ускорение зернового материала в активном слое из выражения (2.42):

$$a_{ZA} = \frac{G_A - N_p f_p \sin \alpha + N_0 f \cos \beta_{II}}{m_A}, \quad (2.45)$$

$$a_{ZA} = g - (\omega_{cp}^2 R_{cp} + \mu \frac{S_B}{S_A} \omega_B^2 R_{Бcp}) f_p \sin \alpha + \mu \frac{S_B}{S_A} \omega_B^2 R_{Бcp} f \cos \beta_{II}. \quad (2.46)$$

Рассмотрим влияние шага расстановки пластин барабана на траекторию движения зернового материала в активном слое, выраженную углом  $\alpha$  (см. рисунок 2.10).

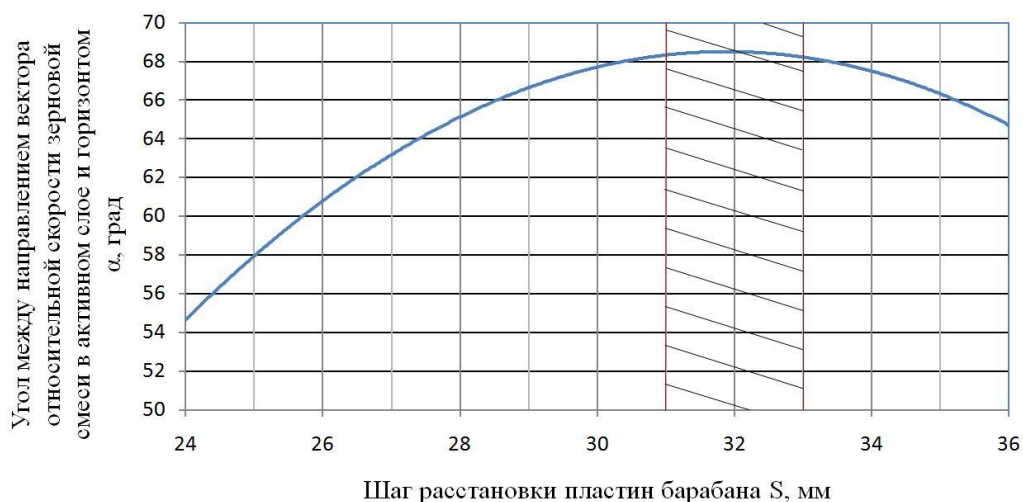


Рисунок 2.10 – Изменение угла  $\alpha$  в зависимости от шага расстановки пластин барабана

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

## 2.6 Уравнение процесса сепарации на подсевном цилиндрическом решете центробежно-решётного сепаратора

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

Поэтому интенсивность процесса сепарации на решете будет зависеть от интенсивности первой стадии. Сегрегация будет протекать интенсивнее с увеличением относительного скольжения элементарных слоев в зерновом материале, если эти скорости не превышают критических значений. Соответственно вторая фаза будет протекать тем интенсивнее, чем выше

скорость скольжения контактирующего с решетом элементарного слоя относительно решета, при условии, что эта скорость не превышает критическую скорость, при превышении которой просеивание частиц через отверстие прекращается.

Перед построением математической модели примем следующие допущения:

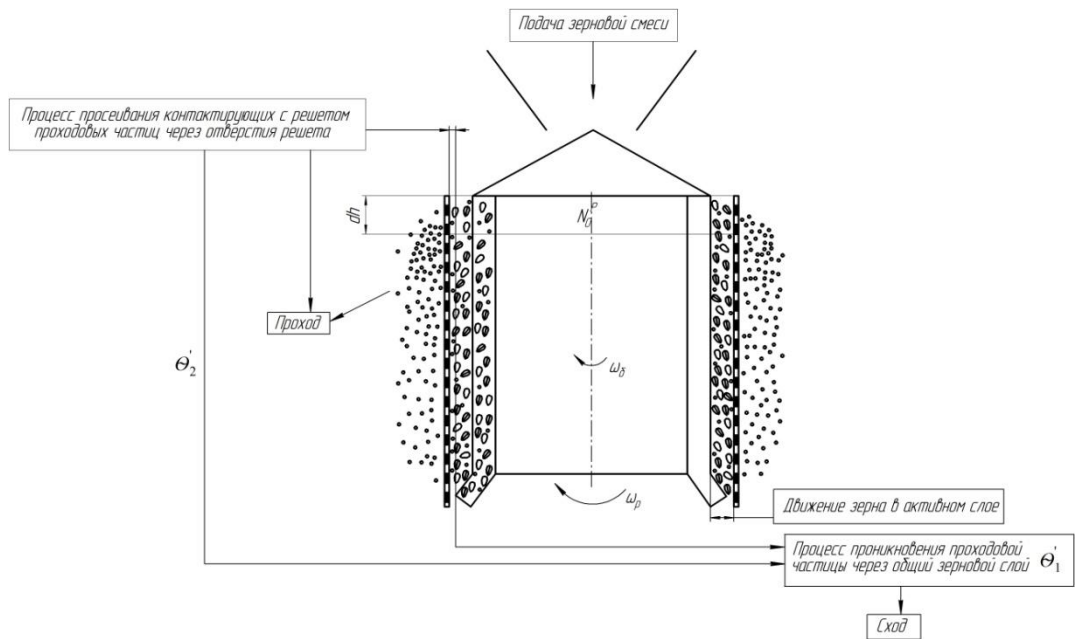
- концентрация зерен проходовой фракции постоянна по толщине общего кольцевого зернового слоя;
- осевая скорость перемещения зернового материала и толщина кольцевого слоя постоянна по высоте цилиндрического решета;
- скорости скольжения зерна по решету не превышают критическую скорость скольжения.

Исходя из изложенного, математическая модель процесса сепарации должна строиться исходя из наличия двух стадий. Схема для обоснования модели двухступенчатого процесса сепарации представлена на рисунке 2.11.

Двухступенчатый процесс сепарации аналогичен процессу в химической технологии для каскада реакторов. Поэтому математический аппарат при построении математической модели процесса сепарации будет аналогичен употребляемому в химической технологии для каскада реакторов.

Выделим кольцевой слой зернового материала высотой  $dh$  в начале решета. Содержание проходových частиц в этом объеме обозначим  $N_0^P$ . Проследим за временем прохода через толщу слоя и временем просеивания через решето этих частиц.

Рассмотрим время пребывания проходовой частицы в выделенном элементе всего зернового слоя, которое будет включать время прохождения через толщу слоя и время просеивания.



$\theta_1'$  – среднее время продвижения проходовой частицы по толщине общего кольцевого зернового слоя;  $\theta_2'$  – среднее время пребывания проходовой частицы на решетке от момента её поступления на поверхность решета до момента просеивания

Рисунок 2.11 – Схема для обоснования модели двухступенчатого процесса сепарации

Вероятность того, что время пребывания проходовой 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 проходовых частиц:

$$P_k(t \leq t_{\Pi} < t + \Delta t) = \frac{N_k(t, \Delta t)}{N_0^P}. \quad (2.47)$$

По физической сущности эта вероятность есть не что иное, как полнота выделения  $\varepsilon$  проходовых частиц.

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

$$\Phi_k(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Pk(t \leq t_{\Pi} < t + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (2.48)$$

Если учесть, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} [N_k(t, \Delta t) / \Delta t] = H_k(t), \quad (2.49)$$

где  $H_k(t)$  – скорость вывода частиц из  $k$ -ой ступени, то из (2.47) и (2.49) получаем:

$$\Phi_k(t) = \frac{H_k(t)}{N_0^P}. \quad (2.50)$$

Таким образом, плотность распределения вероятностей  $\Phi_k(t)$  может быть вычислена как отношение скорости вывода проходových частиц из  $k$ -ой ступени к исходному числу таких частиц.

Вероятность  $P_k(t \leq t_{II} < t + dt)$  пребывания проходовой частицы может быть записана так:

$$P_k(t \leq t_{II} < t + dt) \approx dP_k(t) = \Phi_k(t)dt, \quad (2.51)$$

где  $\Phi_k(t)$  – плотность распределения вероятности пребывания в  $k$  – ступенях.

Поскольку процесс сепарации протекает стационарно, то скорости ввода частиц в ступень и вывода их из ступени во времени постоянны и одинаковы.

Составим уравнение материального баланса для  $i$ -го количества ступеней. Число частиц, поступивших в  $i$ -ю ступень за время  $dt$ , равно  $H_{i-1}(t)dt$ ; число частиц, покидающих  $i$ -ю ступень, равно  $H_i(t)dt$ . Концентрация частиц на выходе из  $i$ -й ступени равна отношению скорости вывода частиц  $H_i(t)$  к объемной скорости потока  $\omega$  проходových частиц. Тогда число проходových частиц в ступени, равное произведению концентрации на объем слоя  $V_i$ , составляет  $H_i(t)V_i / \omega$ , и уравнение материального баланса для  $i$ -й ступени имеет вид:

$$\frac{V_i}{\omega} dH_i(t) = H_{i-1}(t)dt - H_i(t)dt. \quad (2.52)$$

Вводя обозначение:

$$\frac{V_i}{\omega} = \theta_i, \quad (2.53)$$

получим:

$$\theta_i \frac{dH_i}{dt} = H_{i-1}(t) - H_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2.54)$$

где  $n$  – ступеней.

Поскольку концентрацию проходových частиц по толщине слоя мы приняли постоянной и заданной величиной, то скорость ввода  $H_0$ , проходových частиц, будет также постоянной и заданной величиной.

Решение полученной системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка удобнее всего получить, используя операционное исчисление.

Примем, что в нулевой момент времени в зерновых слоях не содержится проходových частиц (они заполнены сходовой фракцией), т.е. при  $t = 0$ ,  $H_1(t) = H_2(t) = \dots H_n(t) = 0$ . Скорость ввода частиц в первый слой  $H_0(t)$  будем считать произвольной, но неизвестной функцией времени.

Воспользуемся операционным исчислением. Переходя от функции  $H_i(t)$  к их изображениям по Лапласу, получим [15]:

$$\theta_i p \bar{H}_i(p) = \bar{H}_{i-1}(p) - \bar{H}_i(p) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2.55)$$

где  $\bar{H}_i(p)$  – изображения по Лапласу функций  $H_i(t)$

Систему (2.59) можно переписать так:

$$\bar{H}_i(p)(1 + \theta_i p) = \bar{H}_{i-1}(p) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.56)$$

Перемножив  $k$  уравнений системы, получим:

$$\frac{\bar{H}_k(p)}{\bar{H}_0} = \frac{1}{\prod_{i=1}^k (1 + \theta_i p)}. \quad (2.57)$$

Как отмечалось выше, поступление проходových частиц в выделенном объеме высотой  $\Delta h$  равносильно импульсной загрузке, поэтому объемную скорость  $H_0(t)$  можно выразить так:  $H_0(t) = N_0^P \delta(t)$ , где  $\delta(t)$  – известная дельта-функция, изображение по Лапласу которой равно 1.

Поэтому  $H_0(p) = N_0^P$ , откуда из (2.57) с учетом (2.49) получаем:

$$\bar{\Phi}_k(p) = \frac{1}{\prod_{i=1}^k (1 + \theta_i p)}. \quad (2.58)$$

Для ступеней различного объема, когда среди значений  $\theta_i$  нет одинаковых, применение обратного преобразования Лапласа к уравнению (2.58) дает [15]:

$$\Phi_k(t) = \sum_{i=1}^k \frac{\theta_i^{k-2} e^{-\frac{t}{\theta_i}}}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k (\theta_i - \theta_j)} \quad (i = 1, 2, \dots, k). \quad (2.59)$$

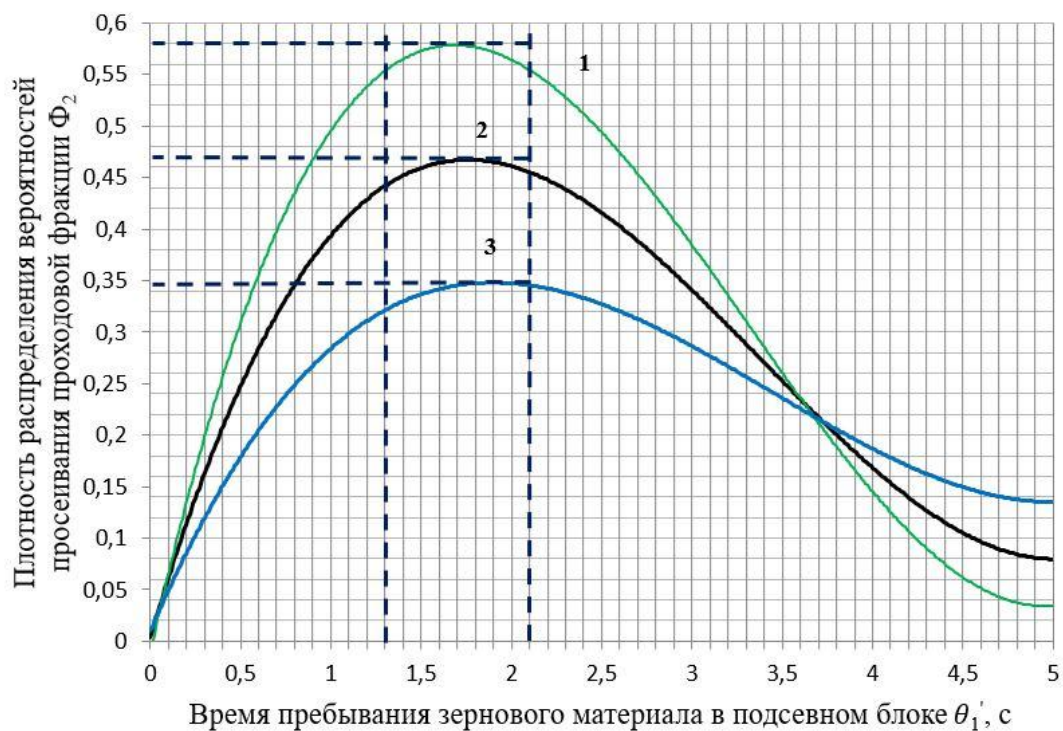
Чтобы сделать структуру уравнения (2.59) более ясной, выпишем в развернутом виде выражение плотности распределения вероятностей времени пребывания проходовой частицы в двухступенчатой модели процесса сепарации (при  $k = 2$ ):

$$\Phi_2(t) = \frac{e^{-\frac{t}{\theta_1}}}{\theta_1' - \theta_2'} + \frac{e^{-\frac{t}{\theta_2}}}{\theta_2' - \theta_1'} = \frac{e^{-\frac{t}{\theta_1} - \frac{t}{\theta_2}}}{\theta_1' - \theta_2'}. \quad (2.60)$$

Влияние параметров  $\theta_1'$  и  $\theta_2'$  на изменение плотности распределения вероятностей  $\Phi_2$  представлено на рисунках 2.13 и 2.14.

Так как время пребывания  $t_{\Pi} > 0$ , то нижний предел интегрирования можно принять равным нулю. Таким образом, интересующая нас вероятность равна:

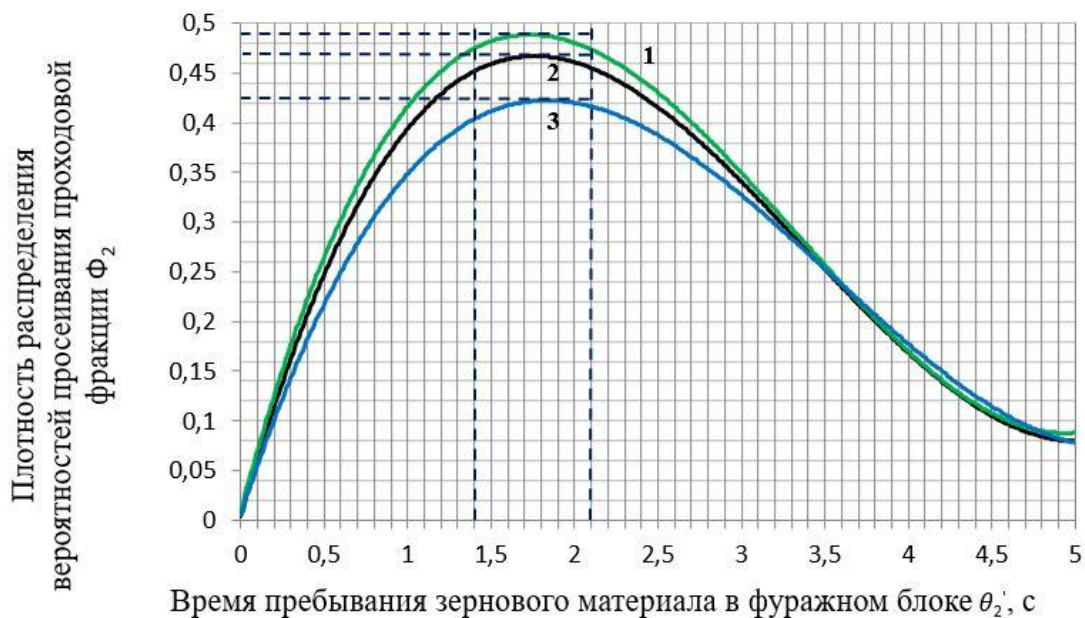
$$F_k(t) = P(0 < t_{\Pi} < t) = \int_0^t \Phi_k(t) dt. \quad (2.61)$$



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 2.13 – Плотность распределения вероятностей просеивания проходовой фракции в зависимости от среднего времени  $\theta_1'$

Максимальная плотность распределения вероятностей просеивания проходовой фракции  $\Phi_2$  наблюдается при диапазоне времени пребывания зернового материала в подсевном блоке  $\theta'_1$  от 1,3 – 2,1 с.



1 –  $\theta'_1 = 1,927$  и  $\theta'_2 = 0,051$ ; 2 –  $\theta'_1 = 1,927$  и  $\theta'_2 = 0,074$ ; 3 –  $\theta'_1 = 1,927$  и  $\theta'_2 = 0,113$

Рисунок 2.14 – Плотность распределения вероятностей просеивания проходовой фракции в зависимости от времени пребывания  $\theta'_2$  при выделении фуража

При выделении фуража, максимальные значения плотности распределения вероятностей просеивания проходовой фракции  $\Phi_2$  наблюдаются при диапазоне времени пребывания зернового материала в фуражном блоке  $\theta'_2$  от 1,4 – 2,1 с.

Интегрируя (2.61) с учетом выражения (2.59) получим:

$$F_2(t) = 1 - \frac{\theta'_1 e^{-\frac{t}{\theta'_1}} - \theta'_2 e^{-\frac{t}{\theta'_2}}}{\theta'_1 - \theta'_2}. \quad (2.62)$$

Функция  $F_2(t)$  в выражении (2.62) по физическому смыслу, как уже отмечалось выше, соответствует полноте выделения  $\varepsilon$  проходовой фракции через решето.



Исходя из этого, полнота выделения через решето может быть выражена формулой:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\theta'_1 e^{-\frac{t}{\theta'_1}} - \theta'_2 e^{-\frac{t}{\theta'_2}}}{\theta'_1 - \theta'_2}. \quad (2.63)$$

Поскольку  $\theta'_1$  и  $\theta'_2$  определяются экспериментально, а уравнение (2.63) не удается разрешить при известных, но различных значениях  $\varepsilon$  (т.е. решить систему относительно двух неизвестных), то величину  $\theta'_2$  определяем теоретически.

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

$$P_n = p_0 dl = \frac{1}{l_0} dl, \quad (2.64)$$

где  $p_0 = \frac{1}{l_0}$  – коэффициент пропорциональности.

Найдём величину среднего пути скольжения зерна (проходовой мелкой фракции) по решету 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 решета развёрнут на плоскость и повернут в плоскости чертежа на угол  $90^\circ - \alpha$ ) (см. рисунок 2.12).

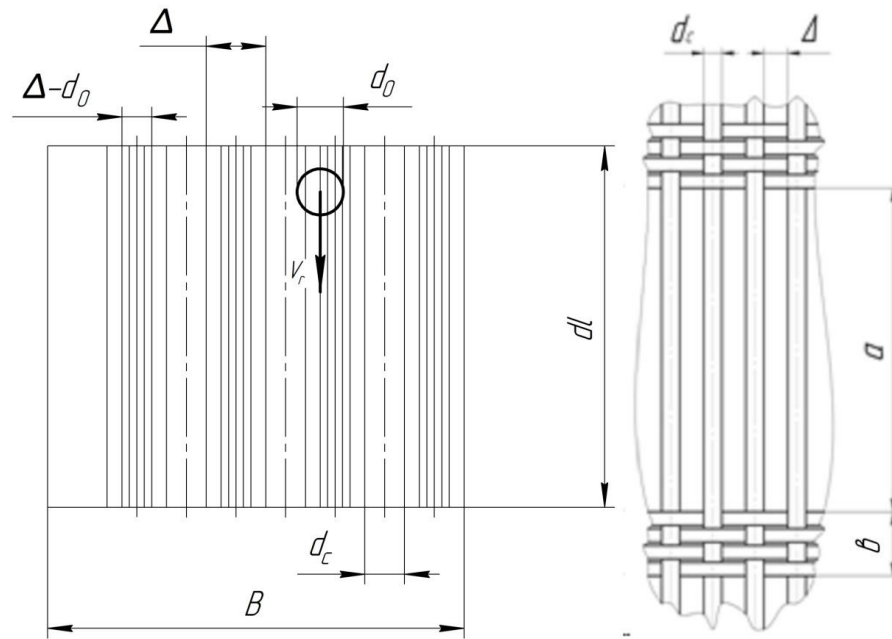


Рисунок 2.12 – Схема к определению вероятности просеивания проходовой частицы на элементарном пути  $dl$  скольжения и фрагмент рабочей поверхности решета

На выделенном участке решета будет в среднем расположено число отверстий:

$$n_{отв} = \frac{\mu_0}{a\Delta} Bdl, \quad (2.65)$$

где  $\mu_0$  – относительная живая площадь решета;

$a$  – длина отверстий решета;

$\Delta$  – ширина отверстия.

Среднее время пребывания частиц проходовой фракции на решете определяется:

$$\theta'_2 = \frac{l_0}{V_r} = \frac{l_0 \sin \alpha}{V_z}. \quad (2.66)$$

Таким образом, получим:

$$\theta'_2 = \frac{H_{2cp}}{V_{zcp}}, \quad (2.67)$$

где  $H_{2cp}$  – средняя высота от момента попадания частицы на решето до момента просеивания.

Живое сечение подсевного решета, представленного на рисунке 2.12 с шириной отверстия  $\Delta = 2,0$  мм, диаметром продольной перемычки  $d = 0,75\Delta$  длиной  $a = 24$  мм равно  $\mu_0 = 0,439$ .

Рассмотрим объем зернового материала, который находится на подсевном решете при установившемся режиме работы, с учетом доли заполнения пространства между пластинами барабана при действии на слой центробежной силы.

Площадь поперечного разреза сепаратора, занятого зерном:

$$S = S_A + S_B, \quad (2.68)$$

где  $S_A$  – площадь активного слоя;

$S_B$  – площадь, занятая зерном между пластинами барабана.

$$S_B = [\pi R_B^2 - \pi R_{огр}^2 - n \frac{(R_B - R_{огр})}{\cos \beta_1} t_{пл}] \cdot K_{зан}, \quad (2.69)$$

где  $K_{зан}$  – коэффициент заполнения площади сечения кольцевого слоя, зависящий от параметров, режимов работы сепаратора и физико-механических свойств зернового материала;

$R$  – радиус решета;

$R_{огр}$  – радиус ограничивающего цилиндра;

$R_B$  – радиус пластинчатого барабана;

$n$  – количество пластин пластинчатого барабана;

$t_{пл}$  – толщина пластинчатого барабана;

$\beta_1$  – угол наклона пластин пластинчатого барабана к радиусу.

Коэффициент заполнения определяется по выражению:

$$K_{зан} = \frac{S_B^3}{S_B^6}, \quad (2.70)$$

Найдем объем:

$$V = S \cdot H, \quad (2.71)$$

где  $H$  – высота цилиндрического решета.

Согласно исследованиям Платонова П.Н. наличие даже незначительных по величине необратимых смещений в зерновом материале приводит к образованию в плоскостях сдвига минимальной для данных

условий плотности укладки частиц, называемой «критической» плотностью [76]. Для пшеницы «критическая» плотность  $\rho = 685 \text{ кг/м}^3$ .

Массу зерна кольцевого слоя определим выражением:

$$m = V \cdot \rho. \quad (2.72)$$

Определим среднюю осевую скорость движения зернового материала:

$$V_{zcp} = \frac{H}{t}. \quad (2.73)$$

Зная среднюю осевую скорость движения зернового материала и угол  $\alpha$  между вектором относительной скорости  $V_r$  и горизонтом, определим относительную скорость скольжения контактирующего с решетом слоя:

$$V_r = \frac{V_z}{\sin \alpha}. \quad (2.74)$$

Просеивание проходовой фракции выполнимо в ситуации, когда относительная скорость скольжения зернового материала не превысит критическую скорость  $V_r^{kp}$ . Критическую скорость скольжения зернового материала определим по выражению, предложенному Тарасовым Б.Т. [117]:

$$V_r^{kp} = \left( \Delta - \frac{b_1}{2} \right) \sqrt{\frac{g}{b_1}} \cdot \frac{\sqrt{K_p}}{1 + \left( \Delta - \frac{b_1}{2} \right) \sqrt{\frac{1}{R_p \cdot b_1} \cos \alpha}}, \quad (2.75)$$

где  $b_1$  – толщина частиц проходовой фракции;

$K_p$  – кинематический показатель режима работы решета;

$R_p$  – радиус решета.

При  $\Delta = 2,0 \text{ мм}$ ,  $b_1 = 1,5 \text{ мм}$ ,  $K_p = 3,69$ ,  $R_p = 0,150 \text{ м}$ ,  $\alpha = 68,4^\circ$ , тогда

$$V_r^{kp} = \left( 2 - \frac{1,5}{2} \right) \sqrt{\frac{9,81}{1,5}} \cdot \frac{\sqrt{3,69}}{1 + \left( 2,0 - \frac{1,5}{2} \right) \sqrt{\frac{1}{0,150 \cdot 1,5} \cos 68,4^\circ}} = 2,36 \text{ м/с}.$$

Исходя из выражения (2.67) вычислим среднее время  $\theta'_1$ , согласно уравнению (2.63). Для удобства в записи выражения введем обозначения:

$H_{2cp} = \lambda_2$ ;  $H_{1cp} = \lambda_1$ , тогда уравнение (2.63) можно выразить:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\lambda_1 \cdot e^{-\frac{H}{\lambda_1}} - \lambda_2 \cdot e^{-\frac{H}{\lambda_2}}}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (2.76)$$

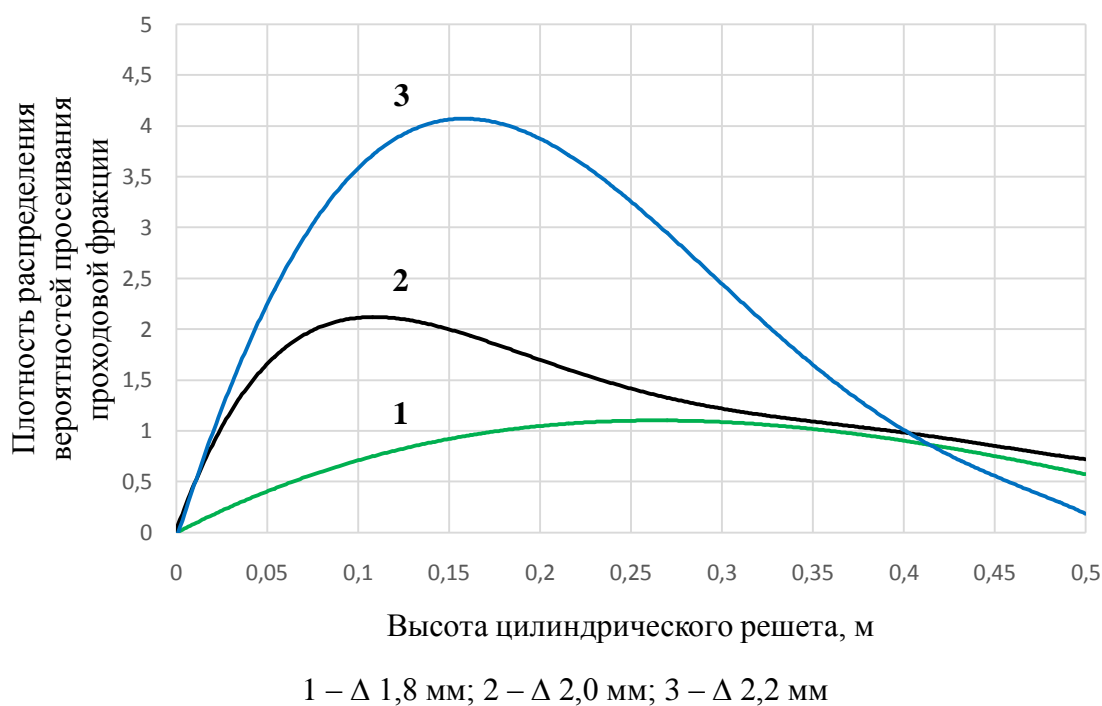


Рисунок 2.13 – Плотность распределения вероятностей просеивания проходовой фракции в зависимости от высоты цилиндрического решета

Для решения уравнения (2.63) с помощью графического способа введем функции  $Y_1$  и  $Y_2$ , которые будут иметь соответствующие значения:

$$Y_1 = (1 - \varepsilon) \cdot (\theta'_1 - \theta'_2). \quad (2.77)$$

$$Y_2 = \theta'_1 e^{-\frac{t}{\theta_1}} - \theta'_2 e^{-\frac{t}{\theta_2}}. \quad (2.78)$$

Решением  $\theta'_2$  будет являться точка пересечения графиков функций  $Y_1$  и  $Y_2$ .

При известных значениях  $\theta'_1$  и  $\theta'_2$ , применяя выражение (2.63) рассмотрим изменение эффективности выделения проходových частиц в зависимости от среднего времени пребывания зернового материала в подсевном блоке для решет с различной шириной отверстий (см. рисунок 2.15).

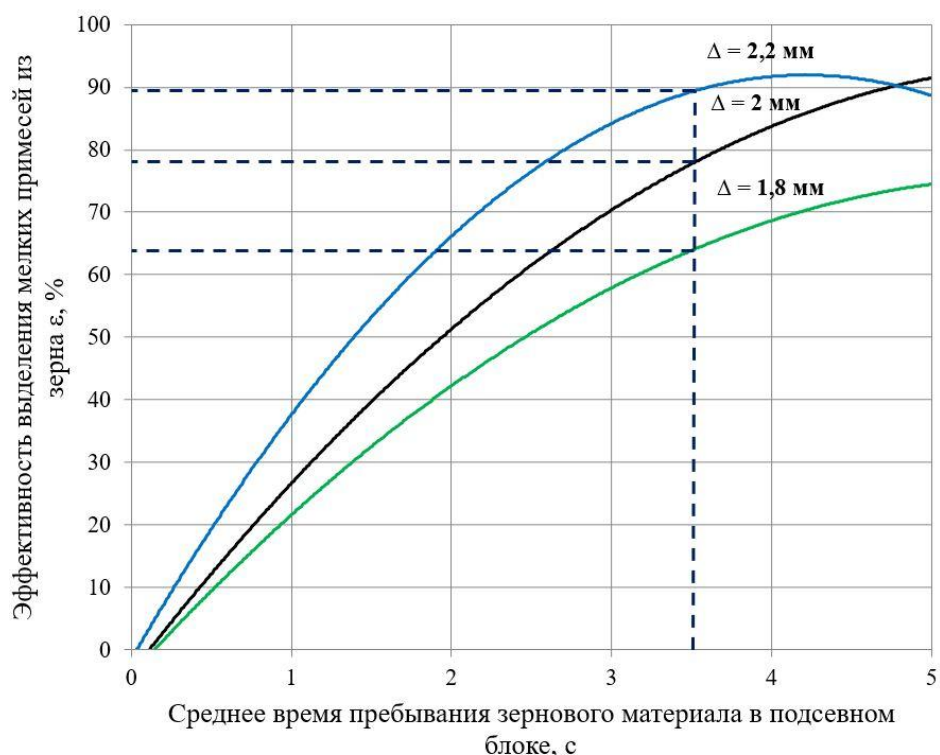


Рисунок 2.15 – Изменение полноты выделения проходových частиц в зависимости от среднего времени пребывания зернового материала в подсевном блоке

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

При среднем времени пребывания проходových частиц, равным 3,5 с для решета с шириной отверстия 2,0 мм эффективность сепарирования  $\epsilon$  составляет 79%.

### Выводы по главе

1. Интенсифицировать процесс очистки зерна от мелких примесей в центробежно-решетном сепараторе возможно путем его предварительной подготовки перед поступлением в сепаратор с выделением грубых примесей и в самом сепараторе - с применением расслоения.

2. Осуществлять предварительную подготовку зернового материала до подхода его к цилиндрической сепарирующей поверхности подсевного решета целесообразно применением конической обечайки со ступенчатой поверхностью с углом раскрытия конуса  $\theta = 18^\circ$ , длиной ступенек  $l_{cm} = 20$  мм, высотой  $h_{cm} = 5$  мм.

3. Для обеспечения работоспособности сепаратора необходимо, чтобы коническая обечайка вращалась со скоростью, равной скорости вращения цилиндрического решета. Приемлемые значения линейной скорости решета радиусом  $R = 0,3$  м составляют  $V_p = 3,0 \dots 3,5$  м/с.

4. Анализ уравнений движения зерна в активном слое показывает, что высокая эффективность выделения мелких примесей достигается увеличением диспергации зернового материала при шаге расстановки пластин барабана  $S = 31 \dots 33$  мм и максимальном угле  $\alpha$ .

5. Полученные уравнения сепарации показывают, что цилиндрическое подсевное решето пригодно для работы при высоких удельных нагрузках, а на полноту выделения мелких примесей оказывает влияние время пребывания проходových частиц  $\theta$  не менее  $3 \dots 4$  с.

6. Основой для определения параметров центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом могут служить полученные в данной главе уравнения.

### **Глава 3 Программа и методика экспериментальных исследований**

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

#### **3.1 Программа экспериментальных исследований**

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

- модернизация лабораторной установки для изучения процесса сепарации (изготовление цилиндрических подсевных решет и установка их);
- изучение влияния ширины отверстия между круглыми перемычками подсевного решета на эффективность очистки зерна от мелких примесей;
- опыты по влиянию размеров и формы отверстий решет на эффективность сепарирования;
- изучение влияние шага расстановки пластин барабана на эффективность очистки зерна от мелких примесей;
- определение рациональных значений угловой скорости вращения барабана и решета;
- определение оптимальных параметров удельной подачи зернового материала на полноту выделения мелких примесей;
- определение просеваемости по высоте цилиндрического решета;
- 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.

### **3.2 Описание технологической схемы центробежно-решетного сепаратора**

Опираясь на исследования, проведенные Тарасовым Б.Т. [117], Стрикуновым Н.И. [100], Лекановым С.В. [54], Хижниковым А.А. [131], Щербаковым С.С. [150] был усовершенствован центробежно-решетный сепаратор с внутренним пластинчатым барабаном. Для очистки зерна сепаратор имеет систему воздушной очистки (выделение легких примесей), два блока решет: подсевное 15 (выделение мелких примесей) и зерновое 22 (очистка от длинных и крупных примесей) [72].

Воздушный центробежно-решетный сепаратор, представленный на рисунке 3.1, состоит из неподвижной загрузочной горловины 25, конического разбрасывателя зерна 12, с коническим делительным решетом 10 внутри него, имеющим роликовую опору 30, два блока решет 15 и 22, и установленный внутри блоков пластинчатый барабан 31.

Центробежно-решетный сепаратор содержит загрузочную горловину 25, привод 1 и цилиндрический корпус 28, в котором на приводном валу 18 размещены: коническая обечайка со ступенчатой поверхностью 29, блок цилиндрических решет 15 и 22, с щетками 8 и 17, коническое делительное решето 10, пластинчатый барабан 31 с пластинами подсевной 14 и зерновой 6 секции. Над основным цилиндрическим корпусом 28, между загрузочной горловиной 25 и конической обечайкой 29, размещен дополнительный цилиндрический корпус 33 аспирационной системы с заборными окнами 11, диаметром равным диаметру основного цилиндрического корпуса. Втулка

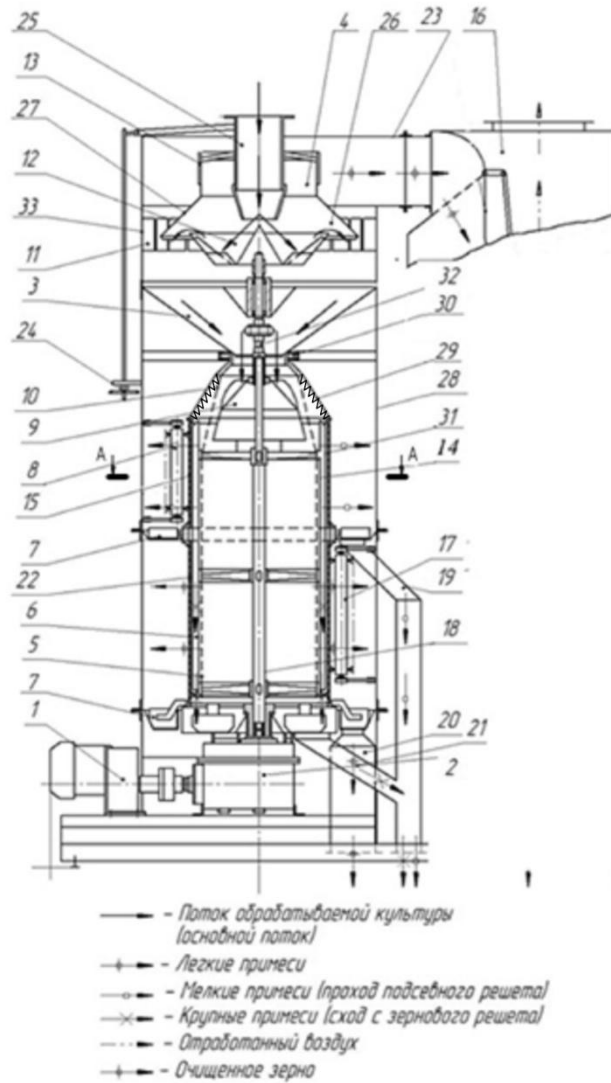
32, соединяет коническую обечайку 29 и конический разбрасыватель зерна 12. Между коническим сборником 3 и отражателем 27 установлен кольцевой пневмосепарирующий канал 26.

Над коническим отражателем 27, на его цилиндрической части 4 установлен регулировочный стакан 13 скорости воздушного потока, а над коническим отражателем 27 установлен патрубок 23, для соединения его с осадочной камерой легких примесей 16.

Привод оборудования корпуса аспирационной системы осуществляют от конической обечайки 29, а регулировочный стакан выполнен с возможностью перемещения вдоль вертикальной оси конического отражателя, при этом высота цилиндрического регулировочного стакана меньше цилиндрической части конического отражателя, на котором он установлен.

Привод конического разбрасывателя 12 осуществляется от конической обечайки 29 посредством втулки 32.

Решетный блок состоит из конической обечайки со ступенчатой поверхностью 29, имеющей роликовую опору 30, питателя 9, конического делительного решета 10, цилиндрического колосового решета 5, подсевного решета 15, верхним основанием жестко прикрепленного к конической обечайке 29, зернового решета 22 и привода 1 и 2. Цилиндрические решета имеют цилиндрические очистительные щетки 8 и 17. Пластинчатый барабан, жестко связанный с приводным валом, содержит пластины подсевной 14 и зерновой секций 6. Сепаратор также содержит корпус и патрубки для мелких 19, крупных примесей 21 и очищенного зерна 20.



1 – Электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – конический сборник; 4 – цилиндрическая часть; 5 – цилиндрическое колосовое решето; 6 – пластины барабана; 7 – скребок; 8 – цилиндрическая щетка подсеивного решета; 9 – питатель; 10 – коническое делительное решето; 11 – заборные окна; 12 – конический разбрасыватель зерна; 13 – цилиндрический стакан; 14 – пластины барабана подсеивной секции; 15 – блок цилиндрического подсеивного решета; 16 осадочная камера; 17 – цилиндрическая щетка зернового решета; 18 – приводной вал; 19 – патрубок мелких примесей; 20 – патрубок очищенного зерна; 21 – патрубок крупных примесей; 22 – блок цилиндрического зернового решета; 23 – патрубок; 24 – механизм регулировки цилиндрического стакана; 25 – загрузочная горловина; 26 – кольцевой пневмосепарирующий канал; 27 – отражатель; 28 – основной цилиндрический корпус; 29 – коническая обечайка со ступенчатой поверхностью; 30 – роликовая опора; 31 – пластинчатый барабан; 32 – втулка; 33 – дополнительный цилиндрический корпус.

Рисунок 3.1 – Воздушный центробежно-решетный сепаратор

На рисунке 3.2 показан поперечный разрез подсевного решётного блока с указанием основных параметров.

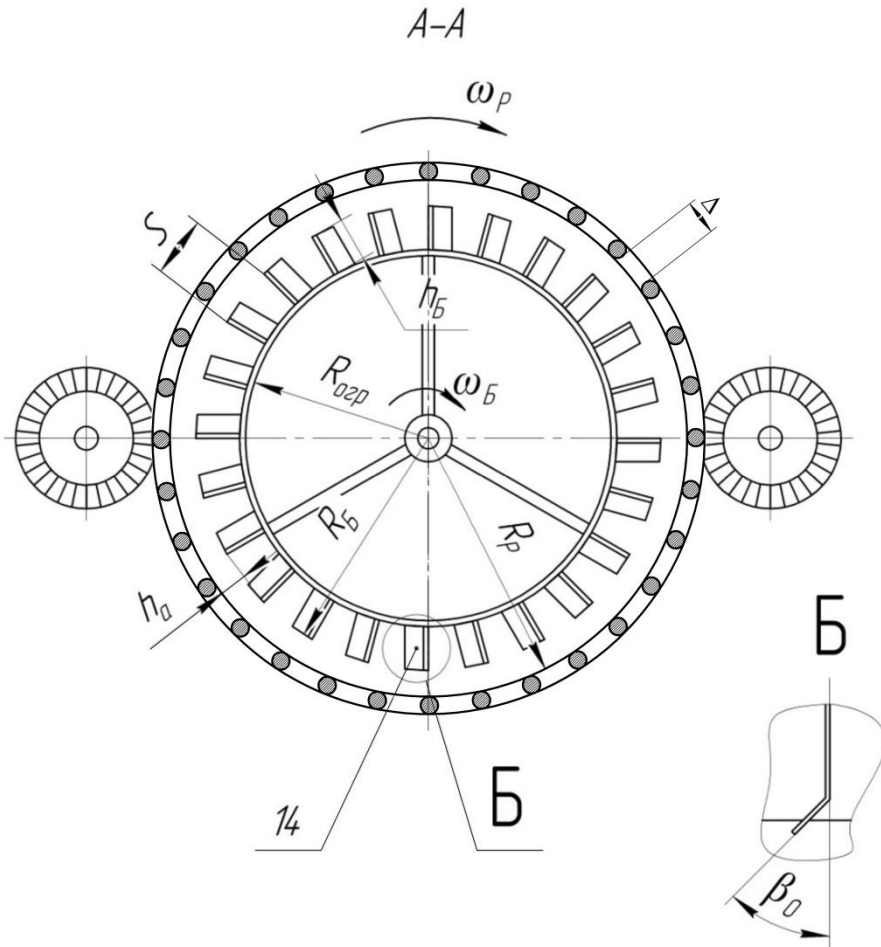


Рисунок 3.2 – Поперечный разрез подсевного решётного блока

Работает центробежно-решетный сепаратор следующим образом. Зерновой материал поступает в загрузочную горловину 25 и подается на конический разбрасыватель 12. Лопатки сообщают зерновому материалу угловую скорость, равную угловой скорости разбрасывателя. Далее зерновой материал поступает в кольцевой пневмосепарирующий канал 26, где происходит выделение легких примесей, которые поступают через патрубок 23 в осадочную камеру 16 и через выпускной клапан выводятся из машины. Регулировка скорости воздушного потока в пневмосепарирующем канале происходит за счет регулировочной заслонки, установленной в осадочной камере 16, а тонкая регулировка осуществляется регулировочным цилиндрическим стаканом 13 посредством механизма 24. После воздушной

сепарации, предварительно очищенное зерно конусом-сборником 3 подается на питатель 9, коническое делительное решето 10 и далее на решетный блок, где происходит очистка от мелких примесей на подсевном решете 15, от длинных примесей на зерновом решете 22, от крупных примесей на цилиндрическом колосовом решете 5, которые поступают в соответствующие приемники и скребками 7 выводятся из машины посредством патрубков 19 и 21. Очищенное зерно, прошедшее через отверстия зернового решета 22 поступает в приемник очищенного зерна и скребками через патрубок 20 выводится из машины. Решета и барабан вращаются в одну сторону, но с разными скоростями ( $\frac{\omega_B}{\omega_P} = 0,57$ ) благодаря приводу, при этом угловая скорость конического разбрасывателя 12 равна угловой скорости решет 15 и 22 [72]. Очистка отверстий решет 15 и 22 от застрявших зерен производится цилиндрическими щетками 8 и 17.

### 3.3 Описание экспериментальной установки

Для проведения достоверных экспериментальных исследований необходима установка, отвечающая следующим требованиям:

- 1) простота конструкции (возможность быстрой разборки и сборки установки, компактность, возможность доступа ко всем элементам сепаратора);
- 2) возможность регулировки (конструктивных, режимных и технологических) параметров в заданных пределах;
- 3) устойчивость режимов работы и стабильность параметров, влияющих на процесс сепарации;
- 4) возможность измерения выходных параметров при изменении конструктивно-режимных и технологических параметров одновременно.

Структурно-функциональная схема сепаратора представлена на рисунке 3.3.

Экспериментальная установка состоит из 3 автономных элементов (см. рисунок 3.4):

1. Загрузочного бункера объемом 0,1 м<sup>3</sup> с дозирующим устройством, способным осуществлять заданную подачу зерна посредством тарированной шиберной заслонки.

2. Рамы, на которой закреплены рабочие органы цилиндрического решета и пластинчатого барабана, и привода, обеспечивающего их вращение.

3. Откидных лотков, позволяющих отделять материал в период работы сепаратора при установившемся и неустановившемся режимах работы, а также емкостей, в которые поступает очищенное зерно и мелкие примеси.

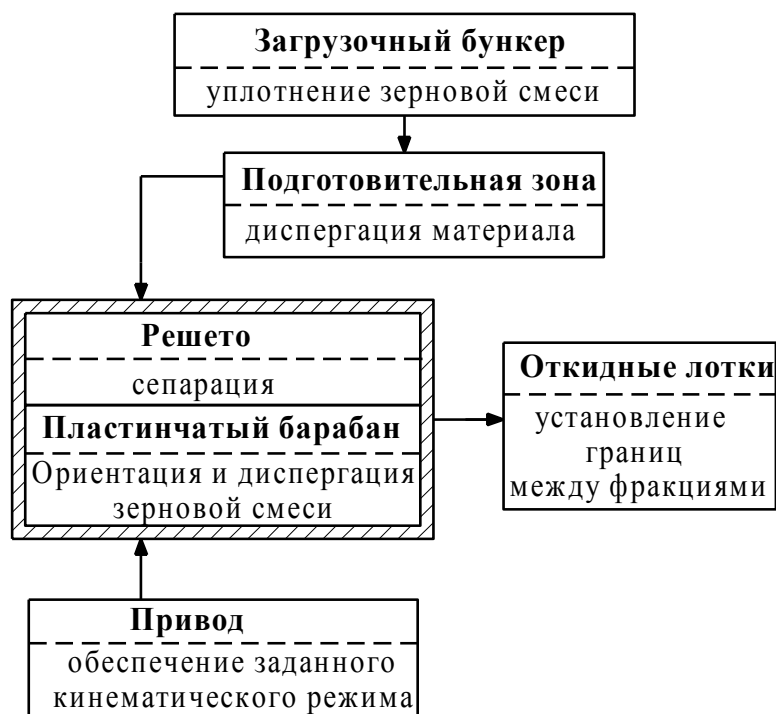
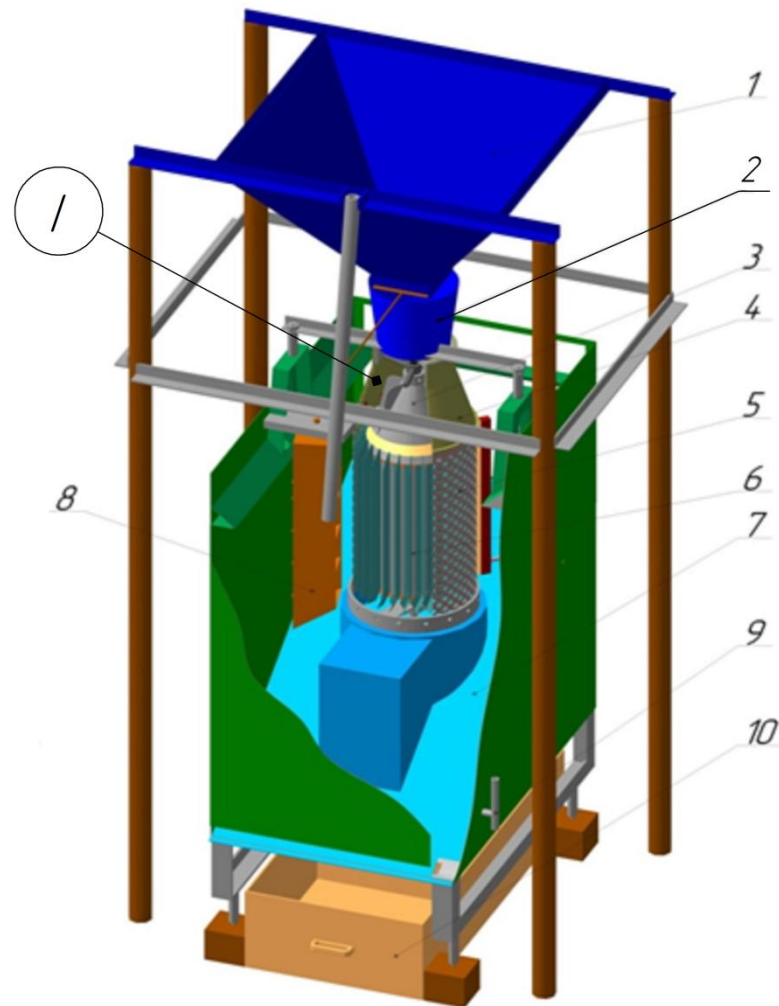


Рисунок 3.3 – Структурно-функциональная схема сепаратора

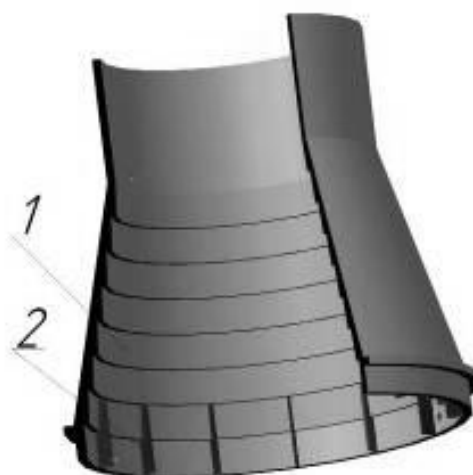
Вращение решета и внутреннего пластинчатого барабана обеспечивает двухступенчатый редуктор, привод к которому осуществляется от двигателя мощностью 0,8 кВт через клиноременную передачу, частота вращения двигателя изменялась с помощью частотного преобразователя. Решето и барабан вращаются в одну сторону, но с разными угловыми скоростями,

причем угловая скорость решета в 0,57 раза больше, чем барабана. Это соотношение угловых скоростей выдерживалось благодаря конструкции редуктора. Данное соотношение выбрано, исходя из ранее проведенных исследований, и при проведении всех опытов оно не изменялось [54,100,117,131,150].



1 – бункер, 2 – загрузочная горловина, 3 – питатель с лопастями, 4 – коническая ступенчатая обечайка, 5 – подсевное решето, 6 – пластинчатый барабан, 7 – корпус сепаратора, 8 – пробоотборник, 9 – откидной лоток, 10 – приемный бункер для раздельного сбора проходовой фракции и очищенного зерна

Рисунок 3.4 – 3D-модель лабораторной установки центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом



1 – ступени; 2 – гасители

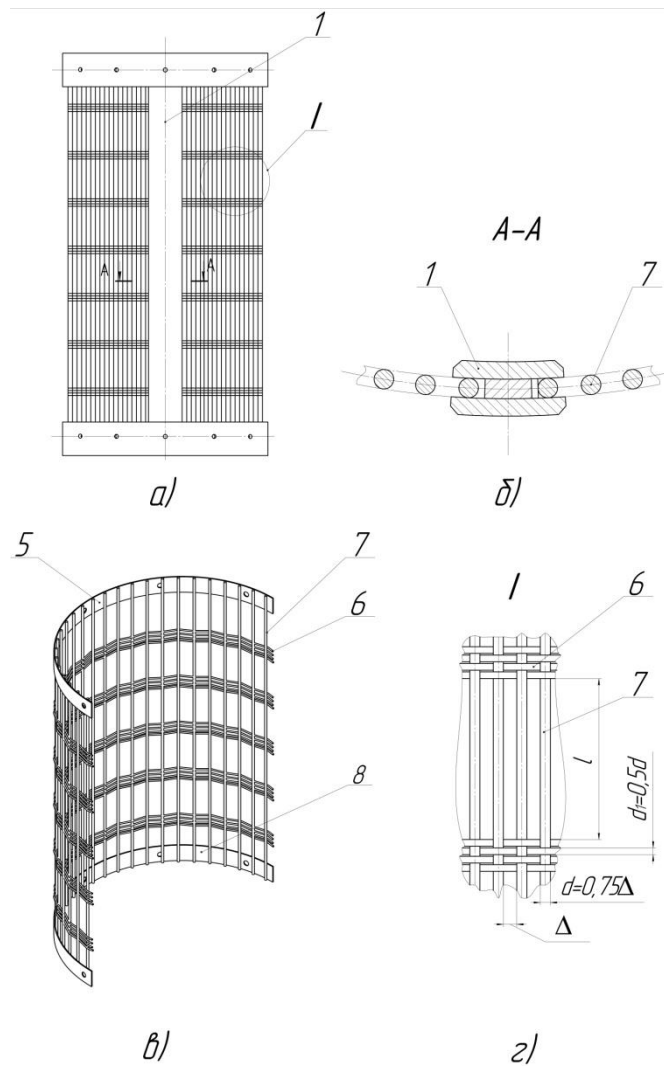
Рисунок 3.5 – Коническая ступенчатая обечайка с гасителями  
окружной скорости (позиция I рисунка 3.4)

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 (см. рисунок 3.6).

Две стойки цилиндрического каркаса 1, имеющие боковые пазы вдоль образующей по высоте цилиндра, закреплены к приводной обечайке 2 в нижней части, а в верхней части к кольцу 3, крепящемуся к конической обечайке, обеспечивающей передачу крутящего момента подсевному решету 4 посредством приводной обечайки. Помимо передачи крутящего момента, стойки, имеющие пазы вдоль образующей цилиндра, обеспечивают свободный вход образующих полуцилиндров. Этим достигается надежность работы цилиндрического решета при больших значениях давления зерна от действия центробежных сил.

Каждый из полуцилиндров снабжен верхним 5 и нижним 8 полукольцами, чем обеспечивается их жесткость, причем верхняя часть полуцилиндра крепится к цилиндрической части конической обечайки, а нижняя часть полуцилиндра к приводной обечайке.





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

Рисунок 3.6 - Цилиндрическое подсевное решето с круглыми продольными перемычками

Постоянный рабочий размер отверстий, образованных круглыми продольными перемычками 7, диаметром  $d=0,75\Delta$  ширины отверстия, обеспечивается поперечными перемычками 6, 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.

Изменение скорости вращения решета и барабана осуществлялось с помощью частотного преобразователя и контролировалось цифровым тахометром.

Загрузку сепаратора осуществляли через подготовительную зону, состоящую из следующих элементов: конической загрузочной горловины, конической ступенчатой обечайки, гасителей окружной скорости, конического лопастного питателя, имеющего шесть лопастей. Питатель вращался со скоростью решета и имел возможность осевого смещения относительно втулки (для регулирования кольцевого зазора между конической обечайкой и питателем).

Проведение экспериментальных исследований проводилось при преимущественном совместном применении цилиндрического подсевного решета с круглыми продольными перемычками и барабаном с радиальными пластинами, с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения (см. рисунок 3.7 а, б). Внутренний диаметр решета составляет 300 мм, рабочая высота цилиндрического подсевного решета с круглыми продольными перемычками 500 мм. При проведении опытов применяли подсевные решета с размерами отверстий 1,8 мм, 2,0 мм, 2,2 мм. Использовались пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, угол отгиба составляет  $20^\circ$  [150]. Длина пластин составляла 500 мм, ширина 23 мм (без крепежных полок), шаг расстановки пластин составил 32 мм. Количество пластин на барабане составило 24 штуки [150]. Внутри барабана установлен ограничительный цилиндр.



а)

б)

- а) – цилиндрическое подсевное решето с круглыми продольными перемычками;  
 б) – барабан с радиальными пластинами, с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения

Рисунок 3.7 – Составляющие подсевного блока ЦРС



Рисунок 3.8 – Общий вид лабораторной установки центробежно-решетного сепаратора

Выделение примесей из зернового материала осуществляется благодаря решетку с продолговатыми отверстиями, расположенными вдоль образующей цилиндра (см. рисунок 3.9), и пластинчатому барабану, состоящему из вала, на который установлены два диска с резьбовыми отверстиями для крепления пластин.



Рисунок 3.9 – Рабочий процесс центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом с шириной отверстия  $\Delta$  - 2,0 мм

Лабораторная установка была создана и модернизирована на кафедре «Сельскохозяйственной техники и технологий» Алтайского государственного аграрного университета, часть из основных деталей изготавливались в учебно-производственных мастерских университета и опытно-производственном цехе ООО «Алтайская СПМК «Спецэлеватормонтаж».

### 3.4 Приборы и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях

При экспериментальных исследованиях центробежно-решетного сепаратора измеряли и определяли следующие параметры:

1. Угловую скорость вращения барабана и решета –  $\omega_b$  и  $\omega_p$ .
2. Время опыта –  $t_{оп}$ .
3. Массу материала в проходе и в сходе с решета –  $m_{пр}$  и  $m_{сх}$ .
4. Влажность исходного материала  $W$ .
5. Исходную засоренность зернового материала  $C_0$ .
6. Массу проходовой фракции в секциях пробоотборника  $m_m$  – мелкие примеси (засоритель),  $m_k$  – крупные частицы (мелкое и колотое зерно).
7. Эффективность сепарирования и потери зерна в отходы –  $\epsilon$ ,  $\Pi$ .

Частота вращения решета изменялась частотным преобразователем Веспер EI-8001-112Н 3Ф 380В 1,5 кВт (см. рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 - Частотный преобразователь Веспер EI-8001-112Н 3Ф 380В 1,5 кВт

Время опыта замерялось с помощью электронного секундомера.

Взвешивание проходовой фракции, а также определение массы 1000 зерен осуществлялось на лабораторных электронных весах MW-300T (см. рисунок 3.11б) с точностью измерения 0,01 г.

Масса зернового материала взвешивалась на электронных весах МК – 15.2-A20 (см. рисунок 3.11а) с максимальной массой взвешивания 15 кг и погрешностью измерения 2 гр.

Для определения влажности зернового материала использовался влагомер He-Lite «PFEUFFER» (см. рисунок 3.11в), погрешность измерения которого варьируется в диапазоне от 5 до 20% не более 0,4 % (по паспорту 0,3%); диапазон рабочей температуры от -10° до +40° С.



а)

б)



в)

а) – весы электронные МК-15,2-A20; б) – лабораторные электронные весы MW-300T; в) – влагомер He-Lite «PFEUFFER»

Рисунок 3.11 – Приборы для проведения экспериментальных исследований

Объемная масса зернового материала определялась при помощи литровой пурки ПХ-1.

В опытах потребляемая мощность на работу сепаратора регистрировалась с помощью измерительного комплекса К-505.

Угол внутреннего трения зернового материала определялся по углу естественного откоса, который формировался способом насыпания [120]. Угол внешнего трения зернового материала по металлу определялся прибором Желиговского В.А., а угол трения по решетку определяли согласно методике предложенной Ворошиловым А.И. [17].

### **3.5 Характеристика зернового материала**

Для экспериментальных исследований использовалась пшеница яровая сорта Омская 36, урожая 2021 года, обмолоченная на лабораторной молотилке МК-1М. Очистка зерна после обмолота осуществлялась лабораторной семяочистительной машиной СМ-0,15.

Из анализа литературных источников [115,131] и собственных расчетов было определено, что максимальный размер пор при сепарации пшеницы равен 2,5 мм, поэтому было решено основные эксперименты провести в максимально сложных условиях при выделении сурепки с эффективным диаметром 1,8 мм.

В качестве засорителя зерна использовался рапс сорта «Фаворит» в диапазоне проходовой фракции 1,5...1,7 мм. Засоренность исходного зернового материала изменялась от 2 до 6 % по весу (см. таблицу 1 приложения Г).

В результате измерения влажности (см. рисунок 3.12) её показатели составили 15 %, объемная масса зерна составляла 750 г/л, масса 1000 зерен – 38,5 г, угол отгиба радиальных пластин к радиусу цилиндра составил – 20°, угол трения зерна по оцинкованному железу – 18°.



Рисунок 3.12 – Процесс измерения влажности зерна влагомером He-Lite «PFEUFFER»

Влажность зерна сохранялась постоянной в течение всего периода проведения экспериментов.

### 3.6 Методика проведения экспериментальных исследований

Порядок проведения экспериментальных исследований в каждом случае оставался одним и тем же и заключался в следующем:

1. На экспериментальной установке устанавливали требуемые значения исследуемых и фиксируемых параметров.
2. Подготавливали исходный зерновой материал массой 40 кг.
3. Под откидные лотки ставили емкости (по две на каждый из двух лотков).
4. Включали установку и открывали на необходимую величину шиберную заслонку для обеспечения заданной подачи материала.
5. При установившемся режиме, через 5-8 секунд после пуска, производили одновременный поворот откидных лотков и зерновой материал (сход и проход) поступали в отдельные контрольные емкости. При повороте лотков замыкалась электрическая цепь, и включался электронный секундомер.



6. По истечении 6-10 секунд установившегося режима работы сепаратора, чему соответствует время сепарации 50% подготовленного зернового материала, лотки ставили в первоначальное положение, при этом размыкалась электрическая цепь в электронном секундомере. Закрывали заслонку бункера, и выключали привод установки.

7. Производили взвешивание материала из каждой контрольной емкости.

8. Проходовая фракция подвергалась сепарации на плоском решете с отверстиями диаметром 2,5 мм для определения потерь зерна в отходы.

9. Все полученные данные опытов заносили в журнал наблюдений и производили обработку результатов.

10. После проведения опыта зерновой материал дополнительно очищали от мелких примесей на лабораторном решетном классификаторе фирмы «Petkus», с целью создания однородного зернового материала для проведения следующего опыта.

При выбранном доверительном интервале в 0,95 количество повторностей опытов принято равное 3. Как показали предварительные эксперименты, отклонения по повторности отличались не больше, чем на 5%. Это позволило оставить проведение опытов в трехкратной повторности.

После проведения опыта и записи полученных результатов в журнал наблюдений, далее производилось изменение регулируемого параметра и опыты продолжались.

Теоретические исследования, априорное ранжирование факторов, а также предварительные однофакторные эксперименты позволили выделить факторы, влияющие на эффективность сепарирования:

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

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

где  $C_0$  – исходная засоренность зернового материала, %;

$Q$  – подача зернового материала, т/(ч×м<sup>2</sup>);

$\beta_1$  – угол наклона пластин барабана к радиусу барабана, град.;

$\beta_0$  – угол отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, град.;

$S$  – шаг расстановки пластин барабана, мм;

$\omega_p$  – угловая скорость вращения решета,  $c^{-1}$ ;

$h_A$  – толщина активного слоя, мм;

$W$  – влажность исходного материала, %;

$\Delta$  – ширина отверстия решета.

Для оценки технологического эффекта сепарирования разработано и используется достаточно большое число методов [18, 63, 120]. Подробный анализ преимуществ и недостатков большинства методов приведен в работах [83, 140].

Оптимизация процессов сепарации относится к числу компромиссных задач, и согласно ГОСТ 33735-2016 в качестве критериев оптимизации (откликов) приняты два критерия [52].

Эффективность сепарации определяли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{P_1 a_{\text{вых}}^M}{P_0 a_{\text{исх}}^M} 100\% ; \quad (3.1)$$

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:

$$\Pi = \frac{P_1 a_{\text{вых}}^{kp}}{P_0 a_{\text{исх}}^{kp}} 100\% ; \quad (3.2)$$

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

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

Предварительные однофакторные эксперименты показали, что наиболее явно выражены линейные эффекты, поэтому отсеивающий эксперимент был реализован по плану Плакетта-Бермана (см. таблицу 3.1).

План содержит 12 опытов, при этом для получения одиннадцати факторов согласно методике к выделенным нами факторам добавились два фиктивных. Конструирование матрицы плана проводилось по методике.

Выделенные нами факторы сведены в таблицу 3.1, каждый из них предварительно обозначенный через величину  $X_i$ . На основе анализа предшествующих исследований, результатов однофакторных предварительных опытов, а также ограниченных конструктивных возможностей лабораторно-экспериментальной установки были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов при планировании эксперимента.

Благодаря ортогональности планов Плакетта-Бермана, их результаты хорошо поддаются обработке.

Обработка результатов отсеивающего эксперимента и выбор существенных факторов проводились по такой методике [68].

1. Определяем сумму значений  $\tilde{y}_i \cdot x_i^j$  по каждому  $X_i$ .

2. Проверяем эффекты отдельных факторов:

$$\hat{B}_i = \frac{\sum_{j=1}^N \tilde{y}_i \cdot x_i^j}{N/2} = \frac{\sum_{j=1}^N \tilde{y}_i \cdot x_i^j}{12/2} \quad (3.3).$$

3. Определяем значения  $\hat{a}_i; \hat{a}_i = \frac{\hat{B}_i}{2}$  (3.4)

4. Определяем число степеней свободы

$$\varphi = 4 \cdot k - l - 1 \quad (3.5)$$

5. Проверяем значимость факторов, В нашем случае фиктивные факторы  $X_{10}$  и  $X_{11}$ . Остаточная дисперсия фиктивных факторов вычислялась по формуле:

$$S_l^2 = 4 \cdot k \cdot (\widehat{a_{l+1}^2} + \widehat{a_{l+2}^2} + \dots + \widehat{a_{N+1}^2}) / (4 \cdot k - l - 1) \quad (3.6)$$

где  $\hat{a}_{l+1}$  – коэффициенты фиктивных факторов;

$l$  – число исследуемых факторов;

$N$  – число экспериментов в матрице кратно четырем

( $N = 4k; k$  – кратность матрицы).

6. Рассчитываем дисперсию оценок факторов  $\hat{a}_i$  для уровня значимости 0,1:

$$S_i^2 = \frac{S_i^2}{4 \cdot k} \quad (3.7)$$

Таблица 3.1 – Факторы и уровни их варьирования

Кодированное обозначение факторов	Условное обозначение	Наименование	Уровни варьирования	
			Нижний (-)	Верхний (+)
X <sub>1</sub>	C <sub>0</sub>	засорённость исходного зернового материала, %	2	6
X <sub>2</sub>	h <sub>A</sub>	толщина активного слоя, мм	10	12
X <sub>3</sub>	Δ	ширина отверстий подсевного решета, мм	1,8	2,2
X <sub>4</sub>	β <sub>0</sub>	угол отгиба радиальных пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, град.	15	25
X <sub>5</sub>	S	шаг расстановки пластин барабана, мм	28	36
X <sub>6</sub>	ω <sub>p</sub>	угловая скорость вращения решета, с <sup>-1</sup>	14,31	15,79
X <sub>7</sub>	Q	подача зернового материала, т/(ч×м <sup>2</sup> );	10,31	13,81
X <sub>8</sub>	W	влажность исходного зернового материала, %	10	20
X <sub>9</sub>	β <sub>1</sub>	угол наклона пластин к радиусу барабана, град.;	0	45
X <sub>10</sub>	-	фиктивный фактор	-	-
X <sub>11</sub>	-	фиктивный фактор	-	-

Значимость параметров при выявлении существенных факторов определялась с использованием  $t$  – критерия, где проверялось условие  $a_i > t_{кр} \cdot S_i$ . При значимости фактора вычисленное значение  $t$  – критерия должно быть больше табличного.

При проведении экспериментов использовалась методика рационального планирования эксперимента.

Опираясь на полученные данные [54,131,150], были определены 4 наиболее значимых параметра для проведения многофакторного эксперимента. Опыты было решено проводить на трех уровнях для каждого из показателей. Факторы и уровни их варьирования представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – 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
$\Delta$ – ширина отверстия решета, мм;	$X_2 (X_3)$	0,2	1,8	2,0	2,2
$Q$ – подача зернового материала, т/(ч×м <sup>2</sup> );	$X_3 (X_7)$	1,75	10,31	12,06	13,81
$\omega_p$ – угловая скорость решета, с <sup>-1</sup> .	$X_4 (X_6)$	0,74	14,31	15,05	15,79

Остальные факторы приняты на следующих уровнях: влажность исходного материала  $W= 15\%$ , в исследовании использовали радиальные пластины с углом  $\beta_1 = 0^\circ$ ; с углом отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 15^\circ$ , шаг расстановки пластин барабана  $S = 32$  мм. Угловая скорость решета  $\omega_p$  имеет связь с угловой скоростью барабана  $\omega_b$  угловая скорость решета в 0,57 раза больше, чем угловая скорость барабана.

### 3.7 Методика проведения многофакторного эксперимента

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

план) [68]. По плану планирования экспериментов была составлена матрица, в кодированном виде, она представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Матрица плана факторного эксперимента по эффективности очистки и потерям зерна в отходы

№ опыта	Варьируемые факторы в новом обозначении			
	$X_1 (C_0)$	$X_2 (\Delta)$	$X_3 (Q)$	$X_4 (\omega_p)$
	2	3	4	5
1	+	+	+	+
2	-	+	+	+
3	+	-	+	+
4	-	-	+	+
5	+	+	-	+
6	-	+	-	+
7	+	-	-	+
8	-	-	-	+
9	+	+	+	-
10	-	+	+	-
11	+	-	+	-
12	-	-	+	-
13	+	+	-	-
14	-	+	-	-
15	+	-	-	-
16	-	-	-	-
17	-	0	0	0
18	+	0	0	0
19	0	-	0	0
20	0	+	0	0
21	0	0	-	0
22	0	0	+	0
23	0	0	0	-
24	0	0	0	+

Число измерений в опытах равнялось 3 для принятой доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и ошибки  $\varepsilon = \pm 3\sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение результатов опытов.

Исследования процессов разделения зерна показывают, что процесс сепарации описывается (поверхность отклика) полиномом второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=j}^n b_{ij} x_i x_j ; \quad (3.8)$$

где  $b_0$  – свободный член;

$b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – расчетные коэффициенты регрессии;

$x_i, x_j$  – независимые переменные (факторы).

Проверку однородности (воспроизводимости) экспериментов в параллельных опытах проводили по критерию Кохрена, т.к. во всех точках матрицы планирования имеется одинаковое число параллельных измерений [68]:

$$G = \frac{S_{n \max}^2}{\sum_i^N S_{yn}^2} , \quad (3.9)$$

где  $S_{n \max}^2$  – максимальная дисперсия эксперимента;

$S_{yn}^2$  – дисперсия одного опыта;

$N$  – число опытов (в нашем случае  $N = 24$ );

$n$  – число повторений ( $n = 3$ ).

Вычисленное по (3.6) значение сравнивается с табличным со степенями свободы [68].

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , числе опытов  $N = 24$  и числе степеней свободы  $f = n - 1 = 3 - 1 = 2$  табличное значение критерия Кохрена равно  $G_{\text{табл}} = 0,235$  [68].

Коэффициенты регрессии  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  вычисляли при помощи прикладной программы Statistica V12 для ПЭВМ.

Определение значимости коэффициентов регрессии проводили следующим образом:

а) определяли дисперсию  $S_y^2$  в опытах [68]

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{iu} - \bar{y}_{ucp})^2}{f} , \quad (3.10)$$

где  $y_{u\text{ ср}}$  – среднее значение критерия оптимизации в  $u$ -й строке матрицы планирования по  $n$  параллельным опытам.

б) определяли дисперсию оценок коэффициентов уравнений регрессии. Согласно [68] дисперсия  $S^2$  и среднеквадратичные ошибки  $S$  оценок коэффициентов определяется по следующим формулам

$$\begin{cases} S_{b_0}^2 = c_1 \cdot S_y^2 \\ S_{b_i}^2 = c_2 \cdot S_y^2 \\ S_{b_{ij}}^2 = c_3 \cdot S_y^2 \\ S_{b_{ii}}^2 = (c_5 + c_6) \cdot S_y^2 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} S_{b_0}^2 = c_7 \cdot S_y \\ S_{b_i}^2 = c_8 \cdot S_y \\ S_{b_{ij}}^2 = c_9 \cdot S_y \\ S_{b_{ii}}^2 = c_{10} \cdot S_y \end{cases} \quad (3.12)$$

Для трех уровней варьирования  $n = 3$  значения коэффициентов  $c_i$  будут следующими [68]:  $c_1 = 0,22917$ ;  $c_2 = 0,0625$ ;  $c_3 = 0,05556$ ;  $c_4 = 0,0625$ ;

$c_5 = 0,5$ ;  $c_6 = 0,1042$ ;  $c_7 = 0,47872$ ;  $c_8 = 0,23571$ ;  $c_9 = 0,25$ ;  $c_{10} = 0,62913$ .

в) критические значения коэффициентов уравнения регрессии определяются следующим образом:

$$\Delta_{b_0} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{b_0}$$

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{b_i}$$

$$\Delta_{b_{ij}} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{b_{ij}}$$

$$\Delta_{b_{ii}} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{b_{ii}},$$

где  $t$  – табличное значение  $t$ -критерия Стьюдента при числе степеней свободы, с которыми определялось  $S_y^2$ .

г) коэффициент считается статистически значимым, когда его абсолютная величина больше критического значения или равна ему [68]:

$$|b_i| \geq b_{i\text{ кр}}, \quad (3.13)$$

После определения значимых коэффициентов регрессии необходимо провести проверку принятой гипотезы на адекватность. Данную проверку осуществляли с помощью  $F$ -критерия (критерия Фишера), расчетное значение которого не должно превышать табличное.



Для этого определяли разности значений откликов, полученными по уравнению регрессии и экспериментальными значениями рассчитывали дисперсию адекватности для эффективности очистки и потерь зерна в отходы

$$F_{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2} \leq F_{f_1, f_2}^{табл}, \quad (3.14)$$

где  $S_{неад}^2$  – дисперсия неадекватности, равная.

$$S_{неад}^2 = \frac{SS_{неад}}{f_1} = \frac{n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_{ирасч} - \bar{y}_{иэкс})^2}{f_1} \quad (3.15)$$

где  $\bar{y}_{ирасч}$  и  $\bar{y}_{иэкс}$  – значения отклика в  $i$ -ом опыте, соответственно рассчитанные по уравнению регрессии и полученные экспериментально;  $f_1 = N - k'$  – число степеней свободы;  $k'$  – число оставленных коэффициентов уравнения регрессии.

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{иср})^2}{f_2}; \quad (3.16)$$

где  $f_2 = N \cdot (n - 1)$ .

В случае, если  $F_{расч} \leq F_{табл}$ , то полученная полиномиальная модель уравнения регрессии адекватно описывает изучаемую закономерность.

Табличные значения критерия Фишера при числе степеней свободы числителя  $f_1 = 11$  и знаменателя  $f_2 = 48$  составляет  $F_{табл} = 2,31$  [59],  $F_{расч} = 2,1$ .

Для потерь зерна в отходы  $F_{табл} = 2,66$ ,  $F_{расч} = 2,33$ .

Полученные математические модели для эффективности очистки зерна и потерь зерна в отходы адекватны.

### 3.8 Экспериментальные исследования гравитационного сепарирующего устройства

Для проведения экспериментальных исследований гравитационного сепарирующего устройства была изготовлена экспериментальная установка (см. рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Общий вид экспериментальной установки гравитационного сепарирующего устройства

В предлагаемой установке сепарирующий корпус камнеотборника собран из отдельных базовых элементов. Базовые элементы выполнены из стальной проволоки. Отдельные элементы соединяются в единую жёсткую конструкцию с помощью специальных элементов, обеспечивающих размещение прутков с определённым шагом (см. рисунок 3.14). Боковые стенки корпуса камнеотборника являются одновременно направляющими для наклонной части прутковой решётки и плавно переходящей в винтовую

поверхность, и отводящими примеси с сепарирующей прутковой поверхности.



Рисунок 3.14 – Сепарирующий корпус камнеотборника с емкостями для зернового материала

Сепарирующий корпус камнеотборника крепится к верхней головке загрузочной норрии таким образом, что зерновой материал после удаления примесей перемещается по своей самотечной трубе, а грубые примеси по отдельной трубе (лотку) в приёмную ёмкость (см. рисунок 3.15).

Для проведения достоверных экспериментальных исследований необходимо: подготовить норрию к проведению опытов, подготовить емкости для зерна. Засыпать в загрузочный бункер с дозирующей заслонкой зерновой материал (пшеница) и установить его напротив приемного ковша норрии, а приемный бункер напротив выгрузного отверстия норрии.

Подключить норрию. Провести пробный пропуск зерна через установку с целью проверки ее работоспособности.



Рисунок 3.15 – Процесс отделения грубых примесей при работе гравитационного сепарирующего устройства

Распределить обязанности исполнителей на время проведения опытов (запуск норрии в работу и остановка ее, отсчет времени секундомером, взвешивание и запись в журнал наблюдения), настройка подачи зерна (открытие шиберной заслонки на требуемую величину).

Опыт проводится в такой последовательности.

1. Подготовить исходный зерновой материал в количестве 20...25 кг на всю серию опытов. Все зерно засыпать в загрузочный бункер, предварительно закрыв шиберную заслонку. В качестве примесей нами использовались 10 камней и 10 колосков соломы (см. рисунок 3.16).

2. Установить загрузочный бункер напротив приемного лотка норрии, а приемный бункер напротив выгрузного отверстия норрии.

3. Пользуясь пультом управления (переключатель), согласованными действиями исполнителей включить норрию, одновременно с открытием шиберной заслонки на бункере, включить секундомер для отсчета времени опыта.

4. Через 30 секунд одновременно выключить привод норрии, секундомер и закрыть шиберную заслонку.



Рисунок 3.16 – Исходный зерновой материал

5. Собранное зерно после работы нории в приемный бункер необходимо взвесить на циферблатных весах, полученное значение веса семян и время опыта записать в журнал наблюдения.

6. Второй опыт и последующие (всего 5 опытов) необходимо провести с увеличением подачи, согласно тарировке шиберной заслонки.

7. Оценить работу нории при максимальной подаче зерна.

### **3.9 Методика производственных испытаний экспериментального образца центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и пластинчатым барабаном**

Экспериментальный образец центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом, имеющим продолговатые отверстия, и внутренним барабаном с радиальными пластинами проходил испытания в КФХ Щербаков С.Г. Заринского района Алтайского края.

Центробежно-решетный сепаратор разработан на кафедре «Сельскохозяйственная техника и технологии».

Сепаратор был установлен на яме зерноочистительного агрегата с возможностью автономной работы. Зерновой ворох подавался норией из завальной ямы в компенсационный бункер, а затем в сепаратор. Величина загрузки устанавливалась открытием шиберной заслонки компенсационного бункера.

Для оценки работы экспериментального образца центробежно-решетного сепаратора в соответствии с программой испытаний были приняты следующие показатели:

1. Фактическая производительность;
2. Эффективность очистки зерна от мелких примесей;
3. Эффективность работы воздушной очистки;
4. Потери зерна в отходы;
5. Удельная металлоемкость;
6. Оценка забиваемости цилиндрического подсевного решета при длительной работе.

Кольцевая схема движения зерна (завальная яма – загрузочная нория – компенсационный бункер – сепаратор – завальная яма) позволяла снизить трудоемкость определения основных показателей. Отбор проб для анализа осуществлялся при помощи откидных лотков, без остановки рабочего процесса. Оценка забиваемости решет производилась после 8 часов непрерывной работы.

Методики анализа проб для определения качества работы сепаратора оставались такими же, что и при проведении опытов в лабораторных условиях. Качество исходного материала устанавливалось согласно методике [144].

#### Глава 4 Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Экспериментальные исследования процесса очистки зернового материала на цилиндрическом подсевном решете с внутренним пластинчатым барабаном были выполнены на кафедре «Сельскохозяйственная техника и технологии» Алтайского государственного аграрного университета. Исследования проводились на лабораторной установке, указанной и описанной в разделе 3.3. Данная лабораторная установка была модернизирована.

В результате проведенных ранее исследований [54,100,131,150] было установлено, что одним из основных факторов, оказывающих влияние на работу центробежных решет, является кинематический режим. Разность вращения пластинчатого барабана и решета ( $\frac{\omega_B}{\omega_P} = 0,57$ ) в центробежно-решетном сепараторе обеспечивает редуктор, причем данное отношение оставалось неизменным при проведении всех опытов [54,100,131,150]. В работе было обосновано применение цилиндрического подсевного решета.

Ранее проведенные исследования показали, что влажность оказывает существенное влияние на производительность цилиндрических решёт. Производительность плоских решет снижается на 3...5% на каждый процент её повышения свыше кондиционной при повышении влажности. Аналогичное снижение производительности было установлено и на цилиндрических решетках [45,54].

Для проведения экспериментальных исследований использовалось зерно с кондиционной влажностью, предварительно очищенное. Требуемая в экспериментальных исследованиях засоренность достигалась путем искусственного введения мелких примесей в исходный зерновой материал.

Активный слой (слой между решетом и кромками пластин) не изменялся и составлял 10 мм. Радиус решета 0,150 м, показатель кинематического режима  $K=3,69$ . Влажность исходного материала  $W= 15\%$ , в

исследовании использовали радиальные пластины с углом  $\beta_1 = 0^\circ$ . Данные параметры не изменялись при проведении всех экспериментов.

#### **4.1 Влияние ширины отверстия решета на эффективность очистки и потери зерна в отходы**

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

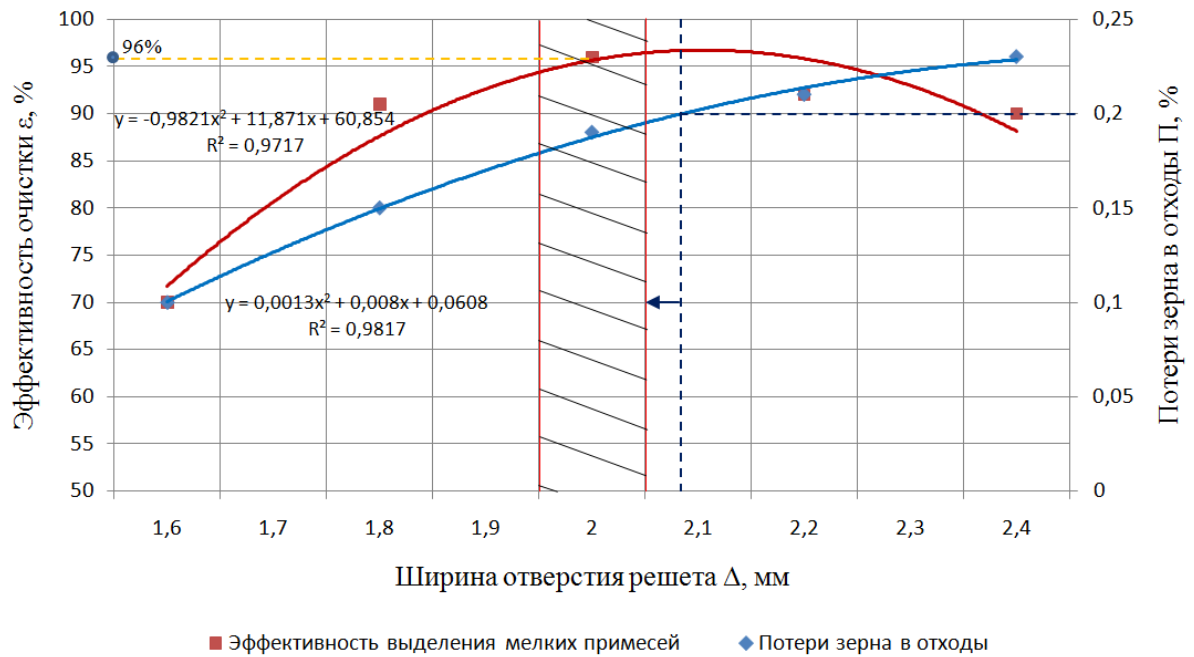
На рисунке 4.1 видно, что при ширине отверстия решета  $\Delta - 2,0$  мм потери зерна в отходы составляют  $\Pi = 0,18$  %, при эффективности  $\varepsilon = 96$  %. Минимальные потери из серии опытов составляют  $\Pi = 0,1$  %, на решете с шириной отверстия  $\Delta - 1,6$  мм, при эффективности  $\varepsilon = 73$  %. Максимальные потери из всех опытов составляют  $\Pi = 0,23$  % на решете с шириной отверстия  $\Delta - 2,4$  мм, при эффективности  $\varepsilon = 88\%$ .

При применении решета с шириной отверстия 2,0 мм появилась возможность выделять мелкие примеси такие как: щирца, просо куриное, сурепка.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что целесообразно устанавливать решета с шириной отверстия 2,0 мм. В результате установки пластин с углом отгиба в основании цилиндра, на барабан центробежно-решетного сепаратора эффективность очистки возросла примерно на 5%, в сравнении с ранее полученными результатами на решете с таким же размером отверстий и комбинированными пластинами. [130,131].

Увеличение размера ширины отверстия подсевного решета ограничивается допустимыми потерями зерна в отходы. Применение решет с меньшей шириной отверстия приводит к резкому снижению эффективности выделения мелких примесей, что видно из рисунка 4.1.





Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения с  $\beta_0 = 20^\circ$ ;  $S = 32$  мм;  $\omega_p = 15,05$  с<sup>-1</sup>;  $Q = 12,06$  т/(м<sup>2</sup>×ч);  $C_0 = 4$  % (по весу)

Рисунок 4.1 – Зависимость эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от ширины отверстия решета

Таким образом, экспериментальными исследованиями было установлено, что высокая эффективность очистки зерна от мелких примесей 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. Для использования данного способа очистки зерна от трудноотделимых примесей, необходимо провести более широкие исследования в этом направлении. Можно предположить, что такой рабочий орган будет отдельной машиной, в сочетании с кольцевым воздушным каналом

#### 4.2 Влияние диаметра отверстий решета на эффективность очистки и потери зерна в отходы

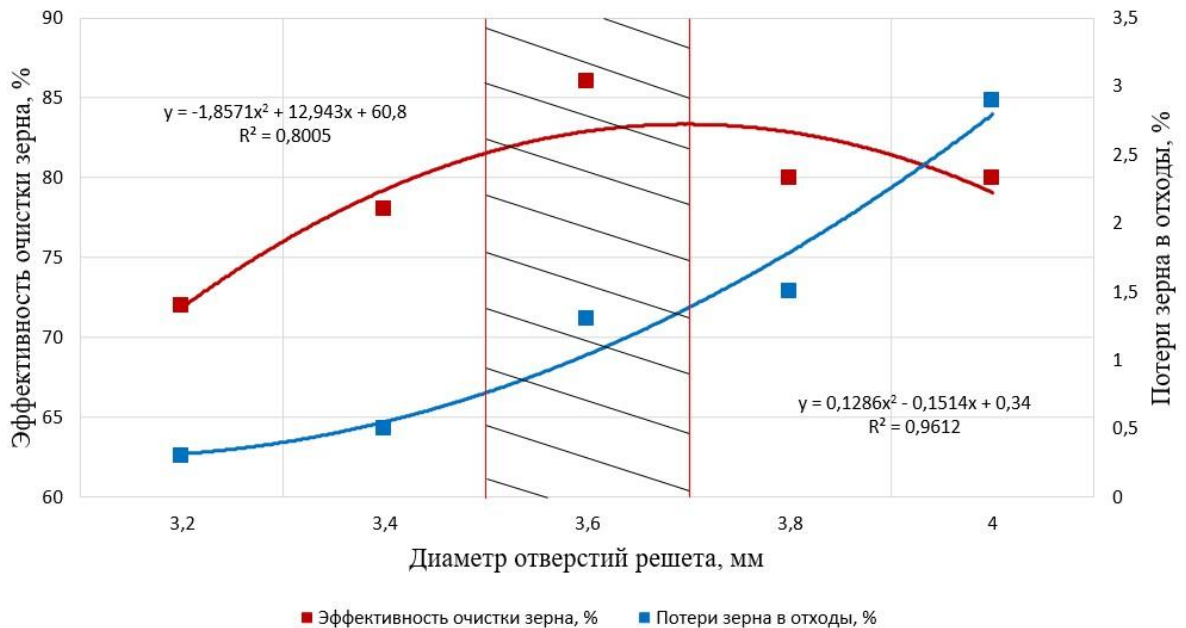
Для проведения сравнительного анализа цилиндрических решет, нами были проведены экспериментальные исследования на цилиндрических

решетах с круглыми отверстиями различных диаметров. Опытными исследованиями установлено, что увеличение диаметра отверстий решета приводит к росту эффективности очистки и одновременно к росту потерь зерна в отходы.

При диаметре отверстий решета равном 4,0 мм, эффективность очистки зерна от мелких примесей составляет  $\varepsilon = 79\%$ , а потери зерна в отходы  $\Pi = 2,9\%$ . Наилучшие показатели по эффективности очистки  $\varepsilon = 83\%$  имеют решета с диаметром отверстий 3,6 мм, при потерях зерна  $\Pi = 0,9\%$ .

Таким образом, проведя экспериментальные исследования, на цилиндрических решетах с круглыми отверстиями, можно сделать вывод, что целесообразно устанавливать решета с круглыми отверстиями диаметром 3,6 мм.

Увеличение размера отверстий подсевного решета ограничивается допустимыми потерями зерна в отходы. Применение решет с меньшим диаметром отверстий приводит к резкому снижению эффективности выделения мелких примесей, что видно из рисунка 4.2.



$$\beta_0 = 20^\circ; S = 32 \text{ мм}; \omega_p = 15,05 \text{ с}^{-1}; Q = 12,06 \text{ т}/(\text{м}^2 \times \text{ч}); C_0 = 4\% \text{ (по весу)}$$

Рисунок 4.2 – Зависимость эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от диаметра отверстий решета

Таким образом, можно сделать вывод о том, что цилиндрические решета с круглыми отверстиями показывают результаты по эффективности очистки зерна ниже, чем цилиндрические подсевные решета. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что в центробежно-решетном сепараторе целесообразно применять цилиндрические подсевные решета.

#### **4.3 Влияние шага расстановки пластин барабана на эффективность очистки зерна от мелких примесей**

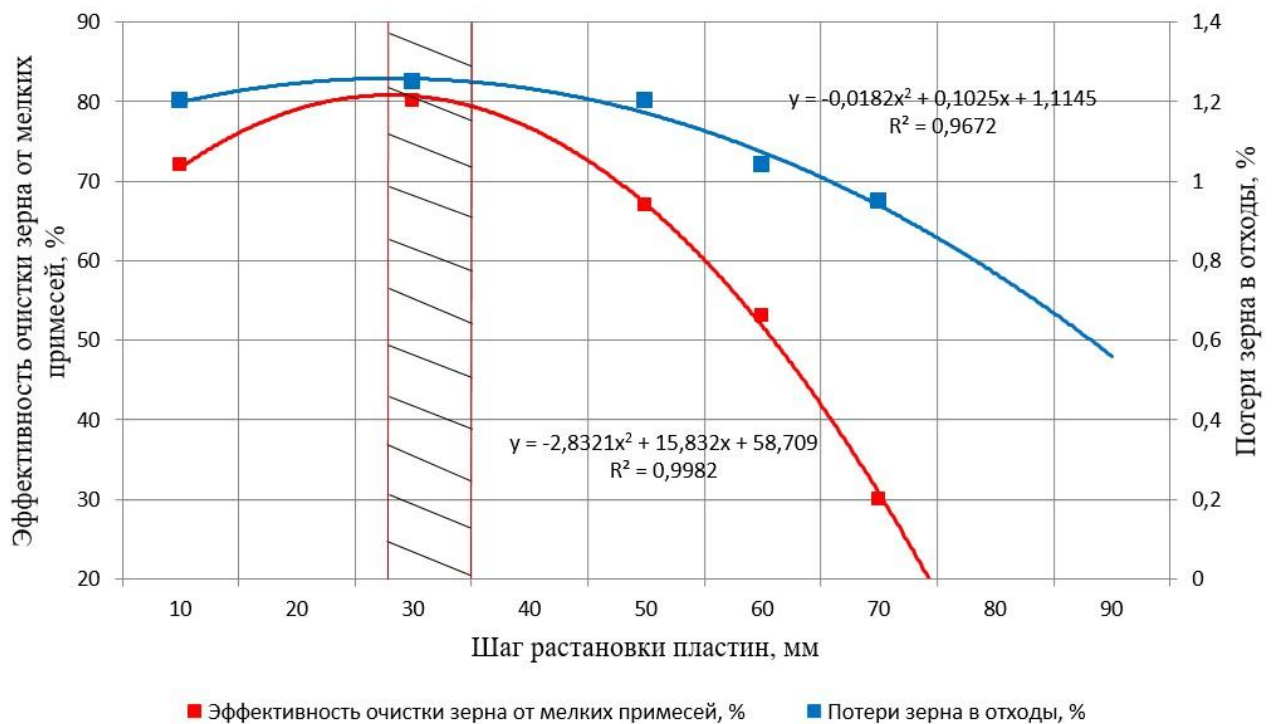
В результате проведенных экспериментальных исследований по изучению влияния шага расстановки пластин на внутреннем барабане на эффективность выделения мелких примесей можно сделать вывод о том, что эффективность очистки зерна возрастает при увеличении количества пластин на барабане. При уменьшении шага расстановки пластин с 90 мм до 32 мм эффективность очистки возрастает, но при этом и увеличиваются потери зерна в отходы. В процессе дальнейшего уменьшения шага расстановки пластин на барабане эффективность снижается, так как при диаметре барабана 270 мм с двадцатью восьмью пластинами происходит заклинивание зернового материала, и процесс сепарации ухудшается.

Однако проведенные экспериментальные исследования показали, что при увеличенном шаге расстановки пластин необходимо повысить подачу зернового материала, чтобы обеспечить необходимую толщину зернового слоя между пластинами барабана.

При сравнительном анализе пластин барабана выявлено, что применение пластин с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения позволяет значительно уменьшить ускорение движения зернового материала, тем самым повысить вероятность проникновения мелких частиц через толщу зернового материала. Применение данных пластин, в совокупности с цилиндрическим подсевным решетом, позволяет проходовым фракциям при движении зернового

материала не экранироваться обратной стороной наклонной грани и двигаться вдоль радиальной грани под действием центробежной силы, что повышает количество выделенных мелких примесей, а следовательно, и эффективность очистки.

Из рисунка 4.3 видно, что оптимальным шагом расстановки пластин следует считать  $S = 32$  мм, он соответствует 24 пластинам на барабане. Приведенные экспериментальные данные полностью согласовываются с теоретическими исследованиями, представленными на рисунке 2.10. При уменьшении шага расстановки пластин на барабане происходит рост коэффициента трансформации силового давления, что тесно связано с эффективностью выделения мелких примесей в центробежно-решетном сепараторе.



$$\beta_0 = 20^\circ; \omega_p = 15,05 \text{ с}^{-1}; Q = 13,81 \text{ т}/(\text{м}^2 \times \text{ч}); C_0 = 4 \% \text{ (по весу)}; \Delta = 2,0 \text{ мм}.$$

Рисунок 4.3 – Влияние шага расстановки пластин барабана на эффективность выделения мелких примесей и потери зерна в отходы

Таким образом, дальнейшие опыты по обоснованию конструктивно-кинематических параметров подсевного решета и пластинчатого барабана по эффективности очистки зерна от мелких примесей проводились с использованием радиальных пластин с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения с шагом расстановки 32 мм.

#### **4.4 Влияние кинематического режима на эффективность очистки зерна**

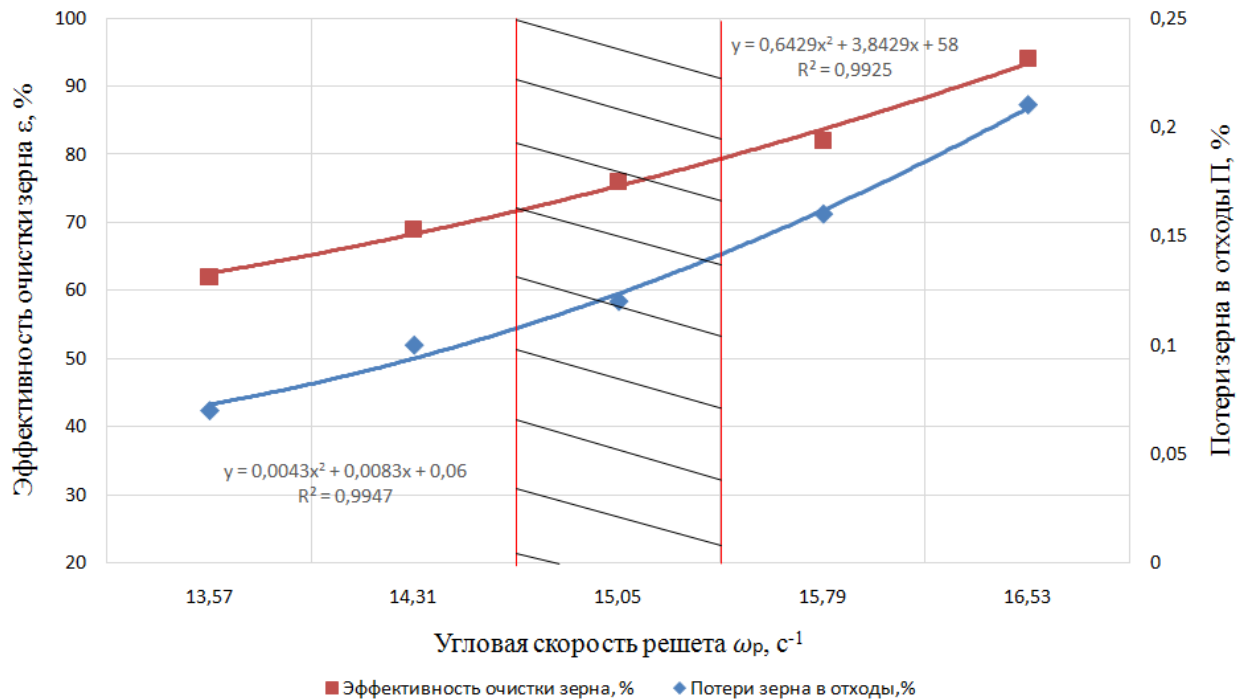
Одним из наиболее важных и существенных факторов, оказывающих влияние на работу центробежно-решетного сепаратора, является кинематический режим. В процессе работы сепаратора, при малых скоростях вращения барабана, центробежная сила минимальна и материал не прижимается к решету, а движется вниз, вследствие чего мелкие примеси не выделяются. При возрастании центробежной силы эффективность сепарации повышается до определенного момента: когда зерновой слой начнет вращаться вместе с решетом (происходит заклинивание). При проведении экспериментальных исследований на лабораторной установке выдерживали разность скоростей вращения пластинчатого барабана и решета, равную 0,57, обеспечивалась с помощью редуктора. Данное соотношение не изменялось в течение проведения всех экспериментальных исследований.

В ходе проведения экспериментальных исследований производилось изменение окружной скорости решета и барабана одновременно. Угловая скорость решета  $\omega_r$  изменялась в пределах от 13,57 до 16,53 с<sup>-1</sup>.

Характер изменения эффективности очистки и потерь зерна в отходы от угловой скорости решета представлен на рисунке 4.4.

Проанализировав результаты можно сделать вывод о том, что при увеличении угловой скорости решета до 16,53 с<sup>-1</sup> рабочий процесс протекает устойчиво, эффективность очистки зерна возрастает. Однако увеличение

угловой скорости свыше  $16,53 \text{ c}^{-1}$  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  $15,79 \text{ c}^{-1}$ . Это подтверждают и исследования, проведенные в работах [6].



$$\beta_0 = 20^\circ; S = 32 \text{ мм}; Q = 12,06 \text{ т}/(\text{м}^2 \times \text{ч}); C_0 = 6 \text{ \% (по весу)}; \Delta = 2,0 \text{ мм}.$$

Рисунок 4.4 – Влияние угловой скорости решета на эффективность выделения мелких примесей и потери зерна в отходы

Увеличение угловой скорости приводит к возрастанию энергоемкости процесса сепарирования и увеличению потерь зерна в отходы, которые достигают значения  $0,22 \text{ \%}$  при  $16,53 \text{ c}^{-1}$ . Установлено [100], что наибольшая доля энергии затрачивается на трение, то есть на транспортирование зерна по рабочей поверхности решета. Возрастание угловой скорости приводило к увеличению коэффициента трансформации силового давления и как следствие, к росту сил трения зерна о зерно между слоями (активным и

заклученным между пластинами барабана) и зерна о рабочую поверхность решета. Центробежно-решетный сепаратор имеет малое энергопотребление и увеличение угловой скорости вращения решета приводит к незначительному его повышению.

#### 4.5 Энергетические затраты на работу сепаратора

Компактность привода экспериментального центробежно-решетного сепаратора позволяет свести к минимуму потери мощности самой передачи, а именно дает возможность наиболее точно определить энергозатраты, связанные с технологическим процессом сепаратора. Мощность  $N$ , необходимая для работы сепаратора при установившемся режиме представляет сумму мощностей:

$$N = N_{сопр} + N_{кин} + N_{тр}, \quad (4.1)$$

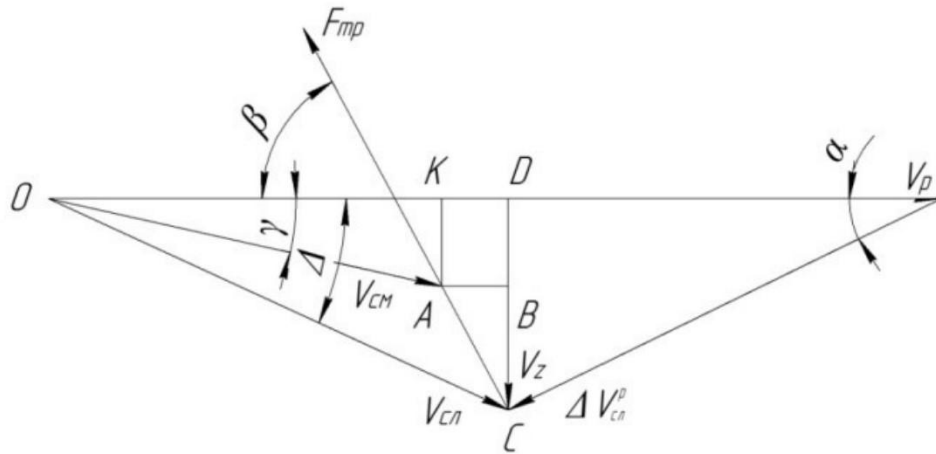
где  $N_{сопр}$  – мощность, расходуемая на преодоление вредных сопротивлений:

сопротивления воздуха, трения решета о наружную цилиндрическую щетку, трение конической обечайки в подшипнике скольжения;

$N_{кин}$  – мощность, расходуемая на сообщение кинетической энергии обрабатываемому материалу;

$N_{тр}$  – мощность, расходуемая на трение зерна о зерно в активном слое, о рабочую поверхность делительного и цилиндрического решет.

В ходе вращения цилиндрического решета происходит проскальзывание слоев зернового материала, находящихся между решетом и пластинами барабана в результате разности их угловых скоростей. [107] Рассмотрим кинематическую характеристику движения зернового материала (см. рисунок 4.5).



$V_p$  – линейная скорость решета;  $V_{cm}$  – скорость слоев материала;  $V_z$  – осевая составляющая скорости движения слоя;  $\Delta V_{sl}^p$  – относительная скорость слоя;  $\alpha$  – угол, определяющий направление движения слоя;  $\beta$  – угол между направлением силы трения зерна о первый элементарный слой и горизонтальной плоскостью

Рисунок 4.5 – Параметры скольжения зернового материала

Слой зернового материала помимо радиального скольжения одновременно движется вниз, относительно контактирующего слоя, следовательно, сила трения  $F_{тр}$  будет направлена в противоположную сторону относительного скольжения под углом  $\beta$  к горизонту. Для определения  $F_{тр}$  необходимо найти полную площадь решета  $S$ :

$$S = 2\pi RH, \quad (4.2)$$

где  $H$  – высота цилиндра.

Исходя из расчетных данных известно, что значение угла  $\beta$  невелико и составляет примерно  $\beta = 18^\circ$ .

Наибольшая доля энергии затрачивается на трение, т.е. на транспортирование зерна по рабочей поверхности решет. Экспериментальными исследованиями ставилась задача определить удельные энергетические затраты мощности от скорости решета на лабораторной установке центробежно-решетного сепаратора (см. рисунок 4.6). Измерение мощности производилось с помощью измерительного комплекса К-505.



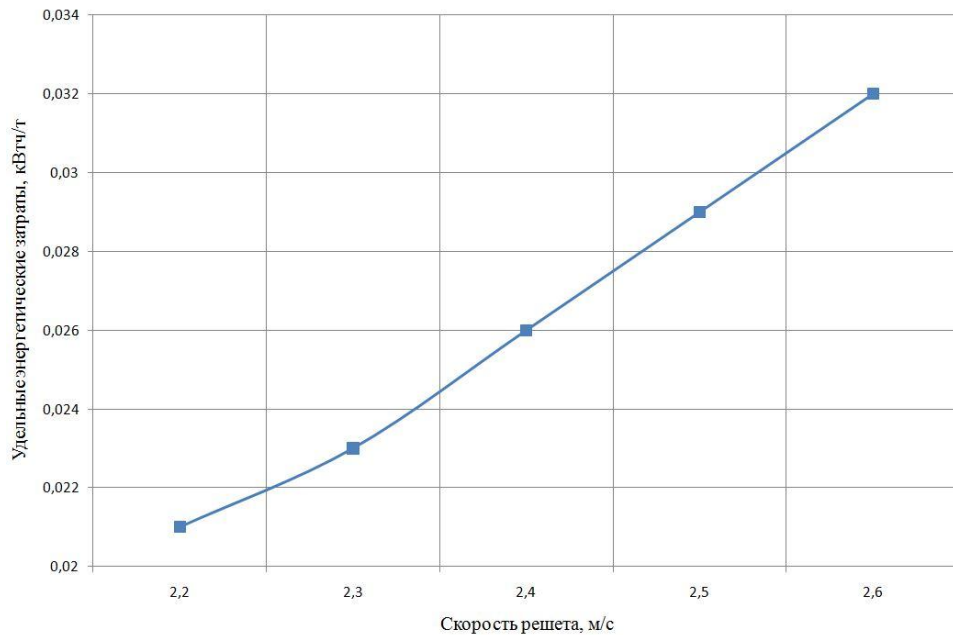


Рисунок 4.6 - Изменение удельных энергетических затрат в зависимости от скорости решета

Проанализировав полученные данные можно сделать вывод о том, что при скорости решета  $V_p = 2,4$  м/с затраты мощности составили 0,026 кВтч/т. Исследования проводились на цилиндрическом подсевном решете с шириной отверстия  $\Delta = 2,0$  мм. Диаметр решета  $d_p = 300$  мм. Удельные затраты мощности составляли не более 0,032 кВтч/т.

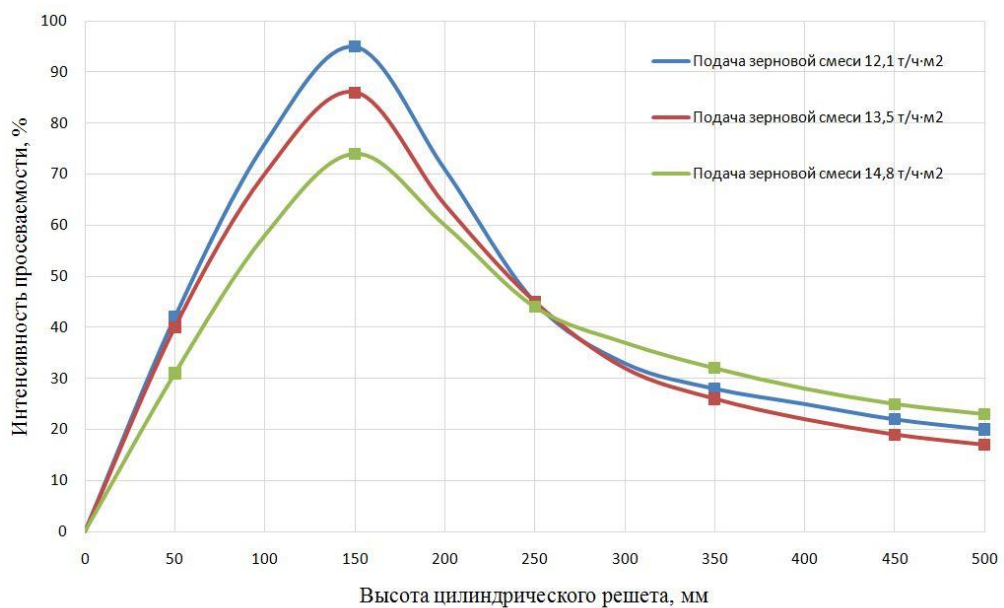
Следует отметить, что есть возможность снижения удельных энергетических затрат на обработку одной тонны зерна при определенных в наших исследованиях конструктивно-кинематических параметрах сепаратора при изготовлении центробежно-решетного сепаратора в промышленных условиях.

#### 4.6 Влияние высоты решета на интенсивность просеваемости мелких примесей

В процессе работы центробежно-решетного сепаратора высота цилиндрического решета оказывает влияние на полноту выделения мелких примесей.

На рисунке 4.7 показана интенсивность просеваемости при различной подаче зернового материала. Исходя из проведенных экспериментальных исследований, по изучению влияния высоты цилиндрического решета на интенсивность просеваемости мелких примесей можно сделать вывод о том, что наибольшая интенсивность просеваемости наблюдается в верхней части решета (когда зерновой материал находится в состоянии интенсивного расслоения), а затем происходит снижение просеваемости. Это объясняется тем, что мелкие частицы подходят к сепарирующей поверхности решета с дальних элементарных зерновых слоев за счет сегрегации материала.

Такое снижение характерно для всех зерноочистительных машин, так как количество проходовой фракции уменьшается по мере движения материала по решету.



$\beta_0 = 20^\circ$ ;  $S = 32$  мм;  $\omega_p = 15,05$  с<sup>-1</sup>;  $C_0 = 4$  % (по весу);  $\Delta = 2,0$  мм.

Рисунок 4.7 – Интенсивность просеваемости по высоте цилиндрического подсевного решета

При работе центробежно-решетного сепаратора с цилиндрическим подсевным решетом рост просеваемости наблюдается до 200 мм верхней части высоты решета, далее происходит значительное снижение.

Исходя из рисунка 4.7 видно, что интенсивность просеваемости выше при подаче зернового материала  $Q = 12,1$  т/ч·м<sup>2</sup> на участке длины решета 150

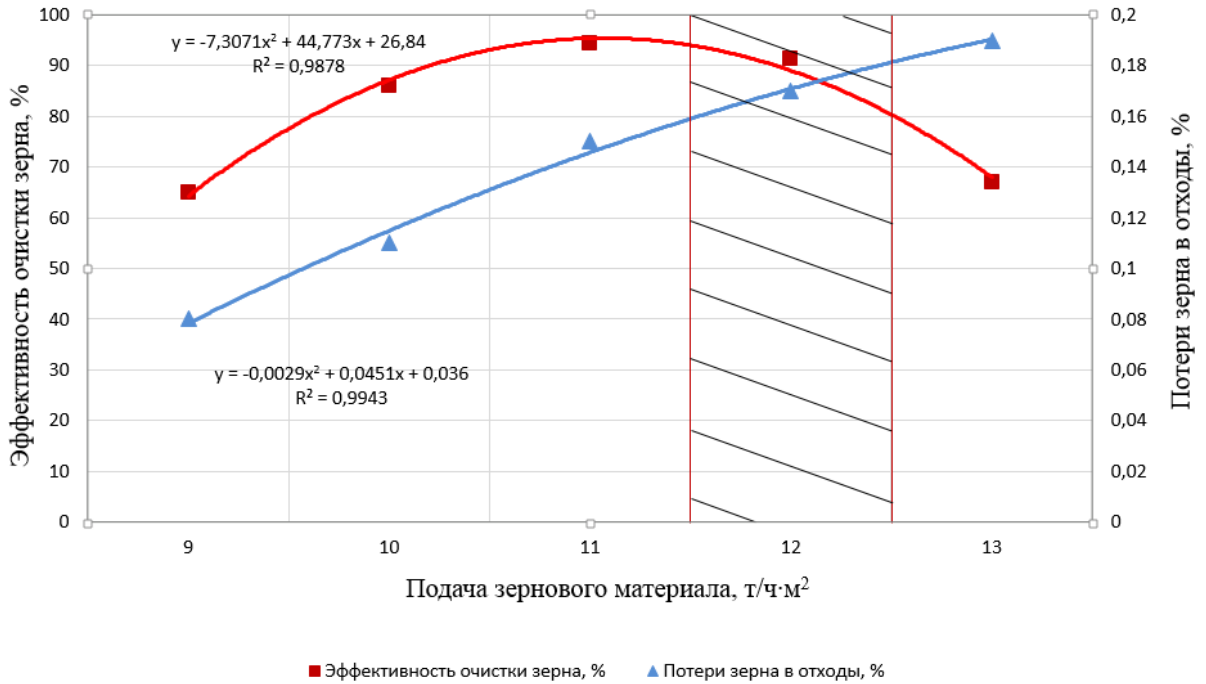
мм, когда при подаче зернового материала  $Q=13,5 \text{ т/ч}\cdot\text{м}^2$ , интенсивность на том же участке длины решета ниже. Данные показатели объясняются тем, что общий зерновой слой, находящийся между пластинами барабана полностью заполнен и давление его на активный слой выше.

#### **4.7 Влияние удельной подачи зернового материала на полноту выделения мелких примесей**

В результате проведенных экспериментальных исследований по оценке влияния подачи зернового материала на полноту выделения мелких примесей, можно сделать вывод о том, что с увеличением подачи зернового материала от 9 до 13  $\text{т/ч}\cdot\text{м}^2$  эффективность очистки зерна возрастает от 65 до 94,4%, что указано на рисунке 4.8. Данные показатели объясняется тем, что толщина зернового слоя между пластинами барабана в радиальном направлении увеличивается, следовательно, возрастает и значение коэффициента трансформации силового давления.

Применение цилиндрического подсевного решета в совокупности с пластинами, с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, способствует увеличению давления зернового материала на подсевное решето, в результате чего происходит уменьшение ускорения свободного падения зерна и увеличение выделения мелкой примеси.

Проведя анализ плоскорешётных сепараторов [37,129], можно сказать о том, что они хорошо выделяют мелкую фракцию при подаче зернового материала от 10 до 15  $\text{т/ч}\cdot\text{м}^2$ , с увеличением подачи до 20  $\text{т/ч}\cdot\text{м}^2$  происходит резкое снижение эффективности очистки зерна (до 30%) [147]. Это связано с тем, что мелкие частицы не успевают пройти к решету с увеличением толщины зернового материала на нем.



$$\beta_0 = 20^\circ; S = 32 \text{ мм}; \omega_p = 15,05 \text{ с}^{-1}; C_0 = 4 \% \text{ (по весу)}; \Delta = 2,0 \text{ мм}.$$

Рисунок 4.8 – Влияние удельной подачи зернового материала на эффективность выделения мелких примесей и потери зерна в отходы

Согласно исследованиям Гончарова Е.С. [21], увеличение подачи зернового материала в виброцентробежном сепараторе приводит к снижению полноты выделения мелкой фракции. Заметим, что при равной полноте выделения 70% виброцентробежный сепаратор работает при удельной подаче 20 т/ч·м<sup>2</sup>, с диаметром цилиндрического решета 615 мм, тогда как для исследуемого центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом подача зернового материала составила около 12 т/ч·м<sup>2</sup>, при диаметре решета 300 мм.

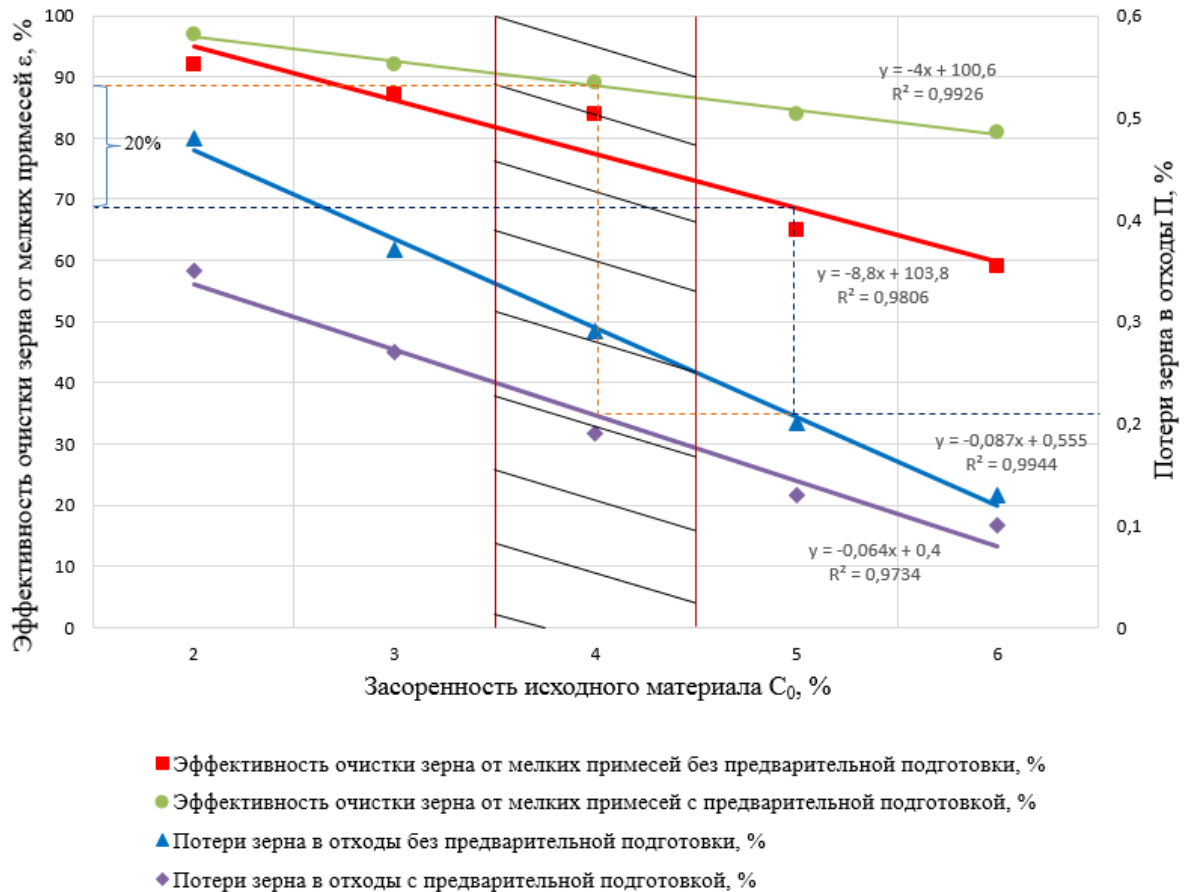
#### 4.8 Влияние засоренности исходного зернового материала на показатели процесса сепарации

Одним из важных параметров, оказывающих влияние на эффективность работы зерноочистительных машин, является засоренность зернового материала. Для наглядности показателей получена зависимость

эффективности выделения мелких примесей на центробежно-решетном сепараторе от засоренности исходного материала, которая представлена на рисунке 4.9. На графике хорошо прослеживается снижение эффективности очистки при увеличении засоренности. При проведении экспериментальных исследований проведена сравнительная оценка базового варианта, и варианта с применением предварительной подготовки зернового материала. 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 минимальных значениях на 23%, при максимальных значениях на 3%. При засоренности исходного зернового материала 4%, эффективность очистки при применении предварительной подготовки возросла на 11%, а потери зерно в отходы составили 0,2%. Потери зерна в отходы с увеличением засоренности снижаются. Это объясняется тем, что отверстия решета в процессе сепарации «заняты» проходовой фракцией.

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.

Исходя из результатов проведенных экспериментальных исследований эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от засоренности исходного материала (см. рисунок 4.9), можно сделать вывод о том, что наиболее целесообразно применять вариант с предварительной подготовкой зернового материала, так как у него наиболее высокие показатели по эффективности очистки и потерям зерна в отходы.



$$\beta_0 = 20^\circ; S = 32 \text{ мм}; \omega_p = 15,5 \text{ с}^{-1}; Q = 12,06 \text{ т}/(\text{м}^2 \times \text{ч}); \Delta = 2,0 \text{ мм}.$$

Рисунок 4.9 – Зависимость эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от засоренности исходного материала

На основе результатов однофакторных экспериментов можно сделать вывод, что наибольшее влияние на изменение эффективности работы оказывают кинематические и конструктивные параметры – угловая скорость вращения решета и ширина отверстия решета, а также технологические факторы.

#### 4.9 Результаты исследования гравитационного сепарирующего устройства

Для подтверждения теоретических предпосылок проводились опыты по определению работоспособности гравитационного сепарирующего устройства. Исходя из габаритных размеров лабораторной норрии, были

подобраны размеры по длине солоmistых примесей. Частицы грубых примесей были выбраны произвольно. Привод нории осуществлялся через мотор-редуктор и обеспечивая необходимую скорость ленты.

Первые пробные опыты показали, что отдельные зерновые частицы, ускоряясь о сепарирующую решетку, перескакивали через направляющие стенки, не поступали в зернопровод. Поэтому был установлен фартук. Дальнейшие опыты проводились с этим устройством.

В результате пятикратного проведения однотипных опытов, было установлено, что из 10 камней, включенных в состав зернового материала, выделились все 10 штук, а из 10 штук солоmistых частиц длиной 50...70 мм (хотя такие части колосьев не могут оказать существенного влияния на работу ворохоочистителя) было выделено в каждом опыте по 3...4 частицы. Это объясняется тем, что солоmistые частицы малой длины ориентируются вдоль отверстий сепарирующей решетки и проходят через нее.

#### **4.10 Параметры, определяющие эффективность процесса сепарации и их оптимизация**

Анализ предшествующих исследований и предварительные опыты позволили определить основные параметры и конструктивные особенности центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и пластинчатым барабаном. Для сокращения объема проведения экспериментальных работ, на начальной стадии изучения объекта исследований были проведены отсеивающие эксперименты. Это позволило выявить существенные факторы, влияющие на работу сепаратора и перейти к построению математической модели процесса сепарации зерна на подсевном решете. Исследования проводились согласно методике, описанной в п. 3.5 и 3.6. План и результаты отсеивающих экспериментов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты отсеивающих экспериментов по плану Плакетта-Бермана

№ опыта	Факторы											Критерий	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	ε, %	П, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	81	0,5
2	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	83	0,5
3	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	+	88	0,6
4	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	94	0,4
5	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	71	1,3
6	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	76	1
7	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	77	1,1
8	+	+	+	-	-	+	-	+	+	-	+	89	0,9
9	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	68	1,3
10	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	-	62	1,2
11	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	79	1,0
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	72	0,9

Вычисления по определению значимости факторов проводили с помощью программы Statistica 12 для ПЭВМ. Результаты расчета представлены на диаграммах значимости факторов рисунок 4.10. Значения коэффициентов значимости взяты по модулю.

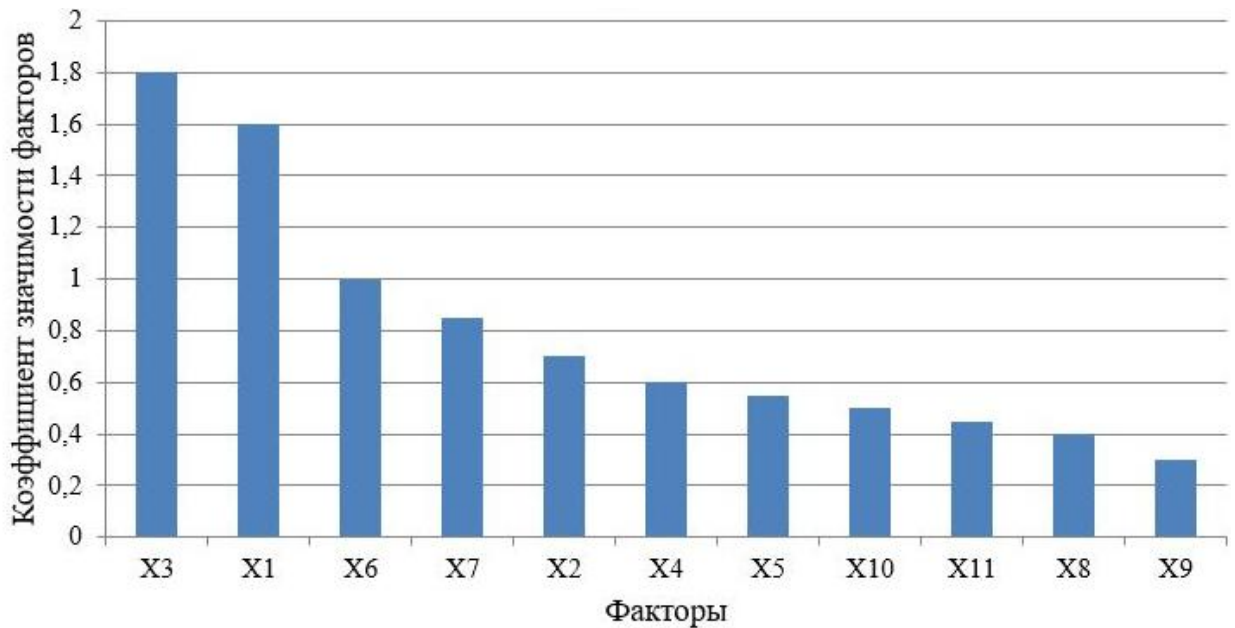


Рисунок 4.10 - Диаграмма значимости факторов, влияющих на эффективность очистки зернового материала и потерь зерна в отходы



На основании полученных данных, следует, что наиболее значимыми факторами являются  $X_3$ ,  $X_1$ ,  $X_6$ ,  $X_7$  – это ширина отверстия  $\Delta$  подсевного решета, засорённость исходного зернового материала  $C_0$ , угловая скорость вращения решета  $\omega_p$  и подача зернового материала  $Q$ .

Для дальнейшего удобства расчетов обозначим:  $X_1 - C_0$ ;  $X_2 - \Delta$ ;  $X_3 - Q$ ;  $X_4 - \omega_p$ .

Тогда функция зависимости эффективности очистки зерна от наиболее значимых факторов примет следующий вид:

$$\varepsilon = f(\Delta, C_0, \omega_p, Q, ) \quad (4.2)$$

Тогда функция зависимости потерь зерна в отходы от наиболее значимых факторов примет следующий вид:

$$П = f(\Delta, C_0, \omega_p, Q, ) \quad (4.3)$$

В результате проведения многофакторного эксперимента были получены уравнения регрессии по критериям оптимизации. Коэффициенты регрессии  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  вычислялись при помощи прикладной программы Statistica 12 для ПЭВМ.

Уравнение регрессии в кодированном виде для критерия оптимизации  $\varepsilon$  после проверки и удаления незначимых коэффициентов имеет вид:

$$Y = 72,81 - 8,291X_1 + 18,974X_2 + 4,194X_3 + 5,149X_4 - 3,154X_1 X_3 - 4,485 X_2 X_3 - 1,425X_2 X_4 + 1,019X_3 X_4 + 11,157 X_1 X_2 - 13,218X_1^2 + 3,628 X_3^2 - 7,213X_4^2, \% \quad (4.4)$$

Уравнение регрессии в кодированном виде для критерия оптимизации  $П$ :

$$Y = 0,296 + 0,05X_2 + 0,034X_3 + 0,061X_4 + 0,016X_1 X_2 + 0,018X_3 X_4 - 0,052 X_1^2 - 0,037X_2^2 - 0,047X_4^2, \% \quad (4.5)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии по критериям оптимизации – эффективность очистки и потери зерна определяли по соответствующим им доверительным интервалам.

Адекватность полученных математических моделей проверяли по критерию Фишера. Для этого определяли разности между значениями откликов, полученными по уравнению регрессии и экспериментальными

значениями. Рассчитывали дисперсии адекватности для эффективности очистки зерна и потерь зерна в отходы.

Коэффициенты, значения которых больше нуля, знак / + / , указывают на то, что между параметром оптимизации и факторами при таких коэффициентах существует прямая зависимость, знак / - / указывает на обратную связь с их параметром.

Так как в модели присутствуют коэффициенты типа  $X_1^2$ ,  $X_1X_2$ , значит, модель носит нелинейный характер. Как известно, абсолютное числовое значение коэффициента для взаимодействия показывает, насколько изменится скорость роста выходного параметра в зависимости от одного фактора, если другой изменится от 0 до |1|. Результаты многофакторного эксперимента влияния наиболее значимых факторов на эффективность очистки зерна представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Влияние наиболее значимых факторов на эффективность очистки зерна.

№ опыта	Варьируемые факторы				Значение, % ε
	$X_1 (C_0)$	$X_2 (\Delta)$	$X_3 (Q)$	$X_4 (\omega_p)$	
	2	3	4	5	6
1	6	2,2	13,81	15,79	78,35
2	2	2,2	13,81	15,79	99,39
3	6	1,8	13,81	15,79	51,65
4	2	1,8	13,81	15,79	78,41
5	6	2,2	10,31	15,79	85,28
6	2	2,2	10,31	15,79	94,86
7	6	1,8	10,31	15,79	40,83
8	2	1,8	10,31	15,79	47,82
9	6	2,2	13,81	14,31	70,98
10	2	2,2	13,81	14,31	92,86
11	6	1,8	13,81	14,31	38,5
12	2	1,8	13,81	14,31	58,78
13	6	2,2	10,31	14,31	75,80
14	2	2,2	10,31	14,31	90,65
15	6	1,8	10,31	14,31	31,49
16	2	1,8	10,31	14,31	40,01

1	2	3	4	5	6
17	2	2,0	12,06	15,05	94,45
18	6	2,0	12,06	15,05	73,56
19	4	1,8	12,06	15,05	39,44
20	4	2,2	12,06	15,05	79,82
21	4	2,0	10,31	15,05	69,59
22	4	2,0	13,81	15,05	83,36
23	4	2,0	12,06	14,31	58,28
24	4	2,0	12,06	15,79	72,99

Определяя оптимальное сочетание исследуемых факторов, при которых эффективность очистки  $\mathcal{E}$  имеет максимальное значение, необходимо учитывать, что величина потерь зерна в отходы ограничена требованиями ГОСТ. Результаты многофакторного эксперимента влияния наиболее значимых факторов на потери зерна в отходы представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Влияние наиболее значимых факторов на потери зерна в отходы.

№ опыта	Варьируемые факторы				Значение, %
	$X_1 (C_0)$	$X_2 (\Delta)$	$X_3 (Q)$	$X_4 (\omega_p)$	$\Pi$
1	2	3	4	5	6
1	6	2,2	13,81	15,79	0,330
2	2	2,2	13,81	15,79	0,245
3	6	1,8	13,81	15,79	0,161
4	2	1,8	13,81	15,79	0,234
5	6	2,2	10,31	15,79	0,196
6	2	2,2	10,31	15,79	0,189
7	6	1,8	10,31	15,79	0,87
8	2	1,8	10,31	15,79	0,102
9	6	2,2	13,81	14,31	0,139
10	2	2,2	13,81	14,31	0,117
11	6	1,8	13,81	14,31	0,051
12	2	1,8	13,81	14,31	0,072
13	6	2,2	10,31	14,31	0,120
14	2	2,2	10,31	14,31	0,1

1	2	3	4	5	6
15	6	1,8	10,31	14,31	0,039
16	2	1,8	10,31	14,31	0,037
17	2	2,0	12,06	15,05	0,223
18	6	2,0	12,06	15,05	0,225
19	4	1,8	12,06	15,05	0,142
20	4	2,2	12,06	15,05	0,336
21	4	2,0	10,31	15,05	0,217
22	4	2,0	13,81	15,05	0,324
23	4	2,0	12,06	14,31	0,144
24	4	2,0	12,06	15,79	0,314

Максимальное значение эффективности очистки зерна ( $\varepsilon$ ) возможно при рациональном сочетании исследуемых факторов, при этом надо учитывать ограничительные требования ГОСТ по потерям зерна в отходы.

Представим график (рисунок 4.11) эффективности очистки зерна от мелких примесей в зависимости от угловой скорости вращения решета  $X_4$  ( $\omega_p$ ) и засоренности исходного зернового материала  $X_1$  ( $C_0$ ), при фиксированных значениях  $X_2$  ( $\Delta$ ) = 0 и  $X_3$  ( $Q$ ) = +1.

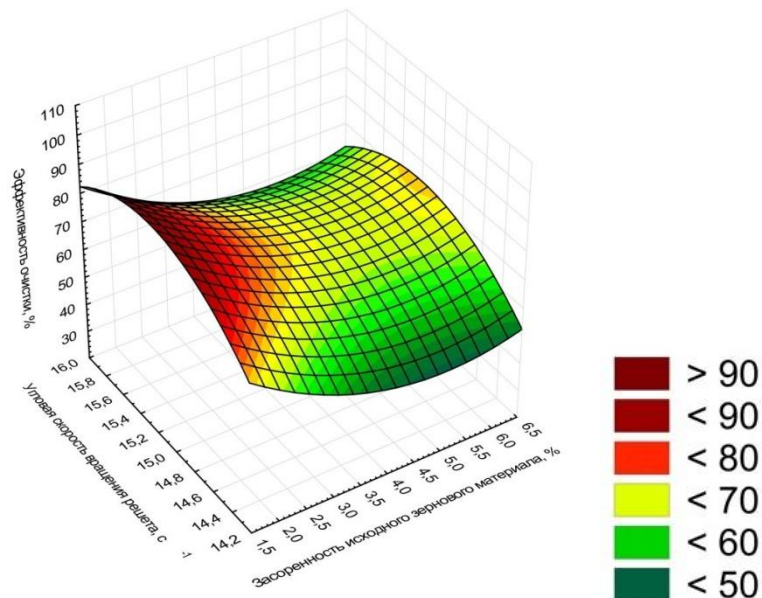


Рисунок 4.11 – Влияние угловой скорости вращения решета  $\omega_p$  и засоренности исходного зернового материала  $C_0$  на эффективность очистки при  $X_3 = +1$ ,  $X_2 = 0$

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\varepsilon = -4376,4876 - 20,4209 \cdot X_4 + 590,6166 \cdot X_1 + 1,9369 \cdot X_4^2 + 0,049 \cdot X_4 \cdot X_1 - 19,3983 \cdot X_1^2 \quad (4.6)$$

Основные положения регрессионного анализа модели, определяющие эффективность очистки и потери зерна с величинами факторов приведены в таблицах 4.2 и 4.3.

Проанализируем зависимость угловой скорости вращения решета  $X_4$  ( $\omega_p$ ) и засорённости зернового материала  $X_1$  ( $C_0$ ) при фиксированных значениях подачи зернового материала  $X_3$  ( $Q$ ) = +1 и ширины отверстия решета  $X_2$  ( $\Delta$ ) = 0.

График показывает, что увеличение угловой скорости вращения решета, оказывает существенное влияние на работу сепаратора. Увеличение скорости вращения решета в исследуемом диапазоне приводит к росту центробежной силы инерции, что способствует интенсивной просеваемости проходовой фракции. Опыты показали также, что интенсивность выделения мелких примесей наблюдается в верхней части цилиндра.

Влияние второго параметра, засоренности исходного зернового материала менее значимо. Поверхность отклика показывает, что с уменьшением засоренности эффективность выделения мелких примесей повышается, что характерно для всех подсевных решет зерноочистительных машин. На это показывает и характер полученной зависимости. Однако, однофакторные эксперименты показывают, что на эффективность выделения мелких примесей, оказывает влияние предварительное расслоение зернового материала при изменении его засоренности. Таким образом, сравнительный анализ исследованных технологических схем (без предварительного расслоения и с предварительным расслоением) подтверждает целесообразность применения конической обечайки со ступенчатой поверхностью в технологической схеме центробежно-решетного сепаратора.

Поверхность отклика эффективности очистки зерна в зависимости от подачи зернового материала  $X_3$  ( $Q$ ) и ширины отверстия решета  $X_2$  ( $\Delta$ ) при фиксированных значениях засоренности исходного зернового материала  $X_1$  ( $C_0$ ) = 0 и угловой скорости вращения решета  $X_4$  ( $\omega_p$ ) = +1 представлены на рисунке 4.12.

Анализируя эту зависимость можно сделать вывод, что при увеличении размера ширины отверстия решета эффективность сепарирования возрастает при всех значениях подачи. Дальнейшее увеличение подачи при определенном размере ширины 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.

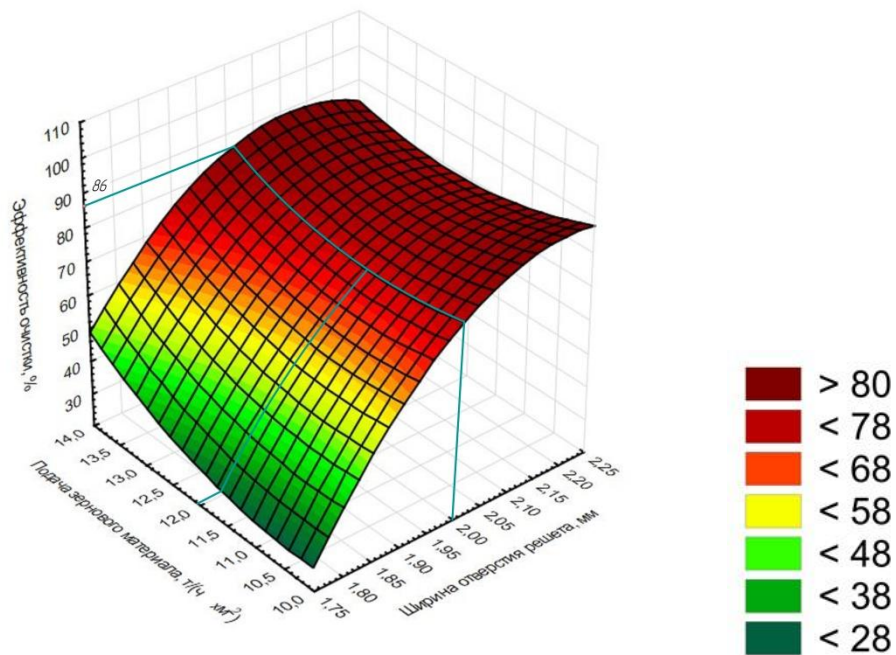


Рисунок 4.12 – Влияние подачи зернового материала  $Q$  и ширины отверстия решета  $\Delta$  на эффективность очистки при  $X_1 = 0$ ,  $X_4 = +1$

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\varepsilon = -1395,2994 + 1429,5839 \cdot X_3 - 11,5878 \cdot X_2 - 294,8393 \cdot X_3^2 - 12,8929 \cdot X_3 \cdot X_2 + 1,6494 \cdot X_2^2 \quad (4.7)$$

При обосновании оптимального размера (ширины отверстия) изучалась забиваемость цилиндрического подсевного решета и оценивалась работа наружной цилиндрической щетки. Установлено, что на всех уровнях засоренности зерна в исследуемом диапазоне от 2 до 6 % при включенной цилиндрической щетке решета практически не забиваются. При длительной работе сепаратора без очистительной щетки, видимо, приведет к снижению выделения проходových частиц. Поэтому наружная цилиндрическая щетка, как показал практический опыт, необходима в технологической схеме центробежно-решетного сепаратора.

Рассмотрим влияние изучаемых параметров на процесс прохода зерновок через отверстия подсевного решета, то есть оценим их влияние на потери зерна в отходы.

На рисунке 4.13 представлен график зависимости от угловой скорости вращения решета  $X_4$  ( $\omega_p$ ) и засоренности исходного зернового материала  $X_1$  ( $C_0$ ), при фиксированных значениях ширины отверстия подсевного решета  $X_2$  ( $\Delta$ ) = 0 и подачи зернового материала  $X_3$  ( $Q$ ) +1.

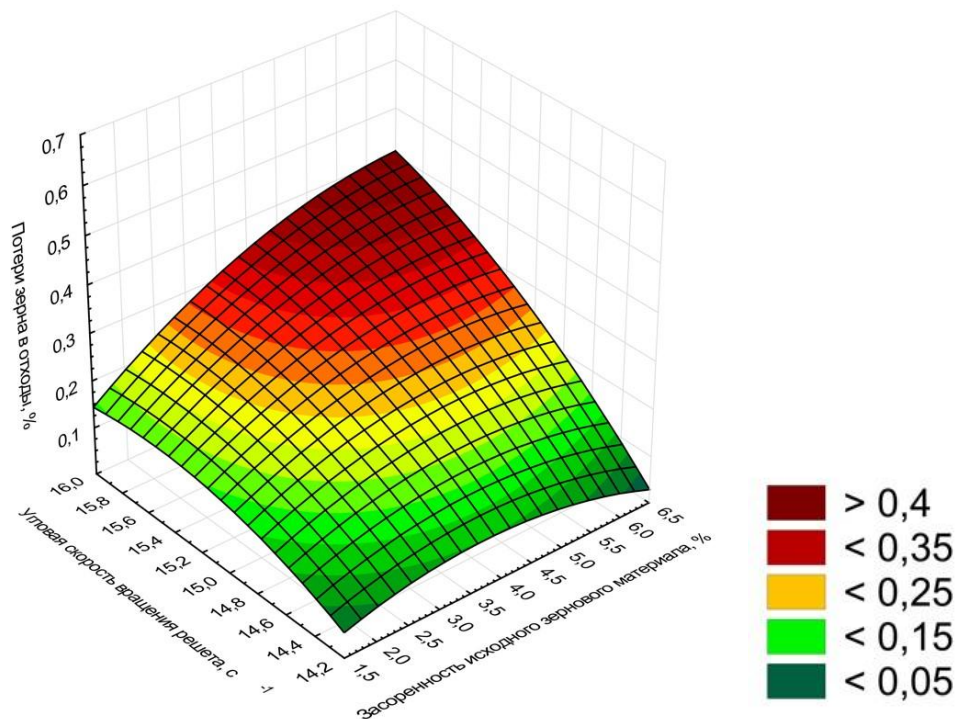


Рисунок 4.13 – Влияние угловой скорости вращения решета  $\omega_p$  и засоренности исходного зернового материала  $C_0$  на потери зерна в отходы при  $X_3 = +1$ ,  $X_2 = 0$

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\Pi = -13,2593 - 0,3894 \cdot X_4 + 1,7569 \cdot X_1 - 0,0092 \cdot X_4^2 + 0,0323 \cdot X_4 \cdot X_1 - 0,0581 \cdot X_1^2 \quad (4.5)$$

По графику видно практически равнозначное влияние на потери зерна угловой скорости решета и засоренности зернового материала. Это объясняется тем, что при увеличении угловой скорости решета происходит рост давления общего зернового слоя, на слой, контактирующий с решетом. В этом случае мелкие зерна основной культуры начинают проходить через отверстия подсевного решета. При максимальных значениях угловой скорости потери зерна достигают 0,4%.

График зависимости потерь зерна от подачи зернового материала  $X_3$  (Q) и ширины отверстия решета  $X_2$  ( $\Delta$ ) при фиксированных значениях засоренности исходного зернового материала  $X_1$  ( $C_0$ ) = 0 и угловой скорости вращения решета  $X_4$  ( $\omega_p$ ) = +1 представлен на рисунке 4.14.

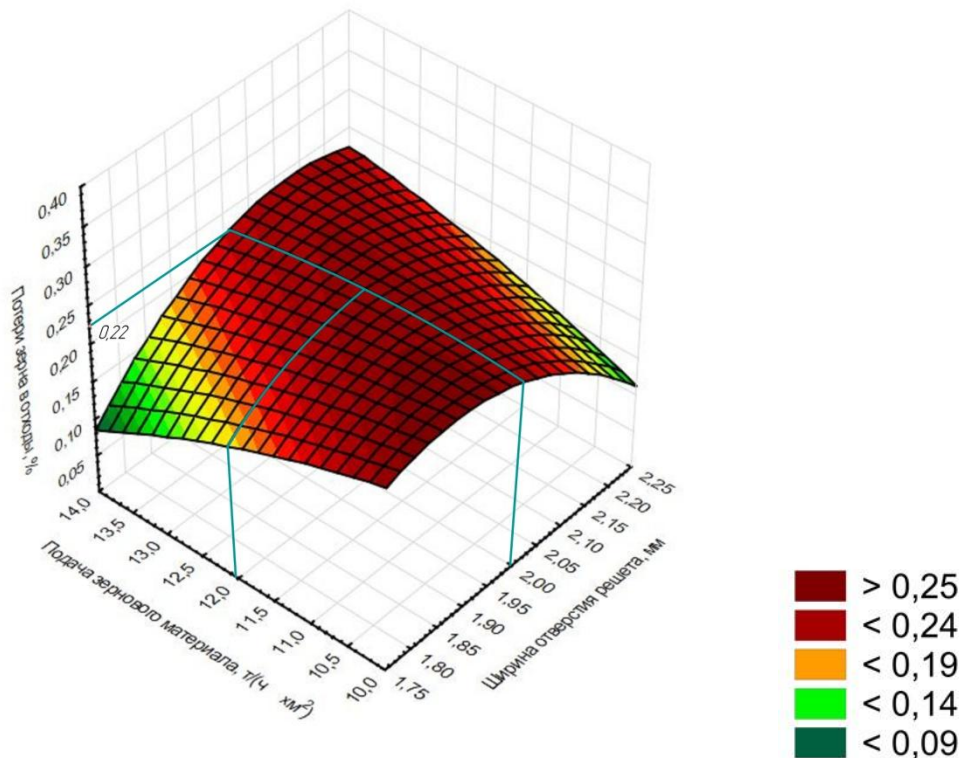


Рисунок 4.14 – Влияние подачи зернового материала Q и ширины отверстия решета  $\Delta$  на потери зерна в отходы при  $X_1 = 0$ ,  $X_4 = +1$



Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$P = -1,1579 + 2,5897 \cdot X_3 - 0,1936 \cdot X_2 - 1,05X_3^2 + 0,135X_3X_2 - 0,0034X_2^2 \quad (4.6)$$

Из графика видно, что 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.

Полученные параметры подсевного решета с внутренним пластинчатым барабаном будут использованы в макетном экспериментальном образце центробежно-решетного сепаратора с диаметром решета 600 мм.

#### **4.11 Результаты производственных испытаний центробежно-решетного сепаратора с подсевным блоком**

В уборочный период 2022 года в КФХ Щербаков С.Г. Заринского района была проведена проверка работоспособности макетного экспериментального образца центробежно – решетного сепаратора (см. рисунок 4.14). Техническая характеристика центробежно-решетного сепаратора представлена в таблице 1 приложения В.

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 подсевное решето с круглыми продольными перемычками, а барабан состоял из цилиндра с расположенными по образующей пластинами с отгибом в основании барабана по направлению его вращения.



Рисунок 4.14 – Воздушный центробежно-решетный сепаратор на  
испытаниях

Результаты производственных испытаний воздушного центробежно-решетного сепаратора в КФХ Щербаков С.Г. Заринского района представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Данные проведения хозяйственной проверки макетного образца центробежно-решетного сепаратора

№	Наименование показателя	Результаты испытаний
1	2	3
1	Обрабатываемый материал	Пшеница Алтайская 325
2	Влажность зерна, %	14,4
3	Содержание мелких примесей, %	3,73
	• сурепка	2,43
	• щирца	0,09
	• просо куриное	1,21
5	Полнота выделения легких примесей, %	73,0
6	Полнота выделения мелких примесей, %	85,4
7	Потери зерна в отходы, %	0,82

1	2	3
8	Общая эффективность очистки, %	84,2
9	Рабочая площадь решета, м <sup>2</sup>	1,2
10	Установленная мощность электродвигателей	7,0
	в том числе на привод решета, кВт	1,5
11	Угол наклона грани пластин барабана, град	0
12	Угол отгиба радиальной пластины в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, град	20
13	Шаг расстановки пластин, мм	32,0
14	Толщина активного слоя, мм	10,0
15	Размер отверстий подсевного решета, мм	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ширина отверстия: 2,0</li> <li>• длина отверстия: 25</li> </ul>	
16	Производительность машины, т/ч	30,6
17	Вес машины, кг.	1270,0
18	Удельная металлоемкость, кг/т	38,9
19	Забиваемость отверстий решета	С применением цилиндрической щетки

Центробежно-решетный сепаратор имеет наименьшую металло и энергоемкость в сравнении с машинами схожими по производительности. Вертикальное расположение подсевного решета и пластинчатого барабана делает данную машину более компактной при высокой производительности.

**Выводы по главе**

1. Экспериментально подтверждены теоретические материалы по возможности совместной работы устройства для предварительной подготовки зернового материала и подсевного решета при очистке зерна от мелких примесей. Оптимальные параметры этих рабочих органов находятся в одном интервале конструктивно-кинематических параметров и технологических режимов.

2. Центробежно-решетный сепаратор позволяет повысить эффективность очистки зерна от мелких примесей при засоренности зернового материала 4% на 10...11% за счет применения предварительной подготовки зернового материала на конической обечайке со ступенчатой поверхностью. Сепаратор устойчиво работает при обеспечении качества очистки в диапазоне засоренности 6%.

3. Обоснованы основные параметры решетного блока для очистки зерна от мелких примесей: угол раскрытия конуса обечайки со ступенчатой поверхностью  $18^\circ$ , длина ступенек 20 мм, высота ступенек 5 мм, угловая скорость решета  $15,05 \text{ с}^{-1}$ , шаг расстановки пластин барабана 32 мм, ширина отверстия, образованная круглыми продольными перемычками, составляет 2,0 мм и длина отверстия – 25 мм, удельные энергетические затраты составили 0,026 кВтч/т при линейной скорости решета 2,4 м/с.

## **Глава 5 Технико-экономическая оценка центробежно-решетного сепаратора**

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса сепарации зернового материала на воздушном центробежно-решетном сепараторе свидетельствуют о возможности его использования для очистки зерна от легких, мелких и крупных примесей. Сепаратор может работать в режиме предварительной очистки, при совместной работе кольцевого пневмосепарирующего канала и решетного блока.

Оценку экономической эффективности выполняли на основе гостированных методов экономической оценки сельскохозяйственной техники [26,27].

За базовый вариант принята машина предварительной очистки МПР-50С, включающая в себя воздушный сепаратор МПО-50С и решетный очиститель РП-50 для очистки зерна мелких примесей. Эта машина обеспечивает сопоставимое соотношение с предлагаемой конструкцией воздушного центробежно-решетного сепаратора (макетный образец работает в режиме ворохоочистителя).

Исходные данные для расчета экономических показателей новой зерноочистительной машины приняты на основе результатов исследований макетного образца сепаратора и предварительно проведенного технологического расчета.

Краткая характеристика сравниваемых машин представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Техническая характеристика сравниваемых машин

№ п/п	Показатели	Размерность	Проектируемый воздушный центробежно-решетный сепаратор ВЦР - 50	Серийная машина предварительной очистки с решетным очистителем МПР-50С
1	Производительность	т/ч	50	50
2	Годовая загрузка	ч	260	260
2	Цена машины	руб.	585018	842000
3	Установленная мощность электродвигателей	кВт	7,0	9,4
4	Количество обслуживающего персонала	чел.	1	1
5	Масса машины	кг	1270	1885

Расчет себестоимости машины определяли по типовой методике [60,61].

Расчеты произведены в ценах 2023 года.

### **5.1 Цена реализации проектируемой машины заводом-изготовителем**

Расчет ведется для изготовления штучного товара. При запуске мелкосерийного производства зерноочистительных машин стоимость центробежно-решетного сепаратора значительно уменьшится.

$$C_m = C_{изг} + П_H \quad (5.1)$$

где  $C_{изг}$  – себестоимость изготовления машины, руб.;

$П_H$  – нормативная прибыль, руб.;

5.1.1  $C_{изг}$  – себестоимость изготовления машины, руб.

$$C_{ИЗГ} = Z_M + Z_{ЗП} + Z_H \quad (5.2)$$

где  $Z_M$  – стоимость материалов,  $Z_M = 182500$  руб.;

$Z_{ЗП}$  – затраты на заработную плату, руб.;

$Z_H$  – накладные расходы, руб.;

5.1.2 Расходы на оплату труда определяются по формуле:

$$Z_{ЗП} = (T_\phi + D_m) \times K_p \times K_{отп} \times K_{соц}, \text{ руб} \quad (5.3)$$

где  $T_\phi$  – тарифный фонд, руб.;

$D_m$  – доплаты к тарифному фонду, руб.;

$K_p$  – районный коэффициент ( $K_p = 1,15 \dots 1,18$  для Алтайского края);

$K_{отп}$  – коэффициент, учитывающий отчисления на отпуск ( $K_{отп} = 1,067$ );

$K_{соц}$  – коэффициент, учитывающий отчисления на социальные нужды

( $K_{соц} = 1,26$ , согласно закону РФ № 212 – ФЗ от 24.07.2009 г.).

5.1.3 При повременной оплате труда тарифный фонд определяется по следующим формулам:

$$T_\phi = T_\psi \times t_p, \text{ руб.} \quad (5.4)$$

где  $T_\psi$  – часовая тарифная ставка, руб./час;

$T_\psi = 135$  руб. – принимается по данным предприятия: КФХ Щербаков С.Г.;

$t_p$  – количество часов затраченных на выполнение данной работы, час.

$t_p = 360$  ч.

$$T_\phi = 135 \times 360 = 48600, \text{ руб.}$$

5.1.4 Доплаты к тарифному фонду, руб.,

$$D_m = 10\% \times T_\phi. \quad (5.5)$$

$$D_m = 10\% \times 48600 = 4860, \text{ руб.}$$

$$Z_{ЗП} = (48600 + 4860) \times 1,15 \times 1,067 \times 1,26 = 82657, \text{ руб.}$$

5.1.5 Общие накладные расходы предприятия, включая электроэнергию, амортизацию и ремонт оборудования.

$$C_H = 2,5 \times Z_{ЗП}, \text{ руб.} \quad (5.6)$$

Коэффициент 2,5 берется по данным предприятия

$$C_H = 2,5 \times 82657 = 206635, \text{ руб.}$$

$$C_{ИЗГ} = 182500 + 82654 + 206635 = 471789, \text{ руб.}$$

### 5.1.6 Нормативная прибыль

$$\Pi_H = \frac{P \times \Pi_M}{100}, \text{ руб.} \quad (5.7)$$

где  $P$  – уровень рентабельности  $P=20\dots30\%$  берём  $24\%$

$$\Pi_H = \frac{24 \cdot 471789}{100} = 113229, \text{ руб}$$

$$\Pi_M = 471789 + 113229 = 585018, \text{ руб.}$$

### 5.2 Балансовая стоимость машины

$$\Pi_B = \Pi_M \times K_{\text{дос}} \times K_{\text{мон}} \times K_{\text{пн}}, \text{ руб.} \quad (5.8)$$

где  $K_{\text{дос}}$  – коэффициент учитывающий доставку зерноочистительной машины к месту монтажа,  $K_{\text{дос}} = 1,07$ ;

$K_{\text{мон}}$  – коэффициент, учитывающий затраты на монтаж в линию

$$K_{\text{мон}} = 1,15;$$

$K_{\text{пн}}$  – коэффициент, учитывающий затраты на пусконаладочные работы;

$$K_{\text{пн}} = 1,03.$$

$$\Pi_{B \text{ ВЦР}} = 585018 \times 1,07 \times 1,15 \times 1,03 = 741460 \text{ руб.}$$

$$\Pi_{B \text{ МПП}} = 842000 \times 1,07 \times 1,15 \times 1,03 = 1067163 \text{ руб.}$$

### 5.3 Годовая выработка машины

$$W_G = W \times T_G \times K, \text{ руб.} \quad (5.9)$$

где  $W$  – производительность машины за час;  $W=50$  т;

$T_G$  – годовая загрузка зерноочистительной машины,  $T_G = 260$  ч [61];

$K$  – коэффициент использования рабочего времени  $K=0,85$  [61].

Годовая выработка на машины одинакова, т.к. производительность обеих машин по 50 т, а загрузка зерноочистительного агрегата принята стандартной равной 260 часов.

$$W_G = 50 \times 260 \times 0,85 = 11050 \text{ т}$$



#### 5.4 Определение удельных эксплуатационных расходов

$$C_{уд} = Z_{зпо} + Z_A + Z_P + Z_Э, \text{ руб./т} \quad (5.10)$$

где  $Z_{зпо}$  – затраты на заработную плату оператора, руб./т;

$Z_A$  – амортизационные отчисления, руб./т;

$Z_P$  – отчисления на ремонт и ТО, руб./т;

$Z_Э$  – затраты на электроэнергию, руб./т;

5.4.1 Удельные затраты на заработную плату рассчитываются по формуле

$$Z_{зпо} = \frac{T_\phi \times K_{кач} \times K_P \times K_{отп} \times K_{соц}}{W_\Gamma}, \text{ руб./т} \quad (5.11)$$

$T_\phi$  – тарифный фонд оплаты операторов за сезон;

$K_{кач}$  – коэффициент учитывающий доплату за качество производимой продукции,  $K_{кач}=1,1$ ;

$K_P$  – районный коэффициент,  $K_P=1,15$ ;

$K_{отп}$  – коэффициент, учитывающий отчисления на отпускные,

$K_{отп}=1,067$ ;

$K_{соц}$  – коэффициент, учитывающий отчисления на социальное страхование,  $K_{соц}=1,26$ ;

#### 5.4.2 Тарифный фонд оплаты операторов за сезон

$$T_\phi = C_ч \times T_з, \text{ руб} \quad (5.12)$$

где  $C_ч$  – часовая ставка рабочего по данным хозяйства,  $C_ч=60$  руб./час;

$T_з$  – время работы оператора;

$$T_\phi = 120 \times 260 = 31200, \text{ руб},$$

для ВЦР – 50 и МПР – 50

$$Z_{зпо} = \frac{31200 \cdot 1,1 \cdot 1,15 \cdot 1,067 \cdot 1,26}{11050} = 4,8, \frac{\text{руб}}{\text{т}}$$

#### 5.4.3 Удельные амортизационные отчисления

$$Z_{AM} = \frac{H_A \cdot C_B}{100W_G}, \text{ руб./т} \quad (5.13)$$

где  $H_A$  – процент отчислений на реновацию,  $H_A = 12,5\%$

$$\text{для ВЦР – 50} \quad Z_{AVЦР} = \frac{12,5 \cdot 741460}{100 \cdot 11050} = 8,39, \text{ руб/т;}$$

$$\text{для МПР – 50} \quad Z_{AMПР} = \frac{12,5 \cdot 1067163}{100 \cdot 11050} = 12,07, \text{ руб/т.}$$

#### 5.4.4 Удельные отчисления на ремонт и техническое обслуживание

$$Z_{PM} = \frac{H_p \cdot C_B}{100W_G}, \text{ руб./т} \quad (5.14)$$

где  $H_p$  – процент отчислений на ремонт и техническое обслуживание,

$H_p = 12\%$

$$\text{для ВЦР – 50} \quad Z_{BVЦР} = \frac{12 \cdot 741460}{100 \cdot 11050} = 8,05, \text{ руб/т;}$$

$$\text{для МПР – 50} \quad Z_{BMПР} = \frac{12 \cdot 1067163}{100 \cdot 11050} = 11,59, \text{ руб/т.}$$

#### 5.4.5 Удельные затраты на электроэнергию

$$Z_{\varepsilon} = \frac{NK_{\varepsilon} \cdot C_{\varepsilon} \cdot T_G}{W_G}, \text{ руб./т} \quad (5.15)$$

где  $K_{\varepsilon}$  – коэффициент использования мощности электродвигателей,  $K_{\varepsilon} = 0,85$ ;

$C_{\varepsilon}$  – цена 1кВт×ч электроэнергии на январь 2023 г,

$C_{\varepsilon} = 5,94$  руб./кВт×ч;

$$Z_{\varepsilon \text{ ВЦР}} = \frac{7,0 \cdot 0,85 \cdot 5,94 \cdot 260}{11050} = 0,83, \text{ руб/т;}$$

$$Z_{\varepsilon \text{ МПР}} = \frac{9,4 \cdot 0,85 \cdot 5,94 \cdot 260}{11050} = 1,12, \text{ руб./т.}$$

Определение удельных эксплуатационных расходов:

для ВЦР – 50

$$C_{y\partial} = 4,8 + 8,39 + 8,05 + 0,83 = 22,07 \text{ руб/т;}$$

для МПР – 50С

$$C_{y\partial} = 4,8 + 12,07 + 11,59 + 1,12 = 29,58 \text{ руб./т.}$$

### 5.5 Удельная энергоёмкость

$$\mathcal{E} = \frac{N \times T_{\Gamma}}{W_{\Gamma}}, \text{ кВт ч/т} \quad (5.16)$$

где  $N$  – мощность, потребляемая машиной, кВт×ч

$$\mathcal{E}_{\text{ВЦР}} = \frac{7,0 \times 260}{11050} = 0,16, \text{ кВт} \times \text{ч/т};$$

$$\mathcal{E}_{\text{МГР}} = \frac{9,4 \times 260}{11050} = 0,22, \text{ кВт} \times \text{ч/т.}$$

### 5.6 Удельная металлоёмкость

$$M = \frac{M}{W_{\Gamma}}, \text{ кг/т} \quad (5.17)$$

где  $M$  – масса машины, кг

$$M_{\text{ВЦР}} = \frac{1270}{11050} = 0,11, \text{ кг/т};$$

$$M_{\text{МГР}} = \frac{1885}{11050} = 0,17, \text{ кг/т.}$$

### 5.7 Расчет удельной трудоемкости работы машин

$$T = \frac{C_p T_{\Gamma}}{W_{\Gamma}}, \text{ чел} \times \text{час/т} \quad (5.18)$$

где  $C_p$  – число обслуживающих рабочих,  $C_p = 1$  человек;

$$T_{\text{ВЦР}, \text{МГР}} = \frac{1 \times 260}{11050} = 0,23, \text{ чел} \times \text{час/т.}$$

### 5.8 Удельные капиталовложения на единицу работы

$$Y = \frac{C_{\text{Б}}}{W_{\Gamma}}, \text{ руб./т} \quad (5.19)$$

$$Y_{\text{ВЦР}} = \frac{741460}{1105} = 67,1, \text{ руб/т};$$

$$Y_{\text{МПР}} = \frac{1067163}{1105} = 96,6, \text{ руб/т}.$$

## 5.9 Совокупные затраты денежных средств на единицу работы

$$Z_{\text{СОВ.ТЕХ}} = Z_{\text{СОВ}} \times W_{\Gamma} \quad (5.20)$$

где  $Z_{\text{СОВ}}$  – совокупные затраты денежных средств на выполнение единицы наработки;

5.9.1 Совокупные затраты денежных средств на выполнение единицы наработки

$$Z_{\text{СОВ}} = Z_{\text{ЭКС}} + I_{\text{ПОВ}} + I_{\text{ОК.С.}} \quad (5.21)$$

где  $Z_{\text{ЭКС}}$  – прямые эксплуатационные затраты денежных средств, приходящиеся на выполнение единицы наработки;

$I_{\text{ПОВ}}$  – издержки денежных средств от повреждения сельскохозяйственной продукции;

$I_{\text{ОК.С.}}$  – издержки денежных средств на охрану окружающей среды;

5.9.2 Прямые эксплуатационные затраты денежных средств, приходящиеся на выполнение единицы наработки

$$Z_{\text{ЭКС}} = Z_{\text{ЗП}} + Z_{\text{Э}} + Z_{\text{Р}} + Z_{\text{А}}, \text{ руб/т.} \quad (5.22)$$

$$Z_{\text{ЭКС ВЦР}} = 82,66 + 0,83 + 1,50 + 8,39 = 93,38, \text{ руб/т.};$$

$$Z_{\text{ЭКС МПР}} = 82,66 + 1,12 + 1,50 + 12,07 = 97,35, \text{ руб/т}.$$

5.9.3 Издержки денежных средств от повреждения сельскохозяйственной продукции

$$I_{\text{ПОВ ВЦР}} = 0,01 Y_{\text{СХ}} X_{\text{Д}} (Ц_{\text{СХ}} - Ц_{\text{Д}}), \text{ руб/ч} \quad (5.23)$$

где  $Y_{\text{СХ}}$  – урожайность сельскохозяйственной продукции на осень 2022 года,

$$Y_{\text{СХ}} = 2,81 \text{ т/га [64];}$$

$X_{\text{Д}}$  – повреждение сельскохозяйственной продукции,

$$X_{\text{Д ВЦР}} = 0,5 \%, X_{\text{Д МПР}} = 1,1 \% [89];$$

$\text{Ц}_{\text{СХ}}$  – рыночная цена полноценной сельскохозяйственной продукции на январь 2023 года,

$$\text{Ц}_{\text{СХ}} = 11104 \text{ руб/т [64];}$$

$\text{Ц}_{\text{д}}$  – рыночная цена поврежденной сельскохозяйственной продукции на январь 2023 года,

$$\text{Ц}_{\text{д}} = 8636 \text{ руб/т [64].}$$

$$\text{И}_{\text{ПОВ ВЦР}} = 0,01 \times 2,81 \times 0,5(11104 - 8636) = 34,68 \text{ руб/ч}$$

$$\text{И}_{\text{ПОВ МПР}} = 0,01 \times 2,81 \times 1,1(11104 - 8636) = 75,29 \text{ руб/ч}$$

#### 5.9.4 Издержки денежных средств на охрану окружающей среды

$$\text{И}_{\text{ОК.С.}} = \text{Э}_{\text{ВЦР}} \times \text{Н}_{\text{ОК.С.}}, \text{ руб/ч} \quad (5.24)$$

где  $\text{Н}_{\text{ОК.С.}}$  – норма отчислений на охрану окружающей среды за выброс в атмосферный воздух загрязняющих веществ,

$$\text{Н}_{\text{ОК.С.}} = 36,6 \text{ руб/кг [78];}$$

$$\text{И}_{\text{ОК.С. ВЦР}} = 0,16 \times 36,6 = 5,86 \text{ руб/ч;}$$

$$\text{И}_{\text{ОК.С. МПР}} = 0,22 \times 36,6 = 8,05 \text{ руб/ч;}$$

$$\text{З}_{\text{СОВ ВЦР}} = 93,38 + 34,68 + 5,86 = 133,92 \text{ руб/т;}$$

$$\text{З}_{\text{СОВ МПР}} = 97,35 + 75,29 + 8,05 = 180,69 \text{ руб/т;}$$

$$\text{З}_{\text{СОВ.ТЕХ ВЦР}} = 133,92 \times 11050 = 1479816 \text{ руб/т;}$$

$$\text{З}_{\text{СОВ.ТЕХ МПР}} = 180,69 \times 11050 = 1996625 \text{ руб/т.}$$

### 5.10 Годовая экономия совокупных затрат денежных средств от внедрения предлагаемой зерноочистительной машины ВЦР – 50

$$\text{Э}_{\Gamma} = (\text{З}_{\text{СОВ.ТЕХ МПР}} - \text{З}_{\text{СОВ.ТЕХ ВЦР}}) \quad (5.25)$$

$$\text{Э}_{\Gamma} = (1996625 - 1479816) = 516809 \text{ руб.}$$

### 5.11 Экономия капиталовложений в связи с внедрением новой машины

$$\pm \text{Э} = \text{Ц}_{\text{Б Баз}} - \text{Ц}_{\text{Б Нов}} \frac{W_{\text{ГН}}}{W_{\text{ГБ}}}, \text{ руб.} \quad (5.26)$$

где  $C_{Б\text{ Баз}}$  – стоимость базового агрегата;

$C_{Б\text{ Нов}}$  – стоимость нового агрегата;

$W_{ГН}$  – годовая выработка новой машины;

$W_{ГБ}$  – годовая выработка базовой машины.

При условии одинаковой загрузки машин

$$\Theta = 1067163 - 741460 = 325703, \text{ руб.}$$

Результаты расчета представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Основные технико-экономические показатели машин

№ п/п	Показатели	Размерность	Проектируемый воздушный центробежно- решетный сепаратор	Серийная машина МПР – 50С
1	2	3	4	5
1	Балансовая стоимость машин	руб	741460	1067163
2	Годовая выработка	т	11050	11050
	Удельные затраты:			
3	на заработную плату	руб/т	4,8	4,8
4	на электроэнергию	руб/т	0,83	1,12
5	на амортизационные отчисления	руб/т	8,39	12,07
6	на ремонт и техническое обслуживание	руб/т	8,05	11,59
7	на эксплуатационные расходы	руб/т	22,07	29,58
8	Удельные капиталовложения	руб/т	67,10	96,60
9	Совокупные затраты	руб./т	1479816	1996625
10	Удельная металлоемкость	кг/т	0,11	0,17
11	Удельная энергоемкость	кВт ч/т	0,16	0,22

1	2	3	4	5
12	Годовая экономия совокупных затрат денежных средств	руб.	516809	-
13	Экономия капиталовложений	руб.	325703	-

**Общие выводы**

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.

## Список литературы

1. Абдуєва, Ф. М. Обґрунтування параметрів процесу і розробка решіт для вібровідцентрового сепарування насіння кукурудзи [Текст]: Автореферат... к. техн. наук, спец.: 05.05.11 - машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Ф. М. Абдуєва. — Х.: Харківський нац. техн. ун-т сільського господарства ім. Петра Василенка, 2010. — 20 с.
2. Авдеев, Н.Е. Центробежные сепараторы для зерна [Текст]. - М.: Колос, 1975. - 151 с.
3. Андреев В.Л., Шилин В.В. Актуальность разработки пневмосистемы для виброцентробежного сепаратора / Совершенствование технических средств для механизации сельскохозяйственных процессов: Сб. тр. НИИСХ Северо-Востока. – Киров, 2000. – С. 59–63.
4. Анискин, В.И. Возродить отечественную базу машинной обработки зерна и подготовки семян [Текст] / В.И. Анискин, Э.В. Жалнин, А.Н. Зюлин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1999. - №12. - С.9 - 11.
5. Бабченко, В.Д. Высокопроизводительные машины для очистки зерна: обзорная информация [Текст] / В.Д. Бабченко, А.М. Корн, А.С. Матвеев; ВАСХНИЛ. - М., 1982. - 50 с.
6. Беляев, В.И. Результаты исследования влияния основных параметров подсевного решета на эффективность работы центробежно-решетного сепаратора [Текст] / В.И. Беляев, Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов // Вестник АГАУ. -2006.- Вып. №2 (22).- С.49-54.
7. Болтенков, А.А. Методические указания по выполнению экономического раздела дипломного проекта по направлению «Агроинженерия» [Текст] / А.А. Болтенков, М.В. Жуков. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. – 155 с.
8. Борисова, Л. В. Интенсификация процесса сепарации зернового вороха обогащением струйными воздушными потоками в зерноуборочных

- комбайнах [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Л.В. Борисова. - зерноград, 2001. - 19с.
9. Бочкарев, А.И. Виброцентрифугирование зерновых смесей [Текст] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1959. - №1. - С.9 - 13.
10. Бурков, А.И. Зерноочистительные машины. Конструкция, исследования, расчет и испытание [Текст] / А.И. Бурков, Н.П. Сычугов. – Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. – 261 с.
11. Бурков, А. И. Универсальный пневматический сепаратор [Текст] / А.И. Бурков, О.П. Рощин // Земледелие. - 2002. - №4. - С.31 - 32.
12. Бурков А.И., Андреев В.Л., Шилин В.В. Разработка пневмосистемы для виброцентробежной машины МЗП-25/10 и ее использование при реконструкции семяочистительной линии // Inżynieria Systemow Bioagrotechnicznych: Zeszyt 2–3 (11–12). – Plock, 2003. – P. 147–157.
13. Васильковский, М.И. Повышение эффективности сепарации зерна на быстровращающемся цилиндрическом решете [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – 05.20.01. – Воронеж, 1987. – 24 с.
14. Вибрационно-центробежный сепаратор [Текст]: а.с. 1479140 А1 СССР, / Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, С.В. Проценко, Н.В. Солоновский. – №4311385/29-03; заявл. 01.10.87; опубл. 15.05.89, Бюл. №18.
15. Вигдочик, Е.М. Математическое моделирование непрерывных процессов растворения / Е.М. Вигдочик, А.Б. Шейнин. – Л.: Химия, 1971. - 248 с.
16. Волынкин, В.В. Повышение эффективности процесса отделения крупных примесей из зернового вороха скальператором [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.В. Волынкин. - Челябинск, 2007. – 22 с.
17. Ворошилов, А.И. Коэффициенты трения семян об опорную поверхность [Текст] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1979. - №10. - С.12-14.
18. Гаршин, В.С. Комплексный показатель свойств зерносмеси для оценки результата решетной сепарации [Текст] // Совершенствование

технологии и организации уборки и послеуборочной обработки зерна: сб. науч. тр. / СО. ВАСХНИЛ. - Новосибирск, 1983. - С.146-151.

19. Гончаров, Е.С. Механико-технологическое обоснование и разработка универсальных виброцентробежных зерновых сепараторов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е.С. Гончаров; ВИМ. - М., 1986. - 34 с.

20. Гончаров, Е.С. Очистка отверстий цилиндрических центробежно-вибрационных решет [Текст] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1966. - №3. - С.49 - 50.

21. Гончаров, Е.С. Универсальные виброцентробежные зерновые сепараторы [Текст] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 1984. - №1. - С. 15-17.

22. Гортинский, В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях [Текст] / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. - М.: Колос, 1973. -295 с.

23. Гортинский, В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях [Текст] / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. -2-е изд., перераб. и доп.– М.: Колос, 1980. - 304 с.

24. Горячкин, В.П. Собрание сочинений [Текст]: в 3-х томах. - М.: Колос, 1965. - Т. 1.- С. 244-253; С. 1-437.

25. Гольдин, Е.М. О движении материальной точки внутри быстровращающегося конуса [Текст] / Е.М. Гольдин. – М.: изд. АН СССР, 1955. 36 с.

26. ГОСТ 34393-2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – Введ. 2018-03-30. – М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.

27. ГОСТ Р 53056-2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – Введ. 2008-12-17. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.

28. Демский, А.Б. Пневматическое сепарирование на зерноперерабатывающих предприятиях [Текст] / А.Б. Демский // - М., 1972. - С. 18-26.
29. Демин, Г.С. Влияние нагрузки и состава исходного материала на эффективность работы сит при очистке зерновых смесей [Текст] / Г.С. Демин, А.Р. Демидов // Тр./ ВНИИЗ. - М., 1954.- Вып. 27. - С. 217-235.
30. Донцов, Н.С. Исследование влияния влажности на показатели процесса сепарации зернового вороха в пневмоканале машины предварительной очистки (МПО) [Текст] / Н.С. Донцов, Н.П. Погорелов // Вестник ДГТУ. - 2008. - Т.8., №2(37). - С.137 – 140.
31. Дринча, В.М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки [Текст]. - Воронеж: НПО «МОДЭК», 2006.- 384 с.
32. Евграфов, В.А. Вероятностная оценка структуры дисперсной среды. [Текст] / В.А. Евграфов // Инженерно-физический журнал №10, 1964. – с. 121-127.
33. Ермольев, Ю.И. Интенсификация технологических операций в воздушно-решетных зерноочистительных машинах [Текст] / ДГТУ. - Ростов н/Д, 1998. - 496 с.
34. Ермольев, Ю.И. Исследование очистки пшеницы решетом со сплошной щелью в желобках, образованных угловыми гофрами [Текст] // Тр. / ЧИМЭСХ. - Челябинск, 1972. - Вып. 69. - С. 93-99.
35. Зверков, Р.А. Интенсификация технологического процесса сепарации зерна на зерноочистительной машине с цилиндрическими качающимися решетками [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Р.А. Зверкова. - Новосибирск, 2007. – 16 с.
36. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов [Текст]. - 2-е изд. перераб. и доп. - М., Машиностроение, 1964. – 216 с.
37. Зильбернагель, А.В. Интенсификация процесса сепарации зерна на плоских решетках с продолговатыми отверстиями, расположенными под

углом [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.20.01. / А.В Зильбернагель-Новосибирск, 2005. - 16 с.

38. Иванов, Н.М. Сепарация зерна на конических решетках с профилированной поверхностью [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / Н.М. Иванов. - Новосибирск, 1988. - 16 с.

39. Иванов, Н.М. Сепарация зерна на конических решетках с профилированной поверхностью [Текст]: дис. канд. техн. наук. - Новосибирск, 1988. - 171 с.

40. Как избежать повреждения семян при очистке? [Применение сварных проволочных решет и рациональной установки плоских штамповочных решет] [Текст] / И.А. Пехальский, В.М. Дринча, М.В. Пехальская // Тракторы и с.-х. машины. -1997. -N 7.-С. 23.

41. Каталог продукции ОАО ГСКБ "Зерноочистка" [Текст]. - Воронеж: Изд-во ОАО "Издательско-полиграфическая фирма "Воронеж" 2010. – 58 с.

42. Карташевич, С. М. Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян (теория, расчет, результаты проектирования и испытаний технологических комплексов) [Текст]: монография / С.М. Карташевич. - Минск, 2001. - 287с.

43. Ким, Р.А. Экспериментальные исследования процесса сепарирования зерновых смесей коническими ступенчатыми центрифугами [Текст] / Р.А. Ким, В.Т. Яковлев // Тр. / АСХИ. - 1966. - Вып. 7. – С. 57-68.

44. Климок, А.И. Экспериментальные исследования процесса движения частицы на решетке [Текст] / А.И. Климок, Н.М. Иванов // Совершенствование технологии и организации уборки и послеуборочной обработки зерна: сб. науч. тр. / ВАСХНИЛ СО. - Новосибирск, 1983. - С. 71-78.

45. Коваль, В.С. Интенсификация процесса сепарации зерна на качающихся решетках с цилиндрической поверхностью с прямоугольными отверстиями, расположенными под углом к образующей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.С. Коваль. - Новосибирск, 2010. - 19 с.

46. Кожуховский, И.Е. Зерноочистительные машины [Текст]. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.
47. Коноплин, А.Н. Совершенствование процесса центробежной сепарации сыпучих материалов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Коноплин. - Воронеж, 2008. – 20 с.
48. Кретинин, К.М. Разработка нетрадиционной технологии и прогрессивного оборудования для сепарации сыпучих материалов [Текст] / К.М. Кретинин, Г.В. Серга // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XIII междунар. науч.-технич. конф. (Севастополь, 11-16 сентября 2006 г.): в 5-и томах. - Донецк: ДонНТУ, 2006. Т.2.- С. 217-220.
49. Кузьмин, М.В. Определение режимов работы гибкого цилиндрического решета обратной кривизны [Электронный ресурс] / М.В. Кузьмин, В.Ю. Чурюмов // Вестник РГАЗУ. - 2007. - Вып.№2. Режим доступа к журналу: <http://www.rgazu.ru>
50. Кулагин, М.С. Механизация послеуборочной обработки и хранения зерна и семян [Текст] / М.С. Кулагин, В.М. Соловьев, В.С. Желтов. – М.: Колос, 1979. – 256 с.
51. Кубышев, В.А. Исследование ориентирующей способности плоского решета с продолговатыми отверстиями [Текст] / В.А. Кубышев, П.Н. Лапшин, А.И. Климок // Науч.-техн.бюл. / ВАСХНИЛ, СО. – Новосибирск, 1978. - с. 3-12.
52. Леканов, С.В. Методика оценки эффективности очистки зерна на подсевном решете в центробежно-решетном сепараторе [Текст]// Вестник АГАУ. - 2004. - Вып. №2 (14). - С. 148 - 150.
53. Леканов, С.В. Обоснование параметров цилиндрического подсевного решета с внутренним пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора с вертикальной осью вращения [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.В. Леканов. - Барнаул, 2006. – 23 с.
54. Леканов, С.В. Обоснование параметров цилиндрического подсевного решета с внутренним пластинчатым барабаном центробежно-решетного

сепаратора с вертикальной осью вращения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С.В. Леканов. - Барнаул, 2006. - 145 с.

55. Леканов, С. В. К вопросу классификации способов предварительной подготовки зернового материала [Текст] / С.В. Леканов, Н.И. Стрикунов, С.А. Черкашин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 4 (114), 2014. - С. 142-148.

56. Лузан, П.Г. Обгрунтування параметров и режимов работы инерционно-гравитационного решетчатого сепаратора зерна [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / П.Г. Лузан. – Кировоград, 2001. – 19 с.

57. Машина для разделения зерновой смеси по размерам [Текст]: А.с. 239703 СССР МКИ<sup>2</sup> А 01 в 7/44, В 07 В 18/50 / Б.Т. Тарасов. - № 824077/30-15; заявл. 09.03.63; опубл. 18.03.69, Бюл. № 11.

58. Машина предварительной очистки с решетной приставкой МПР – 50 руководство по эксплуатации [Текст]. – Воронеж: Изд-во ОАО ГСКБ "Зерноочистка" 2001. – 22 с.

59. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов [Текст] / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин. - 2-е изд., перераб. и доп.- Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1980. – 168 с.

60. Методика определения оптовых цен на новые сельскохозяйственные машины [Текст]. - М.: Прейскурантгиз, 1979. - 239 с.

61. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [Текст] / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Российской Федерации. - М., 1998. - 219 с.

62. Механизация подготовки и хранения семян: сборник переводов и обзоров зарубежной литературы [Текст] / под ред. Н.Н. Ульриха. – М.: Изд-во сельскохозяйственной литературы, журналов и плакатов,- 1962. – 470 с.



63. Минаев, В.Н. Выбор критерия оптимизации процесса очистки и сортирования зерна [Текст] / В.Н. Минаев, И.А. Сидоров // Науч.-техн.бюл. / ВИМ. - М., 1973.- С. 14-17.
64. Мониторинг развития сельского хозяйства Алтайского края (за январь 2023 года). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://altagro22.ru/activity/analytics/monitoring-razvitiya-selskogo-khozyaystva-altayskogo-kraya-za-yanvar-2023-goda/>.
65. Непомнящий, Е.А. Применение теории случайных процессов к определению закономерности сепарирования сыпучих смесей [Текст] // Проблемы сепарирования зерна и других сыпучих материалов: сб. науч. тр. / ВНИИЗ. - М., 1963.- Вып. 42. - С. 47-56.
66. Непомнящий, Е.А. Расчет извлечения мелких частиц из сепарируемой смеси при равномерном начальном распределении [Текст] // Тр. / ВНИИЗ. - М., 1963.- Вып. 48. - С. 97 - 104.
67. Несиков, А.А. Исследование процесса очистки семян зерновых культур от длинных примесей в виброцентробежном сепараторе [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. - Воронеж, 1986. - 23 с.
68. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Ф.С. Новиков, Я.Б. Арсов. - М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. - 304 с.
69. Очиститель виброцентробежных решет [Текст]: а.с. 986516 СССР М.Кл, В 07 В 1/50. / П.М. Заика, Д.И. Мазоренко, Л.Н. Тищенко, А.И. Рябков, А.К. Евсеева, Н.В. Слоновский.- 3319938/29-03; заявл. 09.07.81; опубл. 07.01.83, Бюл. №1.
70. Очиститель отверстий виброцентробежных решет [Текст]: а.с. 307819 А СССР МПК, В07b1/26. / Е.С. Гончаров, Н.И. Волошин. - №1395811/30-15; заявл. 04.11.70; опубл. 19.01.72, Бюл. № 14.
71. Папин, Б.Д. Методология детерминированно-статистического моделирования процессов сепарации [Текст]// Электротехнологические методы и установки в с.-х. пр-ве. - Челябинск, 1989. - С. 5-21.

72. 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.
73. Патрин В.А. Графический метод выбора режимов работы вертикальных цилиндрических виброрешет [Текст] / В.А. Патрин, А.В. Патрин, В.А. Крум // Вестник ТГСХА. - 2009. - Вып. №3 (10).- С. 138-140.
74. Патрин В. А. Определение оптимальных режимов работы вертикальных цилиндрических виброрешет графическим способом/В. А. Патрин, А. В. Патрин, В. А. Крум // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2009, N N 8. -С.11-12;
75. Перспективные типы центробежных и гравитационных сепараторов. Теория и анализ конструкций [Текст] / Н.Е. Авдеев, А.В. Некрасов, С.Б. Резуев, Ю.В. Чернухин. – Воронеж: Воронеж. гос. университет, 2005. – 637 с. – (Сер. «Техника XXI века»).
76. Платонов, П.Н. Физико-механические свойства зерна как сыпучего тела [Текст] // Пищевое машиностроение: сб. науч.-тех. инфор. - М., 1959.- №14-15.- С. 3-15.
77. Полуэктов, Н.И. К вопросу сепарирования семенных смесей центрифугированием [Текст] // Тр. / Благовещен. с.-х. ин-т. - Благовещенск, 1961. - Т.2. - С. 145-153.
78. Постановление Правительства РФ от 20.05.2022 №913 «Об утверждении Положения о федеральной государственной информационной системе учета твердых коммунальных отходов» // Собрание законодательства РФ. – 24.12.2022. - №52 Ст. 913.
79. Прилуцкий, А. Н., Экспериментальные исследования процесса распределения зерновой смеси по периметру кольцевого пневмосепарирующего канала усовершенствованным дозирующе-питающим устройством [Текст] / А. Н. Прилуцкий, С. П. Степаненко и др. // Механізація

та електрифікація сільського господарства: [загальнодержавний збірник]. — 2016. — Випуск № 3 (102) / [ННЦ «ІМЕСГ»]. — Глеваха, 2016. - С.59–68.

80. Прилуцький, А. Н. Механіко-технологічні обґрунтування операцій технологічного процесу пневмовихрового сепарувального пристрою [Текст] / А. Н. Прилуцький // Механізація та електрифікація сільського господарства: т [загальнодержавний збірник]. — 2015. — Випуск № 2 (101) / [ННЦ «ІМЕСГ»]. — Глеваха, 2015. - С.99–107.

81. Пугачев, В.И. Обоснование модели процесса просеивания семян через отверстия виброцентробежного решета [Текст] / В.И. Пугачев // Вісн. Харків. держ. техн. ун-ту сіл. госп-ва. – 2000. – Вип.1. – с.296-309.

82. Саитов, В.Е. Совершенствование технологического процесса воздушно-решетных зерно- и семяочистительных машин [Текст]: рекомендации. - Киров: Вятская ГСХА, 2008. - 89 с.

83. Сельскохозяйственные машины. Теория, конструкция и расчет [Текст] / Б.Г. Турбин, А.Б. Лурье А.Б., Григорьев. - М.; Л.: Машгиз, 1963. - 575 с.

84. Семенов, В.А. Процесс сепарирования в центробежном сепараторе с пульсирующим изменением скорости: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.18.12 / Семенов Виктор Александрович. – Краснодар. – 2012.-23 с.

85. Слепов, А.П. Исследование процесса разделения зерновой смеси центрофугованием в сочетании с потоком воздуха (пневмоцентрифугование) [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.П. Слепов. - Волгоград. - 1984.- 19 с.

86. Слипченко М.В. К производственным испытаниям ворохоочистителя СВС- 15 с разработанным пневмосепарирующим устройством / М.В. Слипченко // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСХ ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2009. – Вип. 88. – С. 88-95.

87. Слипченко, М. В. Аналіз факторів, що впливають на швидкості сходу зернової та домішкової фаз з тарілчастого розкидача вібровідцентрового

сепаратора [Текст] / М. В. Сліпченко, М. В. Півень // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. — 2015. — Вип. 157. — С. 106–113.

88. Совершенствование конструкции шариковой очистки [Текст] / А.П. Тарасенко [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. - 2008. -№4. – С.41-43.

89. Современные машины для послеуборочной обработки зерна и семян: учебное пособие для вузов [Текст] / Тарасенко А.П. - М.: КолосС, 2008. - 232 с.

90. Сортировочная машина центробежного действия [Текст]: а.с. 76188 А1 СССР (51) МПК<sup>6</sup> В07В1/08. / Н.А. Фетисов. - № 373000; заявл. 21.01.48; опубл. 31.08.49.

91. Способ разделения зерновой смеси [Текст]: а.с. 1371717 А1 СССР М.Кл<sup>3</sup>, В 07 В 1/00 / Б.Л. Вихоронов. - №3999165/29-03; заявл. 02.01.86; опубл. 07.02.88, Бюл. №5.

92. Способ сортирования и устройство для его осуществления [Текст]: пат. № 2242862 Российская Федерация С1 МПК, А01F12/44, В07В1/22 / Л.Н. Бурков. - №2003125818/12; заявл. 21.08.2003; опубл. 27.12.2004, Бюл. №28.

93. Способ и устройство Буркова Л.Н. для очистки сортировальных решет [Текст]: пат. RU 2376747 С1 / Бурков Л.Н. - № 2008140654/12; заявка 13.10.2008, опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.

94. Способ и устройство Буркова Л.Н. для очистки сортировальных решет [Текст]: пат. RU 2377762 С1 / Бурков Л.Н. - № 2008143167/12, заявка 30.10.2008, опубл. 10.01.2010, Бюл. № 1.

95. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин [Текст]: в 2-х томах. / под ред. А.В. Красниченко. - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. - Т.2.- 862 с.

96. Степаненко, С.П. Механіко-технологічне обґрунтування операцій технологічного процесу пневмовихрового сепарувального пристрою / С.П.

Степаненко, А.Н. Прилуцкий, І.С. Попадюк // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. -2017.-№258.-С.69-80.

97. Степаненко С. П. Експериментальні дослідження процесу очищення зерна в пневмовібровідцентровому сепараторі з удосконаленою аспіраційною камерою [Текст] / С. П. Степаненко, В. О. Швидя // Вібрації в техніці та технологіях. — 2012. — № 3. — С. 129–133.

98. Стрикунов, Н.И. Испытания воздушного центробежно-решетного ворохоочистителя с подсевным решетом в хозяйственных условиях [Текст] / Н.И. Стрикунов, Б.Т. Тарасов, С.В. Леканов // Аграрная наука - сельскому хозяйству: сб. тр. междунар. науч.- практ. конф.: в 3 кн. - Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006.- Кн. 2. – С. 290-293.

99. Стрикунов, Н.И. Очистка зерна центробежно-решетным сепаратором с предварительной подготовкой на делительном решете [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н. И. Стрикунов. - Новосибирск, 1989. - 18 с.

100. Стрикунов, Н.И. Очистка зерна центробежно-решетным сепаратором с предварительной подготовкой на делительном решете [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Н. И. Стрикунов. - Новосибирск, 1989. - 188 с.

101. Стрикунов, Н.И. Очистка зерна и семян. Машины и технологии [Текст]: учебное пособие / Н.И. Стрикунов, В.И. Беляев, Б.Т. Тарасов. - Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. - 131 с

102. Стрикунов, Н.И. Пути совершенствования подсевного решета центробежно-решетного сепаратора [Текст] / Н.И. Стрикунов, Б.Т. Тарасов, С.В. Леканов // Аграрная наука - сельскому хозяйству: сб.тр междунар. науч. – практ. конф.: в 3 кн. - Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006.- Кн. 2. – С. 293-296.

103. Стрикунов, Н.И. Техническое состояние мехтоков и перспективы их совершенствования [Текст] / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов // Агровестник Алтая. – 2009. - №.6(60) – С. 16.

104. Стрикунов, Н.И. Обоснование технологической схемы центробежно-решетного сепаратора / Н.И. Стрикунов, Б.Т. Тарасов // Совершенствование

технологических процессов и машин при уборке зерновых культур в Западной Сибири: Сб. научн. тр. Алт. с.х. ин-т.- Барнаул. - 1987.- С.34-38.;

105. Стрикунов, Н.И. Эффективность работы центробежно-решетного сепаратора с предварительной подготовкой зернового материала / Н.И. Стрикунов, Б.Т. Тарасов // Технологии и комплексы машин для уборки зерновых культур и семенников трав в Сибири: Сб. научн. тр. ВАСХНИЛ, Сиб. отд.-е.- Новосибирск. - 1989.-С.60-67.;

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

107. Стрикунов, Н. И. Кинематические и энергетические характеристики центробежно-решетного сепаратора [Текст] / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков // Вестник АГАУ № 6 (188). - 2020.- С. 150-156;

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

109. Стрикунов, Н.И. Расчет основных параметров и режимов работы блока цилиндрических решет центробежно-решетного сепаратора [Текст] / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков, М.Е. Микитюк // Вестник АГАУ. -2021.- №1(195). – с. 96 – 101;

110. Сычуглов Н. П., Сычуглов Ю. В.2004106191/13. Центробежно-пневматический сепаратор для очистки зернового материала /; заявл. 02.03.2004; опубл. 20.12.2005, Бюл. № 35, 6 стр.

111. Тарасенко, А.П. Новый центробежный сепаратор с коническими рабочими органами [Текст] / А.П. Тарасенко, А.Н. Коноплин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007.- №12. – С. 6-8.

112. Тарасов, Б.Т Исследование процесса сепарации зерна по длине вертикальными цилиндрическими решетками при ориентации зерен в активном слое [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.410 / Б.Т. Тарасов. - Л.: Пушкин, 1971. - 30 с.

113. Тарасов, Б.Т. К теории процесса сепарации зерновых смесей виброрешетками [Текст] // Тр. / Алт. с.-х. ин-т. - 1966. - Вып. 7. - С. 9-16.
114. Тарасов, Б.Т. Обоснование технологической схемы центробежно-решетного сепаратора [Текст] / Б.Т. Тарасов, Н.И. Стрикунов // Совершенствование технологических процессов и машин при уборке зерновых культур в Западной Сибири: сб. науч. тр. / Алт. с.-х. ин-т. - Барнаул, 1987. - С. 34 - 48.
115. Тарасов Б.Т. Основные параметры процесса сепарирования зерна на подсевном решете в центробежно-решетном сепараторе [Текст] / Б.Т. Тарасов, Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов // Вестник АГАУ. - 2004. - Вып. №2 (14).- С. 143-147.
116. Тарасов, Б.Т. Процесс сепарации на подсевном решете с пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора с вертикальной осью вращения [Текст] / Б.Т. Тарасов, Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. - 2009.- № 7. - С. 69-77.
117. Тарасов, Б.Т. Исследование процесса сепарации зерна по длине вертикальными цилиндрическими решетками при ориентации зерен в активном слое [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Б.Т. Тарасов. - Барнаул, 1970. - 164 с.
118. Терсков Г.Д. О влиянии основных факторов на пропускную способность решет с круглыми отверстиями // Тр. / ЧИМЭСХ. - 1958. - Вып. 6. - С. 33-94.
119. Терсков, Г.Д. Расчет зерноуборочных машин [Текст]. - М.; Свердловск: Машгиз, 1961. – 214 с.
120. Тиц, З.Л. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Теория и расчет машин, технология и автоматизация процессов [Текст]. - М.: Машиностроение, 1967. - 448 с.
121. . Тищенко Л.Н. Моделирование процессов зерновых сепараторов. [Текст]: моногр. / Л. Н. Тищенко, Дмитрий Иванович Мазоренко, М. В.

- Пивень, С. А. Харченко, В. В. Бредихин, А. В. Мандрыка; ХНТУСГ им. П.Василенко. - Х.: Міськдрук, 2010. - 359 с.
122. Тищенко, Л. Н. Колебания зерновых потоков на виброрешетах [Текст]: [монография] Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский. - Харьков: "Міськдрук" 2012. - 267 с.
123. Тищенко, Л. Н. Результаты производственных испытаний зернового сепаратора А1-БЦСМ-100 с разработанными решетками [Текст]: сборник научных трудов / Л. Н. Тищенко, М. В. Пивень, С. А. Харченко, В. В. Бредихин. — // Вісник Харківського нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. Техн. науки / ХНТУСГ. — Х., 2013. — Вип. 135: Механізація с.-г. вир-ва. — С. 9–15.
124. Тищенко, Л. Н. К составлению уравнений динамики зерновой смеси на тарельчатом разбрасывателе виброцентробежного сепаратора [Текст] / Л. Н. Тищенко, М. В. Слипченко // Конструювання, вир-во та експлуатація с.-г. машин: загальнодерж. міжвід. наук. - техн. зб. — Кіровоград: КНТУ, 2011. — Вип. 41, Ч. I. — С. 62–67.
125. Ткачев, В.В. О новой конструкции механизма очистки решет лесных семяочистительных машин [Текст] / В.В. Ткачев // Региональный вестник молодых ученых. - 2004.-№3.- С. 53-57.
126. Торопов, В.Р. Исследование работы цилиндрического решета планетарной сортировки [Текст] // Тр. / ВИМ. - М., 1974.- Т. 65.- С. 111-118.
127. Устройство для разделения сыпучих материалов [Текст]: А.с. 415053 А1 СССР МПК В07В1/22 / И. Е. Авдеев. – 1768528/28-13; заявл. 04.04.1972; опубл. 15.02.1974, Бюл. №6
128. Федоренко, И.Я. К вопросу классификации центробежных сепараторов для очистки зерна [Текст] / И.Я. Федоренко, С.В. Леканов, А.А. Хижников // Аграрная наука — сельскому хозяйству: сборник статей V Междунар. науч.- практ. конф. (Барнаул, 17-18 марта 2010 г.). Барнаул: Изд-во АГАУ, 2010. Кн. 2.- С. 535-538.



129. Федоренко, В.Ф. Машины и оборудование для послеуборочной обработки и хранения зерна и семян [Текст] / В.Ф. Федоренко, Д.С. Буклагин, В.Я. Гольдяпин, А.Ю. Измайлов, В.П. Елизаров, П.М. Пугачев, В.Г. Самосюк, В.П. Чеботарев, И.В. Барановский, А.А. Князев, Е.И. Михайловский //: кат. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 92 с.
130. Хижников, А.А. Интенсификация процесса очистки зерна на цилиндрическом подсевном решете [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Хижников. - Барнаул, 2011. – 23 с.
131. Хижников, А.А. Интенсификация процесса очистки зерна на цилиндрическом подсевном решете [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Хижников. - Барнаул, 2011. – 23 с.
132. Хижников, А.А. Новая поточная линия для очистки зерна и семян [Текст] / А.А. Хижников, Н.И. Стрикунов // Вестник АГАУ. - 2009. - Вып. №5(55). - С.65-68.
133. Хижников, А.А. Повышение эффективности очистки зерна на подсевном решете центробежно-решетного сепаратора [Текст] / А.А. Хижников, Н.И. Стрикунов // Вестник АГАУ. - 2010. - Вып. №4(66). - С.72-76.
134. Центробежная зерноочистительная машина [Текст]: а.с. 1630654 А1 СССР А 01 F 12/44, В 07 В 1/22. / В.М. Дринча, Е.И. Кучер, И.К. Зинь. - № 4485939/15; заявл. 22.09.88; опубл. 28.02.91, Бюл. № 8.
135. Центробежная зерноочистительная машина [Текст]: а.с. 954045 СССР МКИ А 01 F 12/44, В 07 В 1/26. / Д.И. Мазоренко, Л.Н. Тищенко. - № 3219907/30-15; заявл. 15.12.80; опубл. 30.08.82, Бюл. № 32.
136. Центробежно-решетный сепаратор [Текст]: пат. № 2300426 Российская Федерация С1, В 07 В 1/22, В 07 В 9/00. / Б.Т. Тарасов, Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, И.А. Зиновьев. - № 2005129439/03; заявл. 21.09.2005; опубл. 10.06.2007, Бюл. №16.
137. Центробежно-решетный сепаратор [Текст] пат. № 2385775 Российской Федерации С1 МПК, В 07 В 1/22, В 07 В 9/00. / Б.Т.Тарасов, Н.И.

Стрикунов, А.А.Хижников, С.В. Леканов 2009106625/03; заявл. 25.02.2009; опубл. 10.04.2010, Бюл. №10.

138. Центробежный сепаратор: А.с. 732032 СССР М.Кл<sup>2</sup>, В 07 В 7/083. / И.И. Меньшиков, В.А. Демин. - №2524986/29-03; заявл. 21.09.77; опубл. 05.05.80, Бюл. № 17.

139. Центробежный сепаратор [Текст]: а.с. 1438857 А1 СССР М.Кл<sup>3</sup>. В 07 В 1/22. / В.П. Нилов, Н.В. Коваленко, Н.В. Токмаков. - №4210574/29-03; заявл. 16.03.87; опубл. 23.11.88, Бюл. №43.

140. Цециновский, В.М. Методы оценки технологического эффекта сепарирования [Текст] // Сб. науч. тр. / ВНИИЗ. - М., 1963. - Вып. 44. - С. 77-94.

141. Цециновский, В.М. Теория простого сепаратора [Текст] // Тр./ ВНИИЗ. - М., 1963.- Вып. 48. - С. 39-63.

142. Чеботарев, В. П. Особенности разделения зерновой смеси воздушным потоком в машинах с цилиндрическим решетом [Текст] / В. П. Чеботарев, П. М. Немцев // Методы исследований и результаты разработок техники для ресурсосберегающих технологий сельского хозяйства: сборник статей международной научно-практической конференции молодых ученых. - Минск, 2005. - Т. 1. - С. 100-104. -

143. Чеботарев, В. П. Теоретические предпосылки оценки сепарирования зерновых материалов цилиндрическим центробежным решетом [Текст] / В. П. Чеботарев, А. А. Князев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - Минск, 2005, N Вып. 39. -С.77-79

144. Чижиков, А.Г. Операционная технология послеуборочной обработки и хранения зерна [Текст] / А.Г. Чижиков, В.Д. Бабченко, Е.А. Мешков. - М.: Россельхозиздат, 1981. - 192 с.

145. Швидя, В. О. Підвищення ефективності пневмовідцентрового сепаратора та обґрунтування параметрів робочих органів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11«Машини та засоби механізації

сілськогосподарського виробництва» / Швидя Віктор Олександрович — Глеваха, 2012. — 18 с.

146. Шевцов, И.В. Решета проволочно-сварной конструкции с круглыми перемычками [Текст] // Аграрный вестник Урала. - 2007. - №2.- С. 46-53.

147. Шилин, В. В., Повышение эффективности очистки зерна виброцентробежным сепаратором путем разработки пневмосистемы с вертикальным кольцевым аспирационным каналом [Текст]: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Спец. 05.20.01 / Шилин Владимир Владимирович; [ЗНИИСХ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого]. — Киров, 2004. — 23 с.

148. Щербаков, С.С., Повышение эффективности процесса очистки зерна на цилиндрическом подсевном решете [Текст] // С.С. Щербаков, Н.И. Стрикунов, А.А. Хижников // Вестник АГАУ. - 2010. - Вып. №4(66). - С.72-76.

149. Щербаков, С.С., Параметры и режимы работы центробежно-решетного сепаратора с радиальными пластинами барабана [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.С. Щербаков. - Барнаул, 2022. – 23 с.

150. Щербаков С.С., Параметры и режимы работы центробежно-решетного сепаратора с радиальными пластинами барабана [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С.С. Щербаков. - Барнаул, 2022. - 145 с.

151. Яковлев, В.Т. Исследование движения зернового материала в вертикальных цилиндрических решетках с винтовым ротором [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - 05.185 / В.Т. Яковлев. - Ростов-на-Дону, 1970. - 31 с.

152. Яковлев, В.Т. Исследование движения зернового материала в вертикальных цилиндрических решетках с винтовым ротором [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Т. Яковлев. - Ростов-на-Дону, 1988. -174 с.

153. Ямпиров, С.С. Обоснование параметров сепаратора с каскадом решет для разделения зерновых смесей по длине частиц в поточных линиях производительностью 50 т/ч сельскохозяйственных зернообрабатывающих

предприятий [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - 05.20.01 / С.С. Ямпиров. – М., 1984. - 19 с.

154. Ямпиров, С.С. Технологическое и техническое обеспечение ресурсо-энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян [Текст]. - Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. -262 с.

155. Ямпиров, С.С. Технологические и технические решения проблемы очистки зерна решетками [Текст]. - Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2004.- 165 с.

156. Ямпиров, С.С. Технологии и технические средства для очистки зерна с использованием сил гравитации [Текст] / С.С. Ямпиров, Ж. Цыбенков. - Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2006. - 167 с.

157. Akase A. Studies on the vertical rotating screen separator of brown rice. 1. On the screening performance and its affecting factors [Text] / A. Akase, M. Tsuchiya // J. Japan. Soc. Agr. Mach – 1989. - Т. 51, N 1. - P. 89-96.

158. Цилиндричне решето [Text]: ua 35149 (51) МПК (2006) B07B 1/18. /Л.М. Тіщенко; М.В. Півень; О.В. Мандрика; Ф.М. Резніченко; В.М. Пуха. - № 200708062; заявка 16.07.2007; опубл 10.09.2008, Бюл.№ 17.

159. Cleaning machine with a vertical cylinder screen [Text]: us 4534859 / A. Ingmar - № 553721; filed Nov. 21, 1983; publication Aug. 13, 1985.

160. Screen for vibrating centrifugal separation machines [Text]: us 4247392 B04B 7/18 / E. S. Goncharov: № 52,360; filed Jun. 27, 1979, publication Jun. 27, 1981.

161. Trommel cleaner [Text]: us 5605233 / D.A. Hauch - № 380025; filed Jan. 30, 1995; publication Feb. 25, 1997.

162. UA 42728 U МПК (2009) МПК A01C 17/00. Відцентровий розкидний пристрій зерносепаратора / С. П. Степаненко, В. О. Швидя, Б.І. Котов. — № u20080025808.01.2008; опубл. 27.07.2009 Бюл. № 14, 3 с.

163. UA 48909 U (51) МПК (2009) МПК B07B 1/28. Вібраційно-відцентровий сепаратор / С.І. Малюта. — № u200910543 заявка 19.10.2009; опубл. 12.04.2010, Бюл. № 7, 3 с.

164. Патент № 2777102 Российская Федерация С1 МПК A01F 12/44 (2006.01), A01F 12/44 (2022.05)/ Способ послеуборочной обработки зерна / Стрикунов Н.И. Леканов С.В., Щербаков С.С., Микитюк М.Е.; заявитель и патентообладатель Барнаул, АлтГАУ. - № 2021140025; заявл. 30.12.2021; опубл.: 01.08.2022, Бюл. №22.

165. Патент № 2749395 Российская Федерация С1 МПК B07B 9/00 (2006.01), B07B 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, АлтГАУ. - № 2020132603; заявл. 01.10.2020; опубл.: 09.06.2021, Бюл. №16.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение А. Патенты Российской Федерации



Рисунок 1 – Патент на изобретение №2753865 Центробежно-решетный сепаратор

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2749395****Мобильный зерноочистительный агрегат**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Леканов Сергей Валерьевич (RU), Стрикунов Николай Иванович (RU), Черкашин Сергей Анатольевич (RU), Щербаков Сергей Сергеевич (RU), Микитюк Максим Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2020132603

Приоритет изобретения **01 октября 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **09 июня 2021 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **01 октября 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



Рисунок 2 – Патент на изобретение №2749395 Мобильный зерноочистительный агрегат



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2777102****Способ послеуборочной обработки зерна**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Стрикунов Николай Иванович (RU), Леканов Сергей Валерьевич (RU), Щербаков Сергей Сергеевич (RU), Микитюк Максим Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2021140025

Приоритет изобретения **30 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **01 августа 2022 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **30 декабря 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

Рисунок 3 – Патент на изобретение №2777102 Способ послеуборочной обработки зерна

## Приложение Б. Акты внедрения



### ООО «Центр Строительных Технологий-22»

ИНН 2224118757  
 КПП 222401001  
 ОГРН 1072224021891  
 Адрес: 656036 г. Барнаул ул. Чудненко, 81

Алтайское отделение №8644  
 ПАО Сбербанк г. Барнаул  
 БИК 040173604  
 р/с 40702810902000015029



Федоренко С.С.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских работ

Настоящим актом подтверждается, что техническим отделом ООО «Центр строительных технологий – 22» приняты результаты научных исследований доцента, к.т.н. Леканова С.В., доцента, к.т.н. Стрикунова Н.И. и аспиранта АГАУ Микитюка М.Е. по разработке технологии послеуборочной обработки зерна и семян, выполненной по теме: «Структурно-параметрический синтез мобильных зерноочистительных агрегатов».

По рабочей документации, выполненной Лекановым С.В., был изготовлен центробежно-воздушный сепаратор. Центробежно-воздушный сепаратор может применяться в технологических линиях, как отдельная машина, так и в составе воздушного центробежно-решетного сепаратора. Испытания, проведенные в заводских условиях, показали работоспособность центробежно-воздушного сепаратора (патент №2675607).

Разрабатываемый центробежно-воздушный сепаратор предназначен для применения в стационарном зерноочистительном агрегате для послеуборочной обработки зерна в СПК «Дружба» Алейского района, а также в составе мобильных зерноочистительных агрегатов.

Инженер-конструктор  
 Начальник производственного цеха

Житанер Н.В.  
 Масликов П.П.

УТВЕРЖДАЮ  
Ректор ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ,  
Доктор сельскохозяйственных наук,



20 22 г.

УТВЕРЖДАЮ  
ИП, КФХ Щербаков С.Г.

Щербаков С.Г.



« 15 » 11 20 22 г.

#### АКТ

о хозяйственных испытаниях центробежно-решетного сепаратора с подсевным щелевым решетом для очистки зерна в КФХ Щербаков С.Г. Заринского района

Результаты испытания центробежно-решетного сепаратора, в котором имеется подсевное щелевое решето с параметрами  $D_p=300$  мм,  $H=500$  мм для очистки зерна от мелких примесей конструкции кафедры сельскохозяйственной техники и технологий Алтайского государственного аграрного университета при работе сепаратора в режиме предварительной очистки показали:

1. Удельная подача исходного зернового материала составляла до  $25,5$  т/ч\*м<sup>2</sup> при влажности 14,4%.


2. При обработке зернового материала (пшеницы) эффективность очистки от мелких примесей составила 85,4% при допустимых ГОСТом потерях зерна в отходы.

3. Центробежно-решетный сепаратор с подсевным щелевым решетом можно использовать как ворохоочиститель в сочетании с кольцевым пневмосепарирующим каналом, как отдельную стационарную машину в технологических линиях агрегатов и семяочистительно-сушильных комплексов.

Научный руководитель, к.т.н.,

доцент Стрикунов Н.И. 

к.т.н., доцент Хижников А.А. 

к.т.н., доцент Леканов С.В. 

аспирант кафедры СХТиТ

Микитюк М.Е. 

ИП, КФХ Щербаков С.Г.

Щербаков С.Г. 

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ  
д. с-х. н., доцент  
Колпаков Н.А.  
«22» 05 2023 г.

СОГЛАСОВАНО



Проректор по учебной работе к.с-х.  
И. А. Дюбенко  
2023 г.

А К Т

**об использовании /внедрении/ результатов  
научно-исследовательской работы в учебном  
процессе Алтайского государственного аграрного университета**

Мы, представители научно-исследовательского отдела Алтайского  
ГАУ начальник ОСНИД Федулова Инна Владимировна  
(должность, фамилия, имя, отчество)

и методической комиссии инженерного факультета

председатель Садов Виктор Викторович

(должность, фамилия, имя, отчество)

с одной стороны, и представители кафедры сельскохозяйственной техники и  
технологий

(наименование предприятия, организации, учреждения)

заведующий кафедрой Беляев Владимир Иванович

(должность, фамилия, имя, отчество)

с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты научно-  
исследовательской работы на тему: «Повышение эффективности очистки  
зерна на цилиндрическом подсевном щелевом решете центробежно-  
решетного сепаратора». Научный руководитель: к.т.н., доцент Стрикунов  
Николай Иванович, аспирант Микитюк Максим Евгеньевич.

(название работы, тема работы; ее руководитель и исполнители)

выполненной в период с 1 сентября 2020 г. по 30 апреля 2023 г.

месяц

месяц

по госбюджету, по хоздоговору в объеме \_\_\_\_\_ тыс.

руб. внедрены /использованы/ в учебном процессе:

а) при чтении лекций по сельскохозяйственным машинам

(название учебных дисциплин)

по теме /разделу/ центробежные сепараторы для очистки зерна

(тема лекции)

б) при проведении лабораторных /практических/ занятий;  
лабораторная работа: «Влияние удельной нагрузки на эффективность  
работы подсевного решета центробежно-решетного сепаратора» со  
студентами 3 курса инженерного факультета, со слушателями факультета  
повышения квалификации /руководители хозяйств, главные специалисты

Настоящий акт составлен на основании рабочих программ и тематических планов лекций и лабораторно-практических занятий по курсу: «Сельскохозяйственные машины».

Представитель научно-исследовательского  
отдела Федулова И.В.  
ФИО



подпись

Представитель методической комиссии  
факультета Садов В.В.  
ФИО



подпись

Заведующий кафедрой (лабораторией)  
Беляев В.И.  
ФИО



подпись

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ,

доктор сельскохозяйственных наук,



Исодина Н.А.

2022 г.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

«23» 11 2022 г.

№ 1/22

Мы, нижеподписавшиеся, представители Алтайского государственного аграрного университета к.т.н., доценты кафедры «Сельскохозяйственной техники и технологий» Стрикунов Н.И. и Хижников А.А., аспирант кафедры «Сельскохозяйственной техники и технологий» Микитюк М.Е., к.т.н., доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические системы» факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта, Алтайского государственного технического университета ИМ. И. И. Ползунова Леканов С.В., с одной стороны, и представитель ИП, КФХ Щербаков С.Г. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в уборочный период 2022 г. в результате научно-исследовательской работы по теме: «Повышение эффективности очистки зерна на цилиндрическом подсевном щелевом решетке центробежно-решетного сепаратора» выполнена производственная оценка эффективности применения центробежно-решетного сепаратора с подсевным щелевым решетом и пластинчатым барабаном с радиальными пластинами в рамках совершенствования перспективных технологий и машин для послеуборочной обработки зерна.

В процессе внедрения выполнены следующие работы:

- 1) Проведена установка центробежно-решетного сепаратора в поточную линию.
- 2) Проведен отбор проб во время работы центробежно-решетного сепаратора с подсевным щелевым решетом.
- 3) Разработаны практические рекомендации по рациональному использованию зерноочистительных машин в хозяйстве.


Технико-экономические показатели:


- удельная производительность на очистке зерна пшеницы составляла –  $12,3 \text{ т/ч} \cdot \text{м}^2$ ;
- эффективность очистки зерна от мелких примесей составляла – 84,2%;
- потери зерна в отходы – 0,82%.


Предложения по дальнейшему внедрению результатов исследований:

- центробежно-решетный сепаратор с подсевным щелевым решетом можно использовать как ворохоочиститель в сочетании с кольцевым пневмосепарирующим каналом, как отдельную стационарную машину в технологических линиях агрегатов и семяочистительно-сушильных комплексов.

Научный руководитель, к.т.н.,

доцент Стрикунов Н.И. 

к.т.н., доцент Хижников А.А. 

к.т.н., доцент Леканов С.В. 

аспирант кафедры СХТиТ

Микитюк М.Е. 

ИП, КФХ Щербаков С.Г.

Щербаков С.Г. 



## Приложение В. Техническая характеристика машины

Таблица 1 – Техническая характеристика воздушного центробежно-решетного сепаратора

№ п-п	Наименование параметров	Ед. изм.	Значение
1	Тип	-	Стационарный
2	Привод	-	Электромеханический от мотор-редуктора МЦ2С-80
3	Производительность при очистке продовольственного зерна (пшеницы) влажностью до 16% и засоренностью до 20% не менее	т/ч	50
4	Эффективность очистки зерна пшеницы от отделимой сорной примеси при номинальной производительности, не менее	%	70
5	Техническое потребление: - воздух при напоре 120 мм в ст.	м <sup>3</sup> /ч	5760
6	Номинальная мощность установленных электродвигателей	кВт	6
7	Масса (без сменных решет)	кг	1270
8	Количество зерноочистительных блоков	шт	1
9	Установленная мощность электродвигателя решетного блока	кВт	3
10	Частота вращения решета	об/мин	108
11	Номинальный внутренний диаметр решет	мм	600
12	Номинальная площадь решета в зерноочистительном блоке	м	1,125
13	Габаритные размеры: - длина - ширина - высота	м	2,25 1,30 3,40
14	Обслуживающий персонал	чел	1



## Приложение Г. Исходная засоренность зернового вороха пшеницы

Данные исходной засоренности зернового вороха пшеницы различными видами примесей приняты на основании исследований Шмидт А. В. (Шмидт А.В. Обоснование состава и структуры универсальной поточной линии послеуборочной обработки зерна: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.20.01/ Шмидт Андрей Владимирович – 20 с.).

Таблица 1 - Исходная засоренность зернового вороха пшеницы различными видами примесей

Наименование МИС	Исходная чистота, %	Зерновая примесь, %	Сорная примесь, %
Целинная МИС	90,01	5,11	4,88
Алтайская МИС	92,58	6,59	0,83
Центрально-черноземная МИС	91,72	5,28	3,0
Дальневосточная МИС	97,3	1,85	0,85
Южноукраинская МИС	92,11	6,83	1,06
Кубанская МИС	93,41	1,14	5,45
Павлодарская МИС	86,67	5,98	7,35
Поволжская МИС	93,82	5,33	1,05
Сибирская МИС	92,20	5,05	2,76

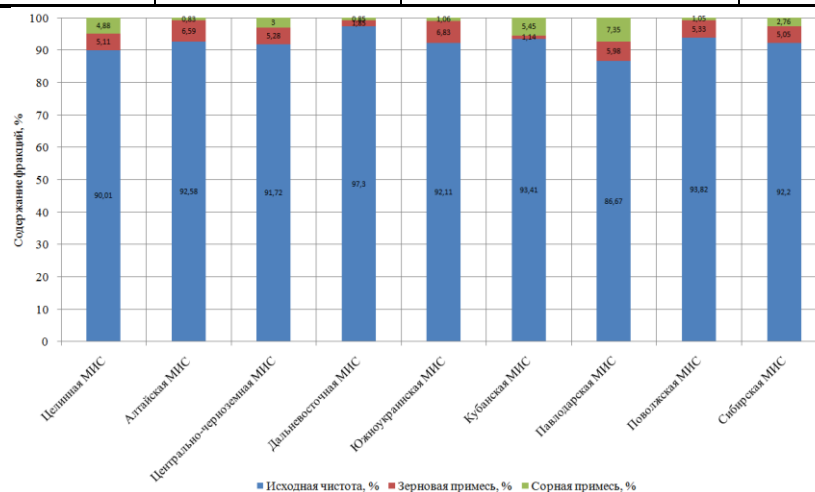


Рисунок 1 - Исходная засоренность зернового вороха пшеницы различными видами примесей