

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЩЕРБАКОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

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

Специальность 05.20.01 - Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Барнаул 2022

## Оглавление

Глава 1. Современное состояние вопроса сепарации зернового материала .....	10
1.1. Состояние вопроса послеуборочной очистки зерна и семян в Алтайском крае .....	10
1.2. Технологические особенности и анализ конструктивных решений центробежно-решетных сепараторов для очистки зерна.....	12
1.3. Предварительная подготовка зернового материала в центробежно-решетных сепараторах с вертикальной осью вращения.....	20
1.4. Классификация аспирационных систем центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения .....	26
1.5. Центробежно-решетные сепараторы с пластинчатым барабаном.....	29
1.6. Выводы и задачи исследований.....	31
Глава 2. Теоретическое исследование процесса сепарации зерновой смеси на подсевном решете с пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора .....	33
2.1. Описание технологической схемы центробежно-решетного сепаратора .....	33
2.2. Параметры, определяющие движение зерновой смеси на подсевном решете с пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора .....	37
2.3. Обоснование конструктивных параметров пластинчатого барабана.....	41
2.4. Силы, действующие на слой, заключенный между пластинами барабана с учетом действия сил от активного слоя.....	46
2.5. Силы, действующие на зерновой материал в активном слое.....	50
2.6. Уравнение процесса сепарации на подсевном решете с пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора.....	54
2.7. Кинематические и энергетические характеристики центробежно-решетного сепаратора .....	59
Выводы по главе:.....	63
Глава 3. Программа и методика экспериментальных исследований.....	65
3.1. Программа экспериментальных исследований.....	65
3.2. Описание экспериментальной установки .....	65

3.3. Приборы и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях.....	71
3.4. Характеристика зернового материала.....	73
3.5. Методика проведения опытов.....	74
3.6. Методика проведения многофакторного эксперимента .....	80
3.7. Моделирование процесса самосортирования на центробежно-решетном сепараторе .....	85
3.8. Определение равномерности просеваемости зернового материала по высоте цилиндра.....	89
3.9. Методика производственных испытаний экспериментального образца центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и пластинчатым барабаном.....	91
Глава 4. Результаты экспериментальных исследований и их анализ .....	94
4.1. Результаты моделирования процесса самосортирования .....	95
4.2. Влияние шага расстановки пластин барабана на эффективность очистки зерна от мелких примесей.....	97
4.3. Влияние отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения на процесс сепарации.....	99
4.4. Влияние диаметра отверстий решета на эффективность очистки и потери зерна в отходы .....	100
4.5. Исследование цилиндрического решета с продолговатыми отверстиями на очистке зерна от мелких примесей.....	101
4.6. Влияние кинематического режима на эффективность очистки зерна от мелких примесей.....	104
4.7. Влияние удельной подачи зерновой смеси на полноту выделения мелких примесей.....	106
4.8. Влияние высоты решета на интенсивность просеваемости мелких примесей .....	107
4.9. Влияние засоренности исходной зерновой смеси на показатели процесса сепарации .....	108

4.10. Параметры, определяющие эффективность процесса сепарации и их оптимизация.....	110
4.11. Энергетические затраты на работу сепаратора.....	119
4.12. Результаты производственных испытаний центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом .....	120
4.13. Методика расчёта центробежно-решетного сепаратора .....	122
Глава 5. Техничко-экономическая оценка центробежно-решетного сепаратора...	133
5.1. Цена реализации проектируемой машины заводом-изготовителем.....	134
5.2. Балансовая стоимость машины.....	136
5.3. Годовая выработка машины.....	136
5.4. Определение удельных эксплуатационных расходов .....	136
5.5. Удельная энергоёмкость.....	138
5.6. Удельная металлоёмкость .....	138
5.7. Расчет удельной трудоемкости работы машин.....	139
5.8. Удельные капиталовложения на единицу работы .....	139
5.9. Приведенные затраты на единицу работы.....	139
5.10. Годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой зерноочистительной машины ВЦР – 50.....	139
5.11. Экономия капиталовложений в связи с внедрением новой машины .....	140
Общие выводы.....	141
Приложение А. Патенты Российской Федерации.....	163
Приложение Б. Акты внедрения .....	165

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с утвержденными Правительством Российской Федерации Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 - 2020 годы от 14 июля 2012 г. № 717, Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства на 2017 - 2025 годы от 25 августа 2017 г. № 996 и Стратегией развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года от 7 июля 2017 г. № 1455-р необходимо обеспечивать стабильный рост производства зерна и другой сельскохозяйственной продукции, а также технических средств для послеуборочной обработки зерновых культур при интенсивном взаимодействии с наукой.

Главной задачей агропромышленного комплекса остается устойчивое наращивание производства зерна.

Известно, что на послеуборочную обработку и хранение зерна приходится значительные затраты, связанные с его производством. Применение перспективных современных зерноочистительных машин позволит снизить издержки на послеуборочную обработку зерна.

Особое значение придается предварительной очистке зерна, где из поступающего вороха выделяют мелкие семена растений, легкие и крупные примеси.

В машинах предварительной очистки, оснащенных плоскими решетками в том числе, и подсевными, существенно повысить производительность без увеличения площади сепарирующей поверхности не представляется возможным. Поэтому особое значение приобретает проблема поиска новых принципов сепарирования. Разработка новых способов очистки зерна от мелких примесей является наиболее перспективным направлением решения создания высокопроизводительного сепаратора. Исследования в области центробежно-решетного сепарирования [4, 51, 86, 133, 141] показывают, что на процесс сепарирования существенное влияние оказывают конструктивно-

кинематические и технологические параметры. Особенно ощутима их взаимосвязь при работе сепаратора в режиме ворохоочистителя с обязательным выделением мелких примесей на цилиндрическом подсевном решете с круглыми или продолговатыми отверстиями. Такой технологический процесс можно интенсифицировать за счет использования центробежных сил и применения цилиндрического подсевного решета.

**Цель исследования** - интенсификация технологического процесса очистки зернового вороха в цилиндрическом подсевном решете центробежно-решетного сепаратора путем изменения угла отгиба радиальных пластин в основании цилиндра барабана.

**Объект исследования** - технологический процесс сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете центробежно-решетного сепаратора с радиальными пластинами барабана.

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

**Научная гипотеза** – заключается в том, что повышение эффективности процесса сепарации зерна на цилиндрическом подсевном решете центробежно-решетного сепаратора может быть обеспечено за счет использования радиальных пластин с отгибом в основании цилиндра барабана.

**Научная новизна и теоретическая значимость:**

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

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

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

**Практическая значимость научного исследования:**

1. Обоснованы конструктивно-режимные параметры центробежно-решетного сепаратора, оснащенного радиальными пластинами барабана.
2. Результаты исследований могут быть использованы проектно-конструкторскими организациями для разработки новых зерноочистительных машин, а также в учебно-методических целях.

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

**Положения, выносимые на защиту:**

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

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

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

**Достоверность исследований подтверждается:**

- применением математического аппарата при разработке механико-математической модели движения зерновой смеси по подсевному решету и процесса сепарации на нем;

- использованием стандартных методик, а также разработанных автором частных методик проведения исследований с применением поверенных приборов и оборудования;

- применением современных вычислительных средств с использованием программного обеспечения Statistica 6.1, Microsoft Excel 2013, Mathcad 15.

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

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

**Апробация результатов исследований.** Результаты работы были представлены на XXIII Всероссийской агропромышленной выставке «Разработка технологии, обеспечивающей эффективную очистку зерна и технические средства для ее реализации на основе мобильных и стационарных технологий», «Золотая осень» - 2021, медаль и диплом за III место; Семинар-совещание проректоров по экономической работе и



руководителей финансово-экономических служб вузов Минсельхоза России, Алтайский государственный аграрный университет, 13-16 октября 2021 г., мобильный зерноочистительный агрегат, центробежно-решетный сепаратор (макеты); сертификат по итогам участия в XVII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука-сельскому хозяйству» 9-10 февраля 2022, Барнаул; Диплом I степени в номинации «Проблемы и актуальные вопросы инженерного обеспечения АПК» по итогам выступления с докладом на VIII Региональной научной конференции «Теория и практика инновационного развития в представлениях нового поколения» март 2022, Барнаул.

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

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

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю, кандидату технических наук, доценту, доценту кафедры «Сельскохозяйственная техника и технологии» Алтайского государственного аграрного университета Стрикунову Николаю Ивановичу и кандидату технических наук, доценту, доценту кафедры «Наземные транспортно-технологические системы», факультета «Энергомашиностроения и автомобильного транспорта» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова Леканову Сергею Валерьевичу, за оказанную ими методическую помощь и консультации при выполнении настоящей научной работы.

## **Глава 1. Современное состояние вопроса сепарации зернового материала**

### **1.1. Состояние вопроса послеуборочной очистки зерна и семян в Алтайском крае**

Одним из основных факторов, определяющих уровень урожая и его стабильность, является качество семян. В условиях интенсификации земледелия роль сорта и качество семян приобретает особое значение. Посев добротными семенами районированных сортов – один из основных резервов повышения урожайности всех зерновых культур.

Для увеличения производства таких семян нужна соответствующая материально-техническая база. Поэтому в семеноводческих хозяйствах необходимо строить не типовые, а индивидуальные проекты семяочистительных линий и комплексов, примирительно к конкретным условиям хозяйства.

В настоящее время в Алтайском крае накоплен положительный опыт модернизации существующих типовых зерноочистительных агрегатов, строительства новых зерно-семяочистительных сушильных комплексов.

Решающее значение придается выбору машины предварительной очистки. Современный рынок предлагает воздушно-решетные машины с различными аспирационными системами и решетными схемами (плоскорешетные и цилиндрические с вертикальной и горизонтальной осями вращения). Приводим аналитическую оценку некоторых сепараторов отечественного и зарубежного производства, как имеющихся технологических линиях комплексов в нашем крае, так и существующих на мировом рынке (см. рисунки 1.1-1.3).

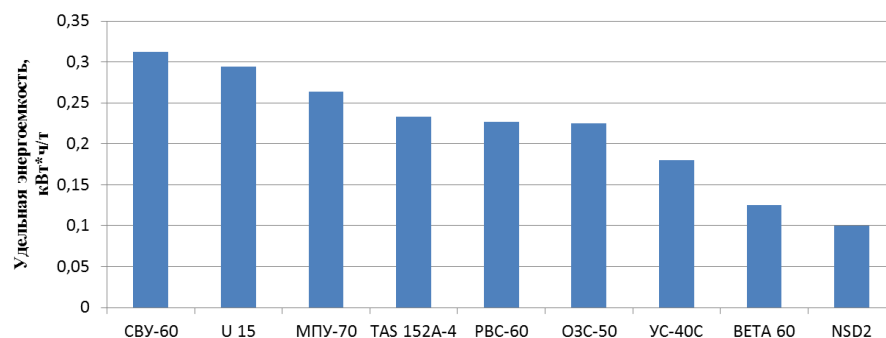


Рисунок 1.1 – Удельная энергоёмкость воздушно-решетных машин в режиме предварительной очистки зерна

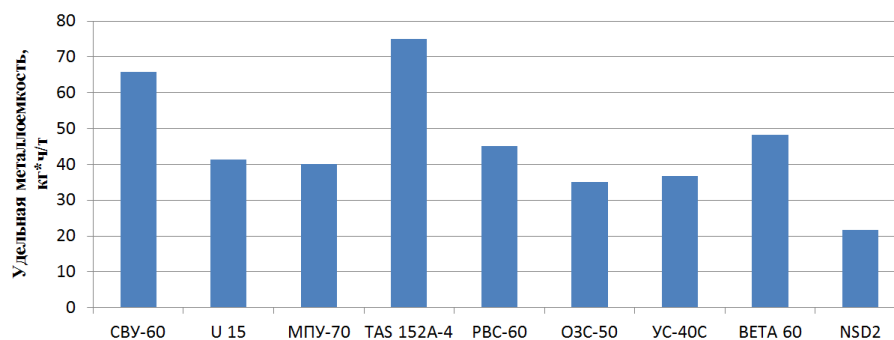


Рисунок 1.2 – Удельная металлоёмкость воздушно-решетных машин в режиме предварительной очистки зерна

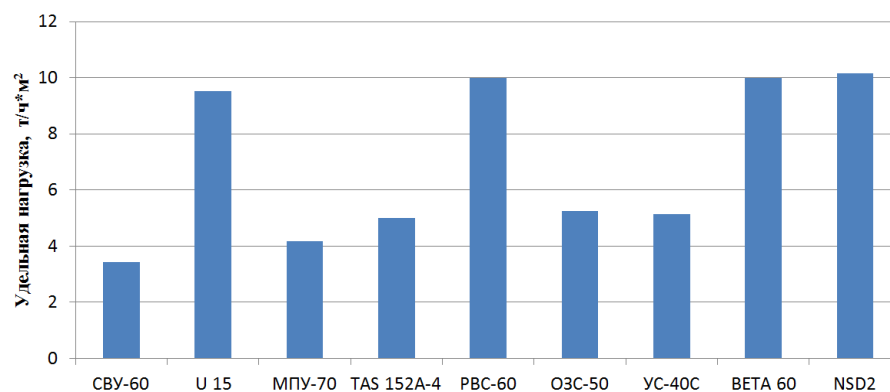


Рисунок 1.3 – Удельная нагрузка воздушно-решетных машин в режиме предварительной очистки зерна

При примерно одинаковой производительности 60 т/ч этих машин, удельная энергоёмкость существенно различается. Максимальный показатель удельной энергоёмкости у машины NSD2 фирмы «Denis» (Франция), равный 0,1 кВт·ч/т, максимальный 0,312 кВт·ч/т у машины СВУ-60 «Воронежсельмаш». Зерноочистительная машина СВУ-60 имеет высокий показатель по металлоёмкости при малой низкой удельной нагрузке 3,43

т/ч·м<sup>2</sup>. По сути, эти определяющие параметры говорят о несовершенстве машины СВУ-60. В настоящее время эта машина не производится.

По всем трем исследуемым параметрам наилучшие показатели имеют машины ВЕТА 60 «Romaх» (Россия) и NSD2. При практически равной удельной нагрузке соответственно 10 и 10,16 т/ч·м<sup>2</sup> (это большая нагрузка) они обладают самыми низкими показателями по удельной металлоемкости и удельной энергоемкости. Высокие показатели по удельной нагрузке у этих машин, а также зерноочистительных машин U 15 производства «Petkus» (Германия) и РВС-60 «САТУРН-АГРО» (Россия) говорят о совершенстве применяемых в машинах решетных схем, а также способов очистки решет от застрявших зерен. Отметим, что рыночная стоимость этих машин значительная.

Таким образом, необходимо помнить, что зерноочистительный комплекс – это достаточно сложный технологический объект, функционирующий по заранее заложенным технологическим параметрам. Эффективность функционирования технически сложных объектов должна просматриваться уже на стадии проектирования. При практической реализации проектов важное значение имеет увязка между строительной и технологической частями, а в последнее время и архитектурной.

## **1.2. Технологические особенности и анализ конструктивных решений центробежно-решетных сепараторов для очистки зерна**

Центробежно-решетному сепарированию зерна посвящены работы многих ученых, которые доказали их преимущество в сравнении с плоскорешетным сепарированием: Авдеева Н.Е., Андреева В.Л., Барилла А.В., Бочкарева А.И., Васильковского О.М., Гончарова Е.С., Заики П.М., Захарова С.Е., Иванова Н.М., Кима Р.А., Леканова С.В., Лузана П.Г., Мельникова Б.Н., Минаева В.Н., Несикова А.А., Патрина В.А., Полуэктова Н.И., Семенова В.А., Слепова А.П., 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 [2], 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 семенных смесей были проведены в Германии Германом Кайзером (Herman Kayser) в 1912 году [4]. 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.

Центрофуга Кайзера представляет собой опрокинутый усеченный конус, стенки которого состоят из тонких стальных прутьев, сближающихся

снизу и расходящиеся кверху так, что между прутьями получаются щели, увеличивающиеся кверху (см. рисунок 1.4).

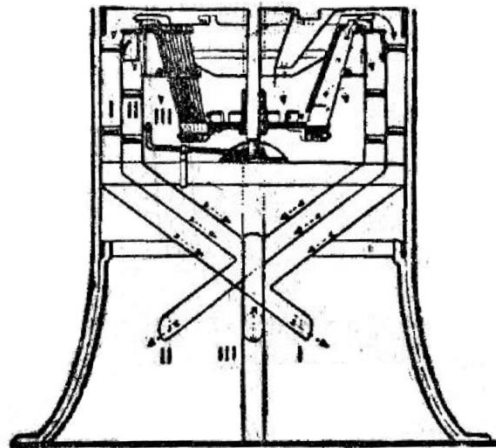


Рисунок 1.4- Схема работы центрифуги Кайзера (1933 год)

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

На рисунках 1.5 представлены конструктивно-технологические схемы центробежно-решетчатых сепараторов с вертикальной осью вращения.

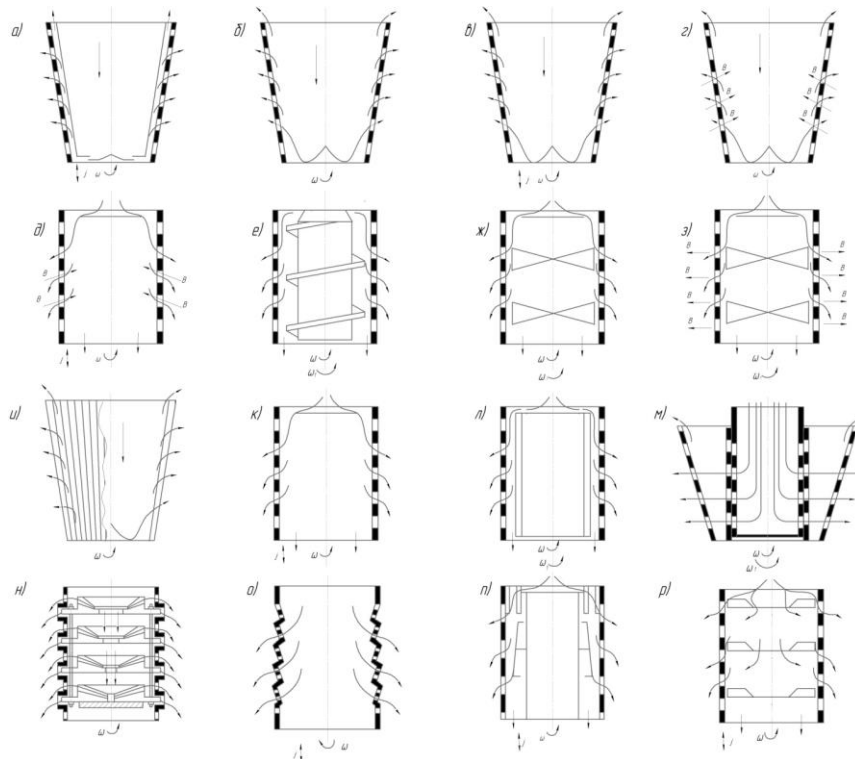


Рисунок 1.5 – Схемы центробежно-решетчатых сепараторов с вертикальной осью вращения

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 1.5и) [5].

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 [6].

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. [7] и Минаев В.Н. [8] применили ограничивающую поверхность (см. рисунок 1.5а и 1.6в). Филатов Н.А. для выделения длинных примесей на конической поверхности применил лабиринтные решета (выполненные в виде двух сообщающихся каналов) (см. рисунок 1.6к) [9]. В сепараторах обоих авторов [10] решета помимо вращательного движения совершали также осевые колебания.

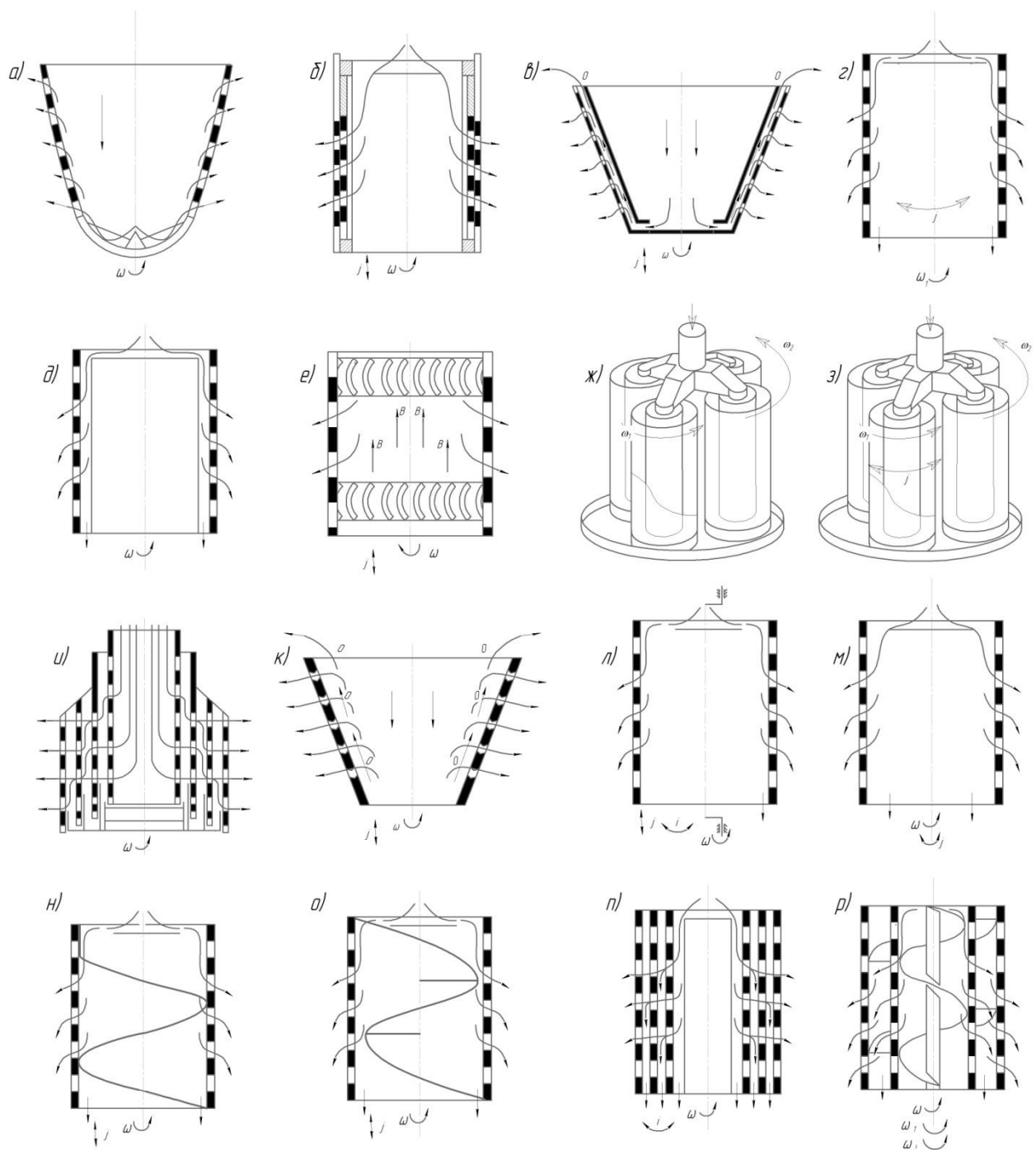


Рисунок 1.6 – Схемы центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения

В работах Кима Р.А. [11] исследованы конические ступенчатые центрифуги без использования вибрации (см. рисунок 1.5б). Использование вибрации на решетке с конической просеивающей поверхностью (см. рисунок 1.5в) позволило Авдееву Н.Е. [6] значительно повысить эффективность выделения проходовой фракции.



Воздушный поток, подающийся снаружи решета, способствует расслоению зерновой смеси и при наличии вибрации приводит к «псевдооживлению» зерновой смеси, что в свою очередь приводит к повышению качества разделения зерновой смеси (см. рисунок 1.5г) [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 1.6в).

Рассмотрим основные технологические решения, способствующие повышению эффективности сепарации.

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

Для увеличения прижатия слоя зерна к решету и улучшения процесса просеивания проходовой фракции через зерновой слой и решето Бочкаревым А.Н. и Ульяновым А.Ф. [48] (см. рисунок 1.5д), а также Полуэктовым Н.И. [34] 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 создавалась большее давление на зерновую смесь, 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 [38]:

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

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

Для повышения эффективности разделения зерновой смеси авторами [33] были использованы стратифицирующие шипы (см. рисунок 1.5ж). 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 1.5м). 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 [129].

Ямпиров С.С. [141] также исследовал работу концентрически установленных цилиндрических решет, причем он исследовал решета с одинаковыми отверстиями. В работе [29] помимо вращательного движения концентрическим решетам придается еще знакопеременное ускорение в окружном направлении.

Возможность послойного разделения зерновой смеси по высоте цилиндрического решета рассмотрены в работах Тищенко Л.Н. и Прокопенко А.С. [13, 15,] (см. рисунок 1.5н, 1.5р, 1.5п).

Для увеличения просеивающей поверхности цилиндрического решета, решето в работе [26] выполнено ступенчатым.

Для выделения длинных примесей на цилиндрическом решете Минаев В.Н. [61] предложил использовать неподвижную ограничивающую поверхность внутри решета (см. рисунок 1.6д).

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 1.6г) [79].

Яковлев В.Т. исследуя работу подсевного решета с винтовым ротором (см. рисунок 1.5е) рассмотрел пять возможных вариантов протекания технологического процесса [138], 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 (1.5е) [13].

Использование планетарного движения цилиндрических решет в сепараторе «Sigma» фирмы «Damas» (Дания) позволяет добиться сдвигового эффекта зерновой смеси в окружном направлении, что способствует просеиванию проходовой фракции (см. рисунок 1.6ж). В работах Холодилина А.Н., Вертякова Ф.Н. и В.Н. Михалева [3300555] (см. рисунок 1.6з) помимо

планетарного движения решет в приводе используются крутильные колебания.

Для стабилизации режима движения зерна на решетке используются спирали (см. рисунки 1.6н и 1.6о) [13,32].

На рисунке 1.5л представлена схема сепаратора, разработанного Тарасовым Б.Т. [55]. 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. и Хижникова А.А. была продолжена работа над данным принципом сепарирования [127].

### **1.3. 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 аспиратора типа «КОМ» фирмы «Pat» (Польша) (см. рисунок 1.7а) позволяет повысить эффективность очистки в целом на 8-10%. Разрабатывался аспиратор для совместной работы с сепараторами CZA-50 фирмы «Araj» (польский аналог сепаратора БЦС-50). Однако в настоящее время находит применение и для других зерноочистительных машин, в том числе и плоскорешетных. Выпускается аспиратор с производительностью 25, 40, 60 т/ч. Датская фирма «Cimbria» разработала высокоэффективный аспиратор CR 163 (см. рисунок 1.7б) для совместной работы с центробежно-решетными сепараторами серии

«Verticlean» с производительностью 40, 60 и 100 т/ч. Итальянская фирма «Zanin» выпускает aspirаторы серии РА двух типов I и Т (см. рисунок 1.7в и 1.7г), соответственно производительностью 30, 50, 80, 100, 120 и 25, 40, 60, 80, 120.

Аспираторы типа «КОМ» применяются также в современных зерносушилках, в частности финского производства фирм «Мери» и «Anti-Teollisuus», как в мобильном, так и в стационарном исполнении [161].

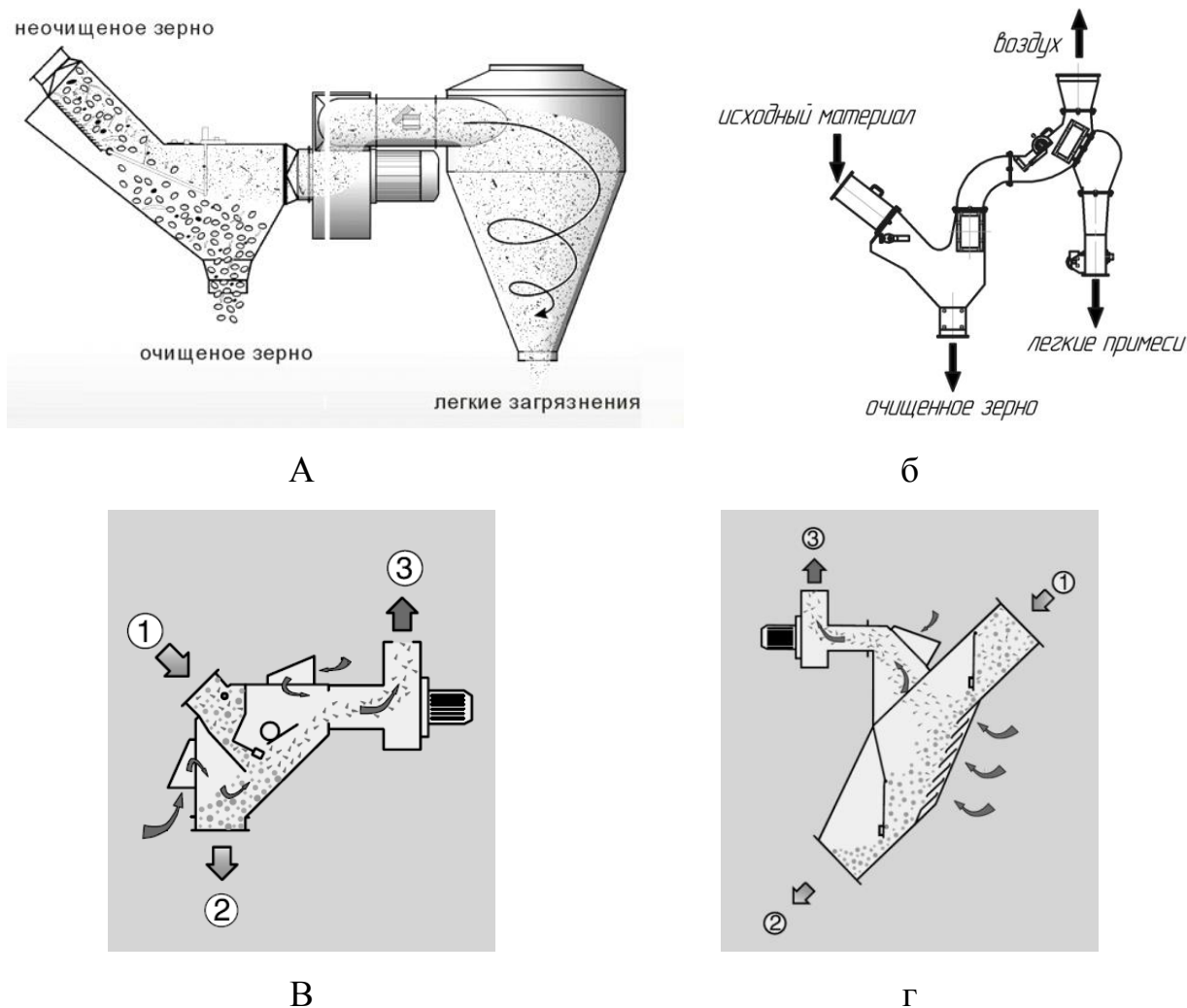
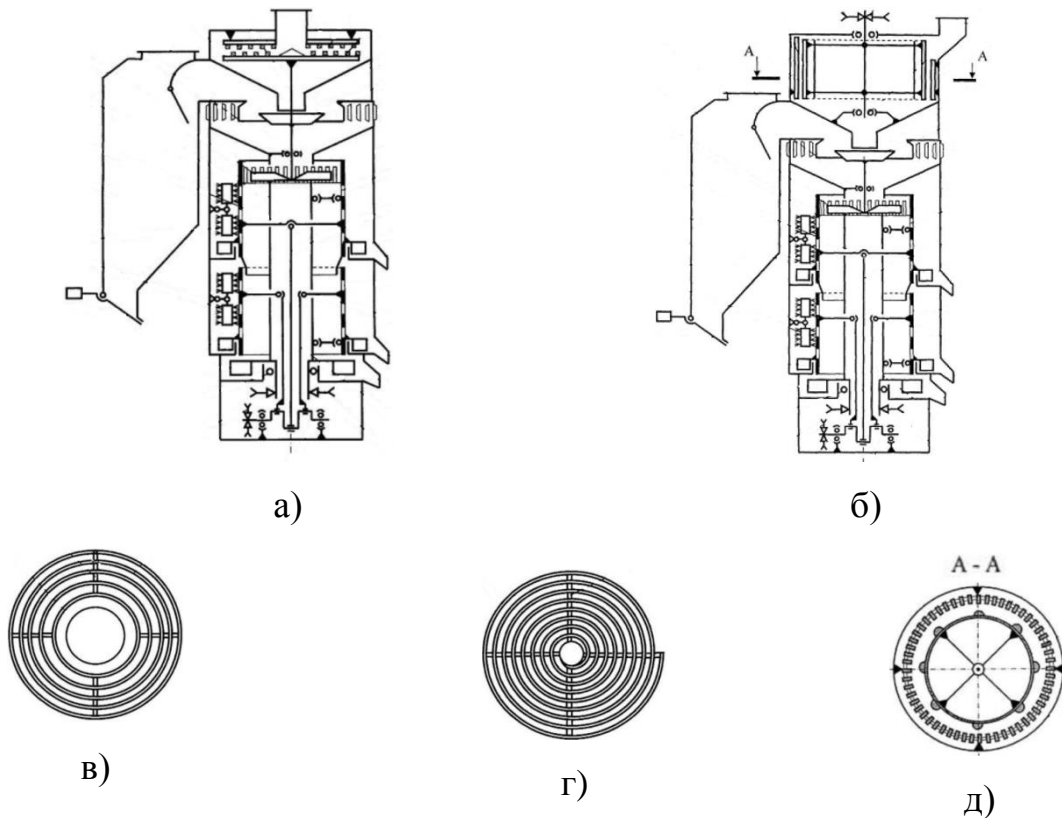


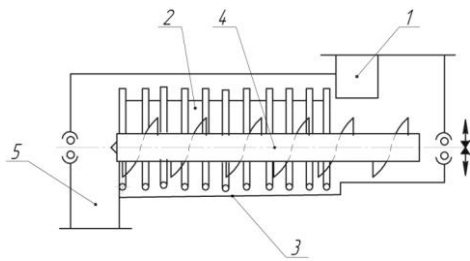
Рисунок 1.7 – Аспираторы предварительной подготовки материала

Установка домолачивающего устройства (см. рисунки 1.8а-1.8д) 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 [100].

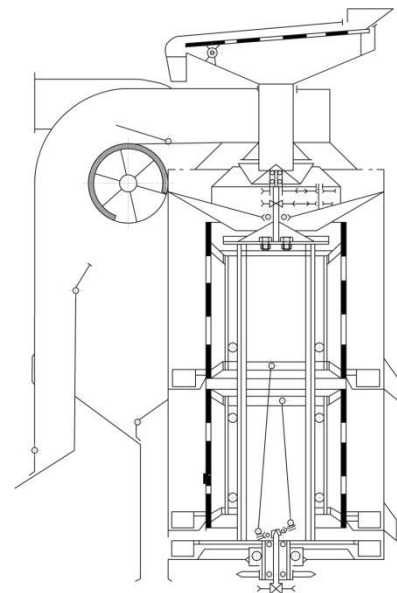
Зерновой ворох, поступающий с поля или с открытых площадок, после дополнительной просушки, содержит большое количество грубых примесей (камни, ветки и т.д.), которые могут повредить центробежно-решетный сепаратор. Поэтому целесообразно установить плоское решето (см. рисунок 1.8ж) над сепаратором для задержания данных примесей [99]. С этой же целью устанавливается нормализатор вороха (см. рисунок 1.8е), выполненный в виде шнека с подшнековой решетчатой поверхностью, заключенного в кожух, нижняя часть которого выполнена жалюзийной, для регулирования размера отверстий [53].





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

е)



ж)

Рисунок 1.8- Устройства для дополнительного обмолота и выделения крупных примесей

Известно, что в момент подачи зерновой смеси 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. [106] 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 [14]. 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 1.9в), параллельный образующей решета, что исключало возможность вмешательства витка в процесс сепарации в зонах загрузки и интенсивного просеивания смеси. 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 используя идею [29] 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 1.9а). Стабилизации движения в верхней части решета также служит внутренний эластичный шнек, касающийся решета (см. рисунок 1.9е) [75].

С целью торможения зернового слоя в виброцентробежном сепараторе в верхней части решета авторы [75] 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 1.9г). Другой вариант стабилизации скорости зерновой смеси 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 1.9б) [69].

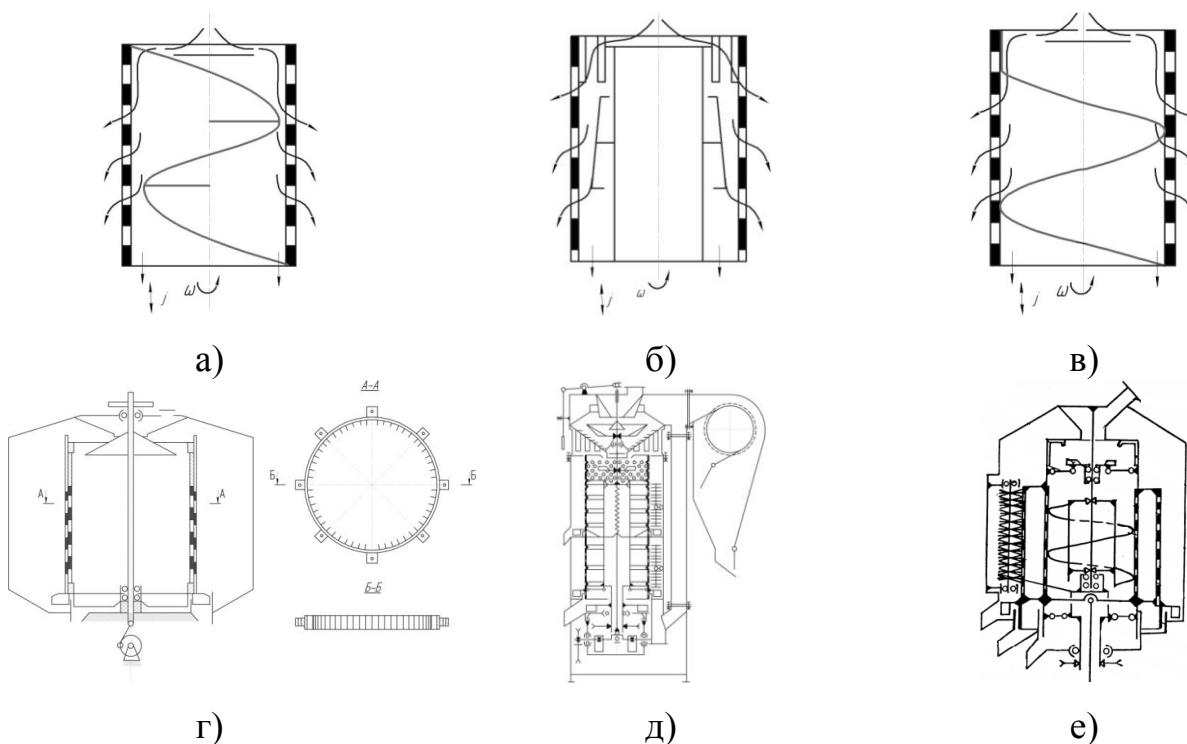


Рисунок 1.9 – Устройства для стабилизации зернового материала в верхней части цилиндрического решета



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 1.9д) [70].

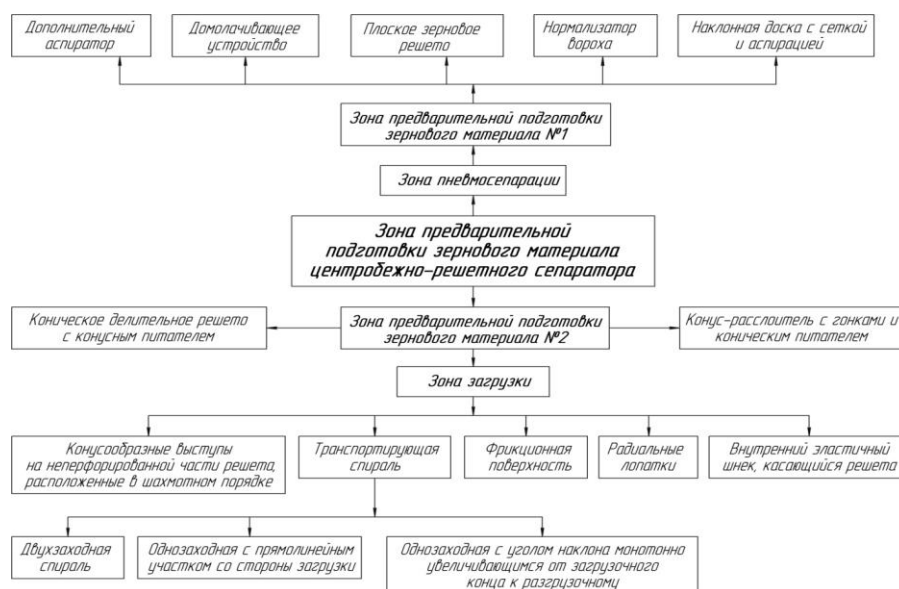


Рисунок 1.10 - Классификация способов предварительной подготовки зернового материала центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения

На основании вышесказанного нами предлагается классификация способов предварительной подготовки зернового материала центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения (см. рисунок 1.10). 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.

#### **1.4. Классификация аспирационных систем 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 [82].

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.

На рисунке 1.11 представлена классификация аспирационных систем центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения.

Немаловажным фактором, определяющим эффективность системы аспирации, является применение различных лопаток на тарелке [117]. 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, 12, 53, 70].

Приемный конус-распределитель на тарелке позволяет регулировать начальную скорость зерновой смеси по тарелке [30, 30], он может быть как с прямолинейной направляющей, так и в виде брахистохроны [70].

С целью изменения скорости движения воздушного потока устанавливают различные заслонки [133]. Помимо использования двух осадочных камер [137] 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.

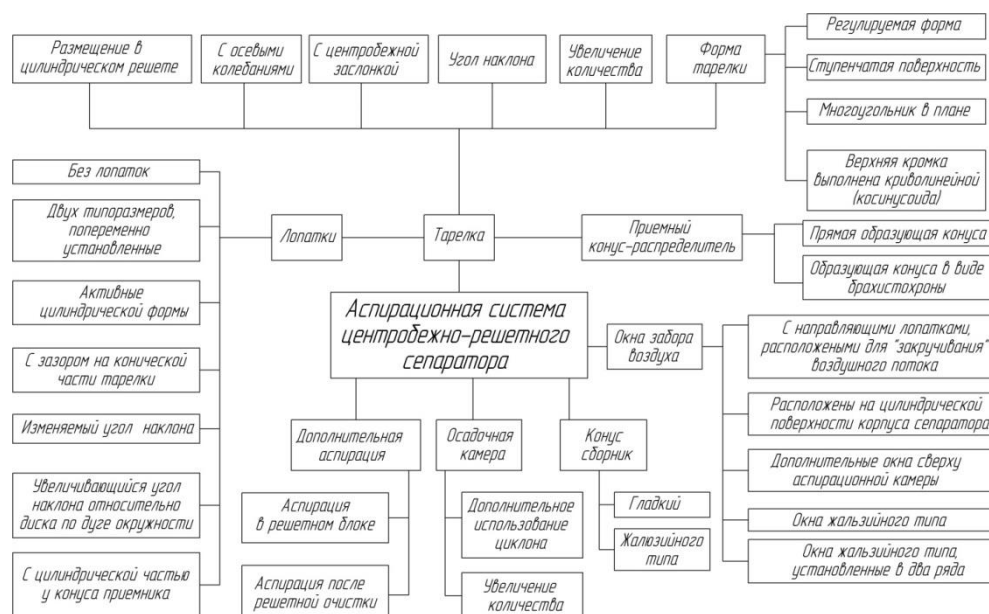


Рисунок 1.11 – Классификация аспирационных систем центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения

Предложенная классификация аспирационных систем центробежно-решетных сепараторов с вертикальной осью вращения в полной мере раскрывает возможности их дальнейшей интенсификации с технологической точки зрения.

Известна зерноочистительные машины, в которых применяются кольцевые пневмосепарирующие каналы, где ввод сепарируемого материала осуществляется конусом, с основанием, имеющим поверхность тора и с криволинейной верхней кромкой (UA 12609).

В данной зерноочистительной машине пневмосепарирующий кольцевой канал работает совместно с решетными блоками. Поэтому с целью упрощения конструкции машины, разбрасыватель приводится во вращение непосредственно от вала ротора, вращающегося с оптимальной для решет скоростью.

Для эффективной работы пневмосепарирующего канала требуется равномерное поступление зернового материала с оптимальной скоростью ввода частиц в канал.

Наиболее близким по своей технической сущности является центробежно-воздушный сепаратор, содержащий цилиндрический корпус,

загрузочную горловину, конический отражатель с кольцевым пневмосепарирующим каналом, направляющий конус, размещенный под загрузочной горловиной на днище чаши разбрасывателя, плоские разгонные лопатки, привод разбрасывателя, выгрузной патрубков. (Патент №2 675 607).

### 1.5. Центробежно-решетные сепараторы с пластинчатым барабаном

Проведенные ранее исследования Стрикунова Н.И., Леканова С.В., Хижникова А.А. [127] по обоснованию параметров центробежно-решетного сепаратора показывают, что одним из важных элементов зернового и подсевного блоков является пластинчатый барабан. Установлено, что наклон пластин к радиусу цилиндра оказывает влияние на эффективность работы не только подсевного блока, но и зернового. По результатам этих исследований показано, что углы наклона рабочей грани пластин к радиусу, обеспечивающих работоспособность блоков, лежат в пределах от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ .

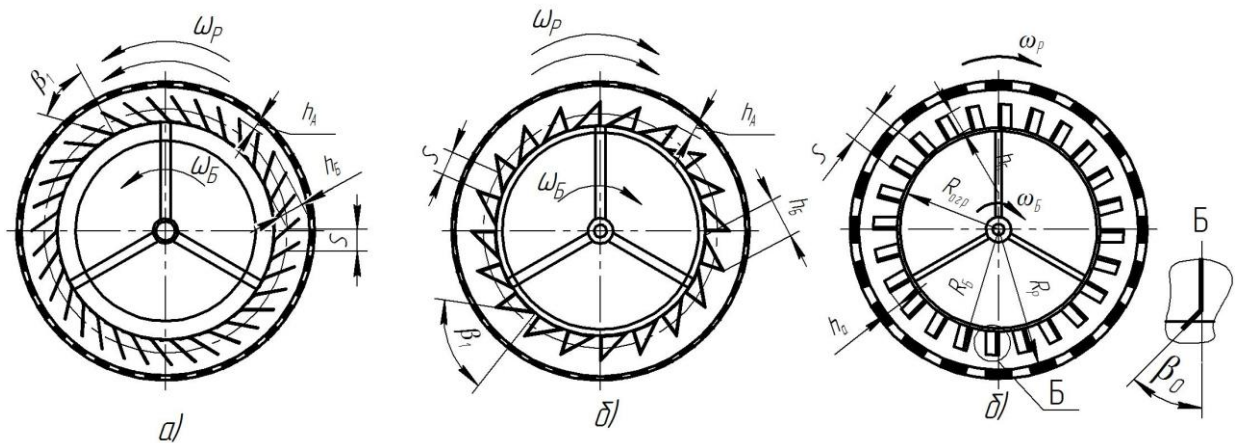


Рисунок 1.12 – Варианты компоновки цилиндрического барабана пластинами в центробежно-решетном сепараторе

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

в) подсевное решето с круглыми отверстиями и пластинами с углом отгиба в основании цилиндра барабана  $\beta_0 = 15 \dots 25^\circ$ .

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

Для интенсификации работы подсевного и зернового цилиндрических решет необходимо идти по пути усовершенствования конструкции пластинчатого барабана.

Исследования показали, что величина шага расстановки пластин и угол наклона пластин к радиусу оказывают существенное влияние на эффективность технологического процесса сепарирования.

Теоретические предпосылки указывают на то, что интервал изменения угла наклона  $\beta_1$  может оказывать значительное влияние на процесс выделения мелких примесей из зерновой смеси. Для работы подсевного решета важно, чтобы вследствие относительного скольжения частиц в зерновом слое между пластинами барабана и в активном слое пористость сыпучего тела была максимальной, а использование предложенных вариантов пластин барабана, позволило повысить эффективность очистки зерновых культур на подсевном решете центробежно-решетного сепаратора.

Для повышения технологического эффекта сепарирования при очистке зерна от мелких примесей есть еще реальные пути интенсификации рабочего процесса, которые требуют дальнейших исследований.

Одним из путей повышения эффективности работы подсевного решета центробежно-решетного сепаратора может быть обеспечено за счет изменения угла наклона  $\beta_0$  пластин барабана относительно образующей цилиндрического барабана в нижней его части.

## 1.6. Выводы и задачи исследований

На основе анализа существующих центробежно-решетных сепараторов для очистки зерна, можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее перспективным направлением следует считать центробежно-решетное сепарирование, при котором разделение зернового материала на решетках с круглыми отверстиями происходит по двум размерным признакам – длине и ширине частиц, а на решетках с продолговатыми отверстиями в режиме подсевного решета на выделении мелких примесей.

2. Проведенный анализ решетных устройств показывает на практическую возможность и целесообразность разделения зерновых смесей с использованием подсевного и зернового решета с пластинчатым барабаном, так как применение любой ограничительной поверхности для ориентации зерен связано с резким снижением производительности решета из-за неполной загрузки их рабочей поверхности обрабатываемым материалом.

3. Предлагаемый центробежно-решетный сепаратор однозначно выделяется из всех анализируемых устройств, однако, возможности данного способа сепарирования полностью не реализованы. Существенно интенсифицировать процесс сепарации можно за счет усовершенствования конструкции внутреннего пластинчатого барабана.

В связи с этим основное внимание в данной работе уделено теоретическому и экспериментальному исследованию процесса сепарации на подсевном решете центробежно-решетного сепаратора.

**Цель исследования:** интенсификация технологического процесса очистки зернового вороха в цилиндрическом подсевном решете центробежно-решетного сепаратора путем изменения угла отгиба радиальных пластин в основании цилиндра барабана.

### **Задачи исследования:**

1. Разработать механико-математическую модель процесса движения зернового материала по подсевному решету с пластинчатым барабаном и процесса сепарации на нем с учетом работы пластин.

2. Установить закономерности основных параметров сепарирования при очистке зерна на цилиндрическом подсевном решете с радиальными пластинами барабана.

3. Провести хозяйственную проверку центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и дать его технико-экономическую оценку.



## **Глава 2. Теоретическое исследование процесса сепарации зерновой смеси на подсевном решете с пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора**

### **2.1. Описание технологической схемы центробежно-решетного сепаратора**

Опираясь на исследования, проведенные Тарасовым Б.Т. [110], Стрикуновым Н.И. [95], Лекановым С.В., Хижниковым А.А. [123], 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).

Центробежно-решетный сепаратор, представленный на рисунке 2.1, состоит из неподвижной загрузочной горловины 25, конической обечайки 12 с делительным решетом 10 внутри неё, имеющей роликовую опору 30, два блока решет 15 и 22, и установленный внутри блоков пластинчатый барабан 34.

С целью интенсификации процесса сепарации были изготовлены пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения 14, размещенные вдоль образующей. Угол отгиба пластин находится в интервале  $\beta_0 = 15^\circ \dots 25^\circ$ .

Пластины имеют полки для крепления и установлены таким образом, что образуют щелевое решето.

Центробежно-решетный сепаратор относится к зерноочистительным машинам и предназначен для сепарации зерновых смесей воздушным потоком и решетами.

Центробежно-решетный сепаратор содержит загрузочную горловину 25, привод 1 и цилиндрический корпус 28, в котором на приводном валу 18

размещены: коническая обечайка 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, имеющей в верхней части шпоночный паз для шпонки 37 и стопорный болт 38 для соединения с валом 36 конического разбрасывателя, а в нижней части профрезерованные пазы под углом  $120^\circ$  для соединения с конической обечайкой. Нижним концом втулка 32 закреплена на ступице 39 через бронзовую втулку 40 на валу пластинчатого барабана 34. На ступице конической обечайки размещены три луча 35 разнесенные друг от друга под углом в  $120^\circ$ .

Решетный блок состоит из конической обечайки 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.

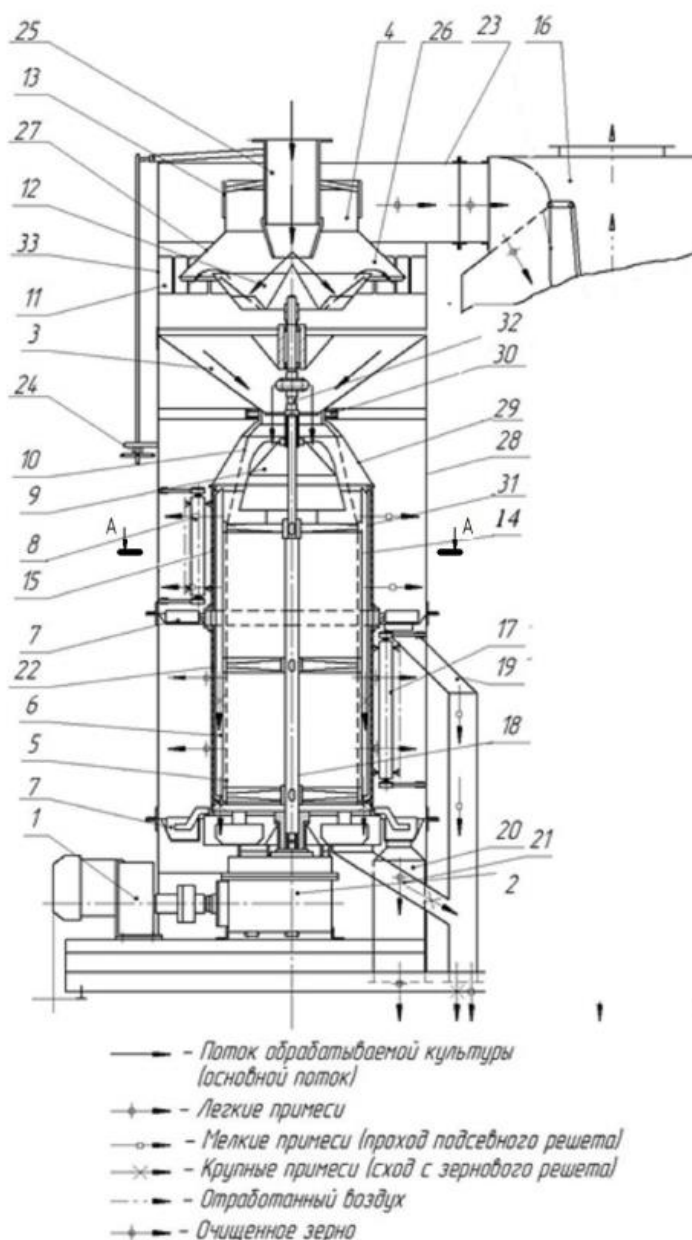


Рисунок 2.1 – Центробежно-решетный сепаратор:

1 – Электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – конический сборник; 4 – цилиндрическая часть; 5 – цилиндрическое колосовое решето; 6 –

пластинами зерновой секции; 7 – скребок; 8 – кольцевая щетка подсевного решета; 9 – питатель; 10 – коническое делительное решето; 11 – заборные окна; 12 – конический разбрасыватель зерна; 13 – регулировочный стакан; 14 – пластины подсевной секции; 15 – блок цилиндрического подсевного решета; 16 осадочная камера; 17 – кольцевая 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; 25 – загрузочная горловина; 26 – кольцевой пневмосепарирующий канал; 27 – отражатель; 28 – основной цилиндрический корпус; 29 – коническая обечайка; 30 – роликовая опора; 31 - пластинчатый барабан; 32 – втулка; 33 - дополнительный цилиндрический корпус; 34- пластинчатый барабан; 35 – луч; 36 – вал; 37 - паз для шпонки; 38 – стопорный болт; 39-ступица; 40 – бронзовая втулка.

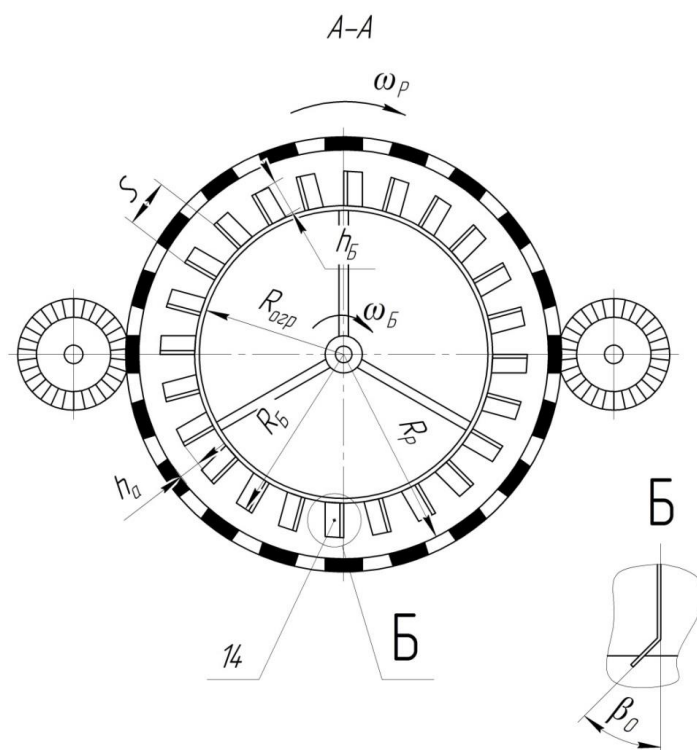


Рисунок 2.2 – Поперечный разрез подсевного решетчатого блока

Работает центробежно-решетный сепаратор следующим образом. Зерновая смесь поступает в загрузочную горловину 25 и подается на конический разбрасыватель 12. Лопатки сообщают зерновой смеси угловую

скорость, равную угловой скорости разбрасывателя. Далее зерновая смесь 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 и грубых 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. Очистка отверстий решет 15 и 22 от застрявших зерен производится цилиндрическими щетками 8 и 17.

## **2.2. Параметры, определяющие движение зерновой смеси на подсевном решете с пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора**

Рассмотрим процесс движения зерновой смеси по цилиндрическому подсевному решету в центробежно-решетном сепараторе (ЦРС) с внутренним барабаном при использовании пластин, размещенных вдоль образующей, с подпором зернового материала в конце цилиндра и решета с круглыми отверстиями диаметром  $\Delta = 3,6$  мм. Для построения механико-

математической модели процесса движения зерновой смеси в ЦРС принимаем ряд допущений:

- рассматриваем только установившийся процесс движения зернового материала;
- коэффициенты трения постоянны и не зависят от окружной скорости решета и барабана;
- смесь можно считать однородной;
- сыпучая смесь движется в сепараторе под действием центробежной силы, силы тяжести и силы инерции материала;
- ускорение частиц, находящихся в кольцевом активном слое и заключенными между пластинами барабана, принимаем постоянными и равными ускорению каждого из слоев;
- пластины можно считать параллельными друг другу в радиальном направлении.

Модель движения зерновой смеси по решету показана на рисунке 2.3. В данной модели входными параметрами являются:

- $f_1$  – коэффициент трения зерна о металлическую пластину внутреннего барабана;
- $f_0$  – коэффициент трения зерна о зерно;
- $f_p$  - коэффициент трения зерна о решето.

Регулируемые параметры:

- $S$  – шаг расстановки пластин на барабане;
- $\omega_p$  и  $\omega_b$  – угловая скорость вращения решета и барабана;
- $\beta_1$  – угол наклона пластин барабана;
- $\beta_0$  – угол отгиба пластин в конце цилиндра барабана;
- $\Delta$  – геометрические размеры отверстий решет;
- $Q$  – подача зерновой смеси.

Выходными параметрами являются:

- $\mu$  – коэффициент трансформации силового давления;

$-a_{zA}, a_{zB}$  – ускорение движения зерновой смеси в осевом направлении в активном слое и между пластинами барабана соответственно;

$-\chi$  – угол между вектором силы трения активного слоя о решетку и горизонтом;

$-\beta_{II}$  (постели) – угол наклона силы трения слоя зерна, заключенного между пластинами об активный слой относительно горизонта.

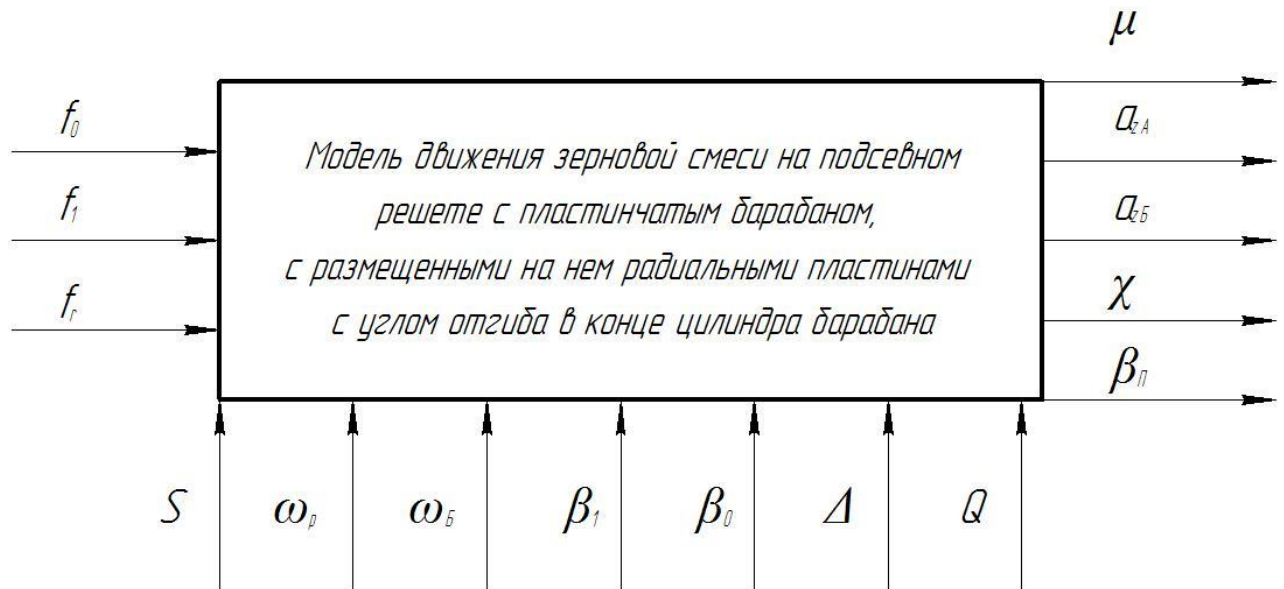


Рисунок 2.3 – Функциональная модель движения зерновой смеси на центробежно-решетном сепараторе

Силы, действующие на сыпучее тело между пластинами барабана:

$F_B^u$  – центробежная сила инерции:

$$F_B^u = m_B \cdot \omega_B^2 \cdot R_{B\text{ср}}; \quad (2.1)$$

где  $m_B = S_B \cdot l_B \cdot \gamma_{см}$  – масса зерновой смеси между пластинами барабана;

$S_B$  – площадь поперечного сечения элемента между пластинами барабана;

$l_B$  – высота выделенного элемента;

$\omega_B$  – угловая скорость пластинчатого барабана;

$R_{B\text{ср}}$  – средний радиус пластинчатого барабана;

$\gamma_{см}$  – объемная масса зерновой смеси.

$F_2^u$  – центробежная сила инерции в выделенном элементе при действии на него активного слоя;

$F_B^u = m_B \cdot a_{zB}$  – сила инерции, действующая на сыпучие тело между пластинами барабана в осевом направлении;

$m_B$  – масса зернового слоя;

$a_{zB}$  – осевое ускорение;

$N, N_1$  – нормальная реакция радиальной и наклонной пластин;

$T = f_1 \cdot N_1, T_1 = f_1 \cdot N_1$  – силы трения зерновой массы о грани пластины ( $f_1 = \operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент трения зерна о пластину);

$N_0$  – нормальная реакция зерновой массы активного слоя;

$T_0 = f_0 \cdot N_0$  – сила трения элемента зерновой смеси, заключенного между пластинами барабана, о зерновую массу активного слоя ( $f_0 = \operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент трения зерна о зерно);

$G_B = m_B \cdot g$  – сила тяжести зернового слоя, заключенного между пластинами барабана:

$m_B$  – масса зерновой смеси между пластинами барабана;

$g$  – ускорение свободного падения;

$N_2$  – нормальная реакция зерновой массы на выделенный элемент, заключенный между пластинами при рассмотрении действия сил активного слоя;

$G_2 = m_2 \cdot g$  – сила тяжести зернового слоя, заключенного между пластинами барабана с учетом действия сил от активного слоя:

$m_2$  – масса зерновой смеси между пластинами барабана во втором выделенном элементе;



$F_2^{ин} = m_2 \cdot a_{z2}$  – сила инерции, действующая на выделенный элемент, заключенный между пластинами барабана в осевом направлении при учете действия сил от активного слоя:

$a_{zB}$  – осевое ускорение.

Силы, действующие на выделенный элемент в активном слое подсевного блока:

$T_P = f_P \cdot N_P$  – сила трения зерновой смеси о решето ( $f_P = tg \varphi$  – коэффициент трения зерна о решето);

$N_P$  – нормальная реакция решета;

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

$F_A^{инц} = m_A \cdot a_{zA}$  – сила инерции, действующая на сыпучее тело, выделенного элемента в осевом направлении ( $m_A$  – масса выделенного зернового слоя,  $a_{zA}$  – осевое ускорение активного слоя);

$G_A = m_A \cdot g$  – сила тяжести выделенного элемента в активном слое,

где  $m_A$  – масса зерновой смеси между пластинами барабана.

Нормальная реакция пластины, используя формулу может быть записана в виде:

$$N = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{см} \cdot h_B^2 \cdot m_i \cdot l_B \cdot \omega_B^2 \cdot R_{Bcp}, \quad (2.2)$$

где  $h_B$  – толщина зернового слоя между пластинами барабана;

$m_i = tg^2 \cdot (45^\circ - \frac{\varphi}{2})$  – коэффициент подвижности [34].

### 2.3. Обоснование конструктивных параметров пластинчатого барабана

В кольцевом слое зернового материала, расположенного между кромками пластин барабана и решетом, происходит относительное проскальзывание элементарных слоёв зерна и перемещение их по

поверхности решета. Скольжение относительно поверхности решета даёт возможность зёрнам короткой (мелкой) фракции проходить через отверстия решета. На рисунке 2.4 показан процесс прохода мелких примесей через отверстия подсевного решета.

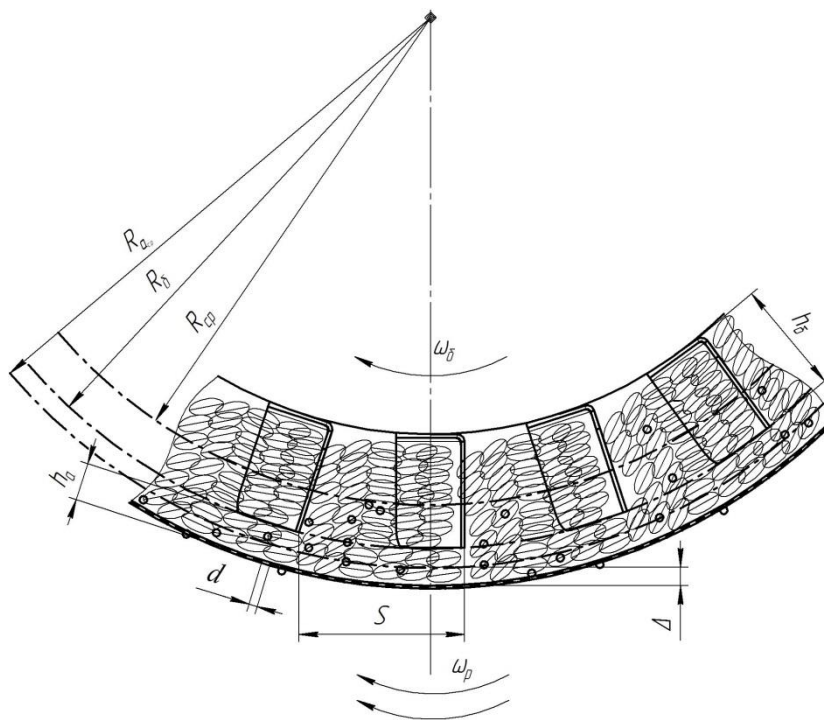


Рисунок 2.4 – Схема к определению параметров пластинчатого барабана

Процесс выделения мелких частиц происходит также как и на плоских решетках с круглыми отверстиями, только значительно интенсивнее, так как силы инерции, обуславливающие западание частиц в отверстия, значительно больше сил веса (они являются основным фактором западания и просеивания частиц на плоских решетках).

Прохождение зерна через отверстия решета из условия его относительного перемещения не раскрывает полностью сущности процесса сепарации, поскольку для выделения проходовой фракции, кроме того, чтобы частице не перескочить через отверстие, необходимо ещё занять по отношению к нему определенное положение. Иначе говоря, необходимо быть сориентированной относительно отверстия.

Согласно исследованиям Г.Д. Терскова [111] и вышесказанного для выделения мелких примесей целесообразно применять решета с круглыми

отверстиями, когда отношение  $\frac{d}{l} < 0,5$  (малые), а при работе зернового решета в режиме овсюгоотборника, необходимо использовать решето с диаметром отверстий, когда отношение  $0,5 < \frac{d}{l} < 1$  (среднее).

Поэтому роль пластинчатого барабана в организации процесса очистки зерна от мелких (коротких) и длинных примесей, помимо правильного подбора решет является достаточно весомой.

Для обоснования конструктивно-кинематических параметров пластинчатого барабана с радиальным размещением пластин необходимо установить зависимость безразмерного показателя от этих параметров [109].

$$Z = \frac{P}{m \cdot \omega_p \cdot R} \quad (2.3)$$

Действующую на частицу радиальную силу  $P$  выразим через радиальное давление

$$P = \frac{p}{n_1}, \quad (2.4)$$

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

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

Тогда

$$Z = \frac{P}{m \cdot \omega_p^2 \cdot R} = \frac{P}{m_1 \cdot \omega_1^2 \cdot R}, \quad (2.5)$$

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

Радиальное давление  $P$  зернового материала на контактирующий с решетом элементарный слой складывается из двух составляющих. Первая из них обусловлена действием на кольцевой слой центробежных сил, вторая –

сил веса. Радиальное давление зерновой смеси, обусловленное действием центробежных сил, представим в виде суммы

$$P = P_{\text{акт}} + P_{\text{б}}, \quad (2.6)$$

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

$P_{\text{б}}$  – радиальное давление, создаваемое зерновой смесью, находящейся между пластинами барабана.

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

$$Z = Z_{\text{акт}} + Z_{\text{б}} = \frac{P_{\text{акт}}}{m_1 \cdot \omega_p^2 \cdot R} + \frac{P_{\text{б}}}{m_1 \cdot \omega_b^2 \cdot R} \quad (2.7)$$

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

$$P_{\text{акт}} = (n_a - 1) \cdot m_1 \cdot \omega_{\text{ср}}^2 \cdot R_{\text{а ср}} \quad (2.8)$$

где  $n_a = \frac{h_a}{\Delta}$ ,

$\Delta$  – толщина элементарного слоя;

$h_a$  – толщина активного слоя;

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

Безразмерный показатель для активного слоя:

$$Z_{\text{акт}} = \left( \frac{n_a - 1}{4} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\omega_b}{\omega_p} \right)^2 \cdot \frac{R_{\text{а ср}}}{R} \quad (2.9)$$

Аналогично радиальное давление между пластинами барабана:

$$P_{\text{б}} = \omega_b^2 \cdot m_b \cdot R_{\text{б ср}} \cdot \mu, \quad (2.10)$$

$$\mu = \frac{N_0}{F_B^{\text{н}}} \quad (2.11)$$

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

Используя формулы (2.9) и (2.10) получим:

$$Z_{\delta} = n_{\delta} \cdot \frac{\omega_{\delta}^2}{\omega_p^2} \cdot \frac{R_{\delta \text{ ср}}}{R} \cdot \mu, \quad (2.12)$$

где  $n_{\delta} = \frac{m_{\delta}}{m_1}$ .

При радиальном расположении пластин ( $\beta_1 = 0$ ) коэффициент трансформации силового давления принимает значение  $\mu \geq 1$ .

Для установления значений основных параметров пластинчатого барабана определим безразмерный показатель  $Z = Z_{\text{акт}} + Z_{\delta}$ , найдем его численное значение и построим график зависимости от коэффициента  $\mu$  (рисунок 2.5).

$$Z = \left(\frac{n_a - 1}{4}\right) \cdot \left(1 + \frac{\omega_{\delta}}{\omega_p}\right)^2 \cdot \frac{R_{a \text{ ср}}}{R} + n_{\delta} \cdot \frac{\omega_{\delta}^2}{\omega_p^2} \cdot \frac{R_{\delta \text{ ср}}}{R} \cdot \mu \quad (2.13)$$

где  $R_{a \text{ ср}} = R - \frac{h_a}{2}$ ;  $R_{\delta \text{ ср}} = R_p - h_a - \frac{h_a}{2}$ ;  $n_a = \frac{h_a}{\Delta}$ ;  $n_{\delta} = \frac{h_{\delta}}{\Delta}$

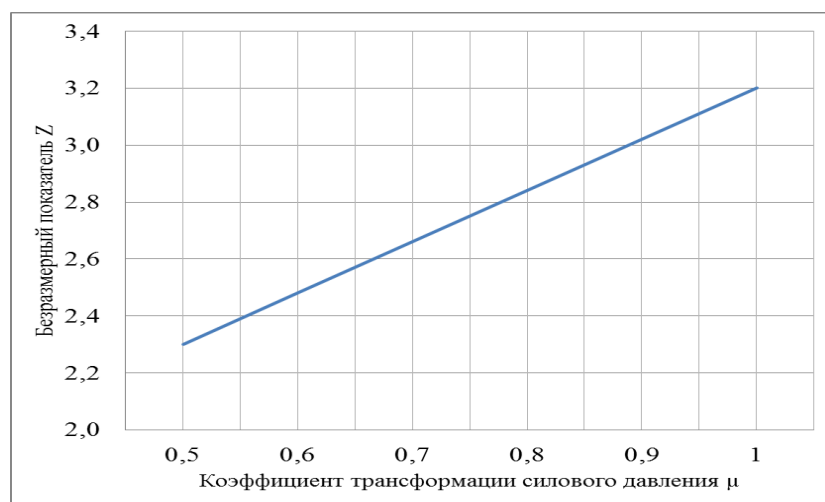


Рисунок 2.5 – График зависимости безразмерной величины  $Z$  от коэффициента трансформации силового давления  $\mu$

Проведенные подсчеты показывают, что при  $\omega_{\delta} < \omega_p$ ,  $h_a = 9 \dots 12$  мм,  $\Delta = 3$  мм и  $\mu = 1$  работоспособность центробежно-решетного сепаратора будет обеспечена ( $Z \geq 3$ ) в достаточно широком интервале изменения величины отношения угловых скоростей  $\frac{\omega_{\delta}}{\omega_p}$ , если общую толщину кольцевого слоя  $h_{\text{сл}} = h_a + h_{\delta}$  принять равной 35...40 мм, при этих значениях толщина слоя  $n_a = 3 \dots 4$  и  $n_{\delta} = 8$ , а шаг расстановки пластин  $S = 32$  мм. [101]

#### 2.4. Силы, действующие на слой, заключенный между пластинами барабана с учетом действия сил от активного слоя

Рассмотрим равновесие слоя заключенного между пластинами АВЕС, при действии активного слоя зерна, изображенного на рисунке.

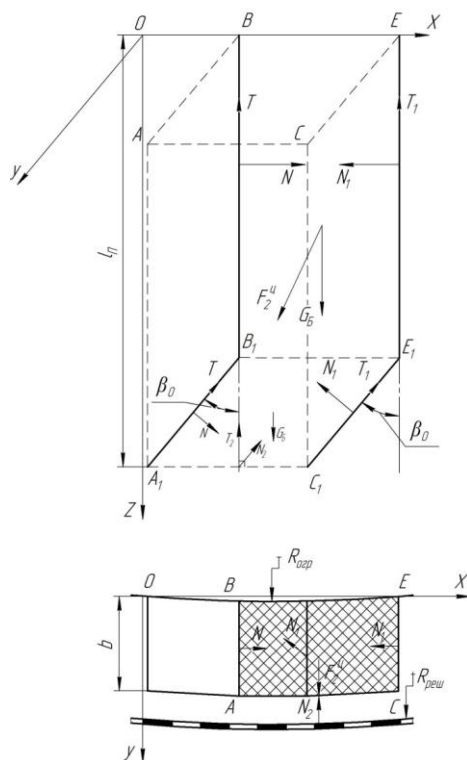


Рисунок 2.6 – Слой зерна, заключенный между пластинами барабана с учетом действия активного слоя

Составим систему уравнений, спроецировав силы на оси координат:

$$\sum X = N - N_1 + N \cdot \sin \beta_0 - N_1 \cdot \sin \beta_0 + N \cdot f \sin \beta_0 + N_1 \cdot f_1 \cdot \sin \beta_0 = 0; \quad (2.14)$$

$$\sum Y = F_2^H - N_2 + N \cdot \cos \beta_0 - N_1 \cdot \cos \beta_0 = 0; \quad (2.15)$$

$$\sum Z = G_2 - N \cdot f - N_1 \cdot f_1 - N_2 \cdot f_2 + N \cdot \sin \beta_0 - N_1 \cdot \sin \beta_0 - m_2 \cdot a_{z2} = 0. \quad (2.16)$$

Преобразуем уравнения с учетом сил трения и инерции:

$$\sum X = N - N_1 + N \cdot \sin \beta_0 - N_1 \cdot \sin \beta_0 + N \cdot f \sin \beta_0 + N_1 \cdot f_1 \sin \beta_0 = 0; \quad (2.17)$$

$$\sum Y = F_2^H - N_2 + N \cos \beta_0 - N_1 \cos \beta_0 = 0; \quad (2.18)$$

$$\sum Z = G_2 - N \cdot f - N_1 \cdot f_1 - N_2 \cdot f_2 + N \cdot \sin \beta_0 - N_1 \cdot \sin \beta_0 - m_2 \cdot a_{z2} = 0. \quad (2.20)$$

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

Из выражения (2.18) найдем:

$$N_2 = F_2^H + N \cdot \cos \beta_0 - N_1 \cdot \cos \beta_0 \quad (2.21)$$

Из выражения (2.17) найдем:

$$N_1 = \frac{N + N \cdot (\sin \beta_0 + f \cdot \sin \beta_0)}{1 - (\sin \beta_0 + f \cdot \sin \beta_0)} \quad (2.22)$$

Проведем преобразование, вводя безразмерную величину В:

$$B = \left( \frac{1 + (\sin \beta_0 + f \cdot \sin \beta_0)}{1 - (\sin \beta_0 + f \cdot \sin \beta_0)} \right) \quad (2.23)$$

Тогда:

$$N_1 = N \cdot B \quad (2.24)$$

Решим совместно (2.22), подставив в выражение (2.24):

$$N_2 = F_2^H + N \cdot \cos \beta_0 - N \cdot B \cos \beta_0$$

$$N_2 = F_2^H + N \cdot \cos \beta_0 \cdot (1 - B)$$

Подставив (2.22) в (2.20) и после преобразований, получим:

$$G_2 - N \cdot B \cdot f - N \cdot B \cdot f_1 - F_2^H + N \cdot \cos \beta_0 \cdot (1 - B) \cdot f_2 + N \cdot \sin \beta_0 - N \cdot B \cdot \sin \beta_0 = m_2 \cdot a_{z2} \quad (2.25)$$

Из выражения (2.24) выразим ускорение зерновой смеси между пластинами барабана:

$$a_{z2} = \frac{G_2 - F_2^H - N \cdot (B \cdot f - B \cdot f + \cos \beta_0 (1 - B) \cdot f_2 + \sin \beta_0 (1 - B))}{m_2} \quad (2.26)$$

Проведем преобразование, вводя коэффициент  $F$  в выражение (2.26):

$$F = (1 - B) \cdot (\cos \beta_0 + \sin \beta_0) \quad (2.27)$$

Преобразуем выражение (2.26), подставив в него выражение (2.27):

$$F = \left( 1 - \frac{(1 + (\sin \beta_0 + f \sin \beta_0))}{(1 - (\sin \beta_0 + f \sin \beta_0))} \right) \cdot (\cos \beta_0 + \sin \beta_0)$$

где  $F$  – коэффициент, зависящий от угла  $\beta_0$ .

Тогда выражение (2.26) примет следующий вид:

$$a_{z2} = \frac{G_2 - F_2^H - N \cdot F}{m_2} \quad (2.28)$$

где  $G_2 = m_2 \cdot g$ ;

$$F_2^H = m_2 \cdot \omega_B^2 \cdot R_B;$$

$$N = \frac{\gamma_{см} \cdot h_B^2 \cdot l_B \cdot \omega_B^2 \cdot R_{Бср}}{2}.$$

После окончательных преобразований выражение (2.28) примет вид:

$$a_{z2} = g - \omega_B^2 \cdot R_{Бср} \left( 1 - \frac{\gamma_{см} \cdot h_B^2 \cdot l_B}{2} \cdot F \right) \quad (2.28)$$

По результатам проведенных теоретических исследований получаем следующие зависимости, представленные в виде графиков на рисунках 2.7 и 2.8.



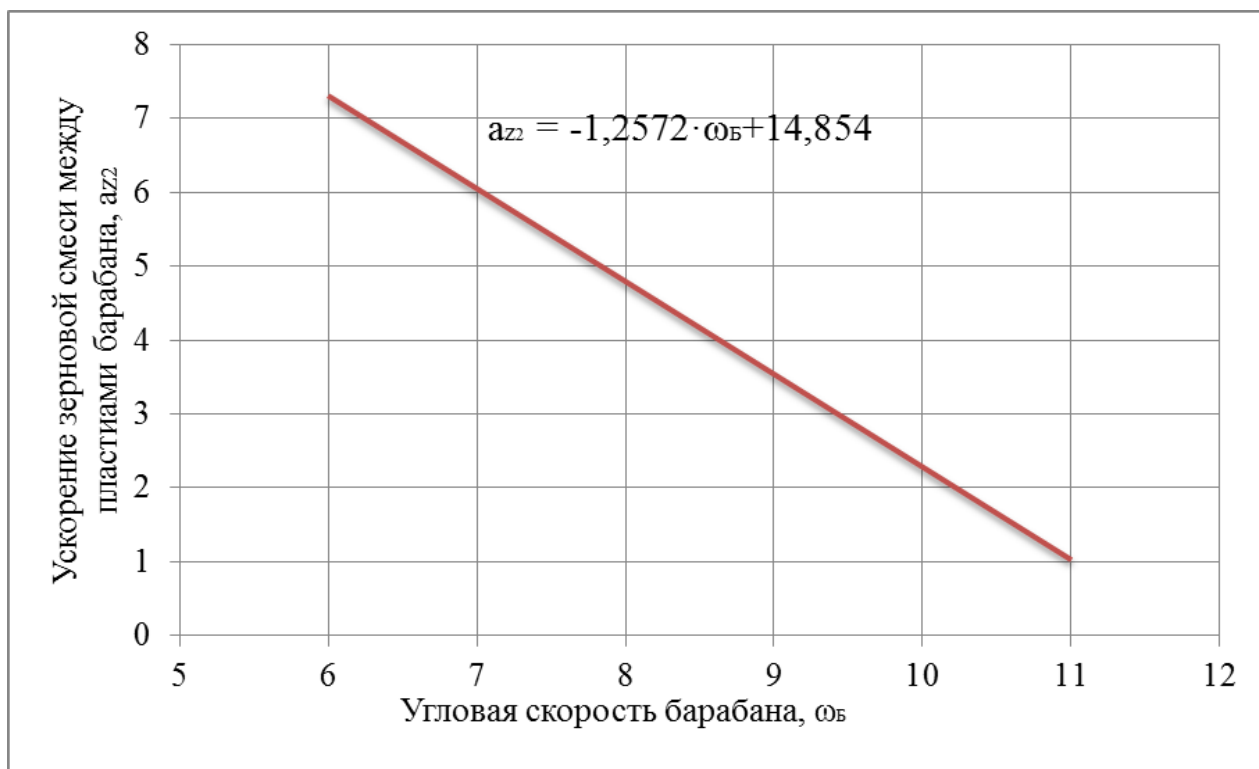


Рисунок 2.7 – Зависимость ускорения зерновой смеси между пластинами от угловой скорости барабана

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

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

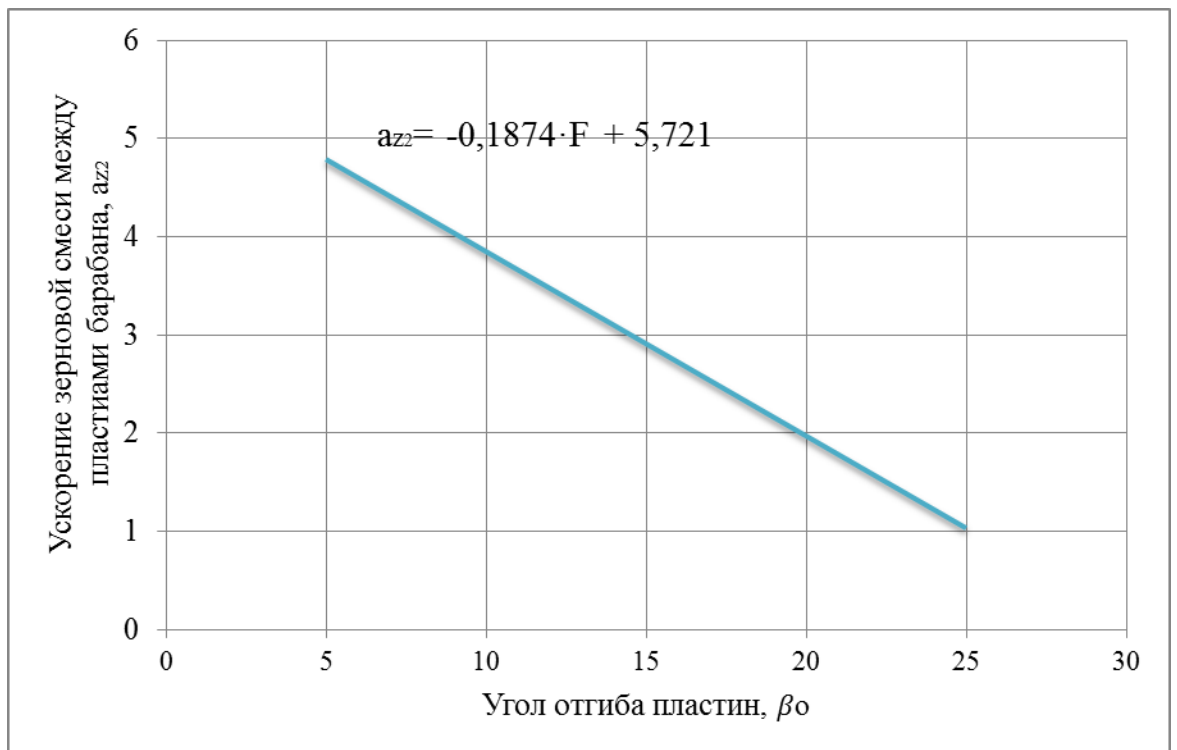


Рисунок 2.8 – Зависимость ускорения зерновой смеси между пластинами от угла отгиба пластин в конце цилиндрического барабана

Анализ полученной зависимости показывает, что для исключения как чрезмерного давления пластин на зерно, так и «зависания» зерна между пластинами, значение угла  $\beta_0$  должно лежать в пределах  $15^\circ \dots 25^\circ$ .

При таких значениях угла  $\beta_0$  значительного изменения в сторону увеличения коэффициента  $\mu$ , а следовательно и возрастанию давления на активный слой не произойдет. Это говорит о том, что пропускная способность сепаратора не снизится.

## 2.5. Силы, действующие на зерновой материал в активном слое

Рассмотрим равновесие сыпучего тела в активном слое:

$$\sum X = T_P \cdot \cos \chi - T_0 \cdot \cos \beta_{\Pi} = 0; \quad (2.29)$$

$$\sum Y = P_A - N_P - N_0 = 0; \quad (2.30)$$

$$\sum Z = G_A - T_P \cdot \sin \chi + T_0 \cdot \sin \beta_{\Pi} - F_{ZA}^{HH} = 0. \quad (2.31)$$

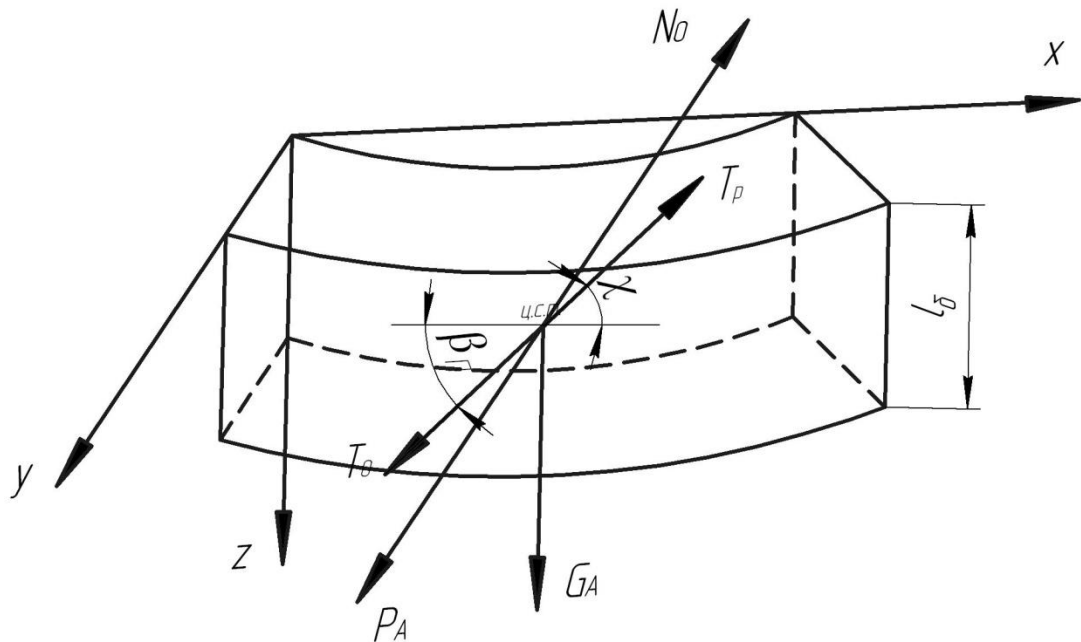


Рисунок 2.9 – Силы, действующие в активном слое

Перепишем уравнения (2.29-2.31) с учетом сил трения, сил инерции и силы тяжести:

$$\sum X = N_P \cdot f_P \cdot \cos \chi - N_0 \cdot f_0 \cdot \cos \beta_\Pi = 0; \quad (2.32)$$

$$\sum Y = P_A - N_P - N_0 = 0; \quad (2.33)$$

$$\sum Z = G_A - N_P \cdot f_P \cdot \sin \chi + N_0 \cdot f_0 \cdot \sin \beta_\Pi - m_A \cdot a_{zA} = 0. \quad (2.34)$$

Из уравнения (2.32) выразим:

$$N_P = P_A - N_0. \quad (2.35)$$

Поделим выражение (2.31) на  $F_B^y$  с учетом (2.35) и выразим  $\cos \chi$ :

$$\cos \chi = \frac{\mu \cdot f_0 \cdot \cos \beta_\Pi}{(\delta - \mu) \cdot f_P}. \quad (2.36)$$

:

$$\chi = \arccos \left( \frac{\mu \cdot f_0 \cdot \cos \beta_\Pi}{(\delta - \mu) \cdot f_P} \right); \quad (2.37)$$

где 
$$\delta = \frac{P_A}{F_B^y} = \frac{S_A \omega_{Acp}^2 R_A^{cp} H \gamma}{S_B \omega_{Bcp}^2 R_B^{cp} H \gamma}.$$

Найдем осевое ускорение сыпучего тела в активном слое из выражения (2.34) с учетом (2.35):

$$a_{ZA} = \frac{G_A - (P_A - N_0) \cdot f_P \cdot \sin \chi + N_0 \cdot f_0 \cdot \cos \beta_{\Pi}}{m_A}. \quad (2.38)$$

Выразим  $N_0$  через  $\mu F_B^y$  и, преобразовав уравнение (2.38), получим:

$$a_{ZA} = g \left[ 1 - \left( \frac{\omega_A^2 R_A^{cp}}{g} + \mu \frac{V_B}{V_A} K_B \right) f_P \sin \chi + \mu \frac{V_B}{V_A} K_B f_0 \sin \beta_{\Pi} \right]; \quad (2.39)$$

где  $V_B$  – объем зерна, находящийся между пластинами барабана;

$V_A$  – объем зерна, занимающий активный слой.

После определения  $\mu$  из выражения (2.11) при известном ускорении определим угол  $\beta_{\Pi}$  из выражения (2.38), поделив его на  $F_B^y$ :

$$\beta_{\Pi} = \arcsin \frac{\xi \cdot \left( 1 - \frac{a_{ZB}}{g} \right) - \psi \cdot f_1 \cdot \sin \alpha}{\mu \cdot f_0}; \quad (2.40)$$

где  $\beta_{\Pi}$  – угол в горизонтальной плоскости между силой трения зернового материала активного слоя о слой зерна, заключенного между пластинами барабана.

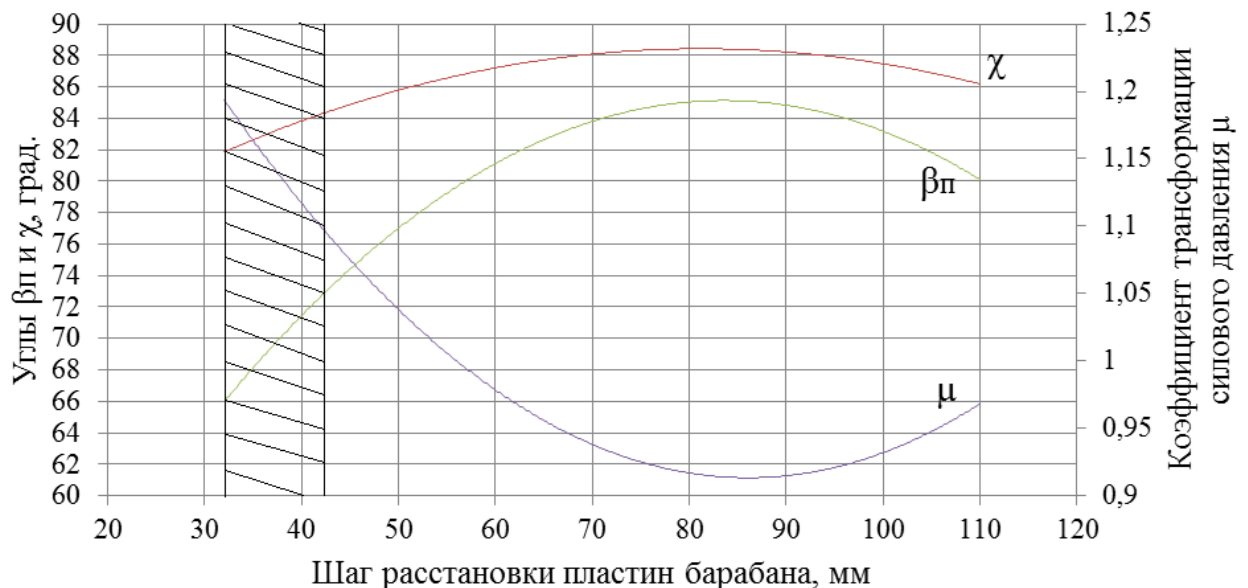


Рисунок 2.10 – Изменение коэффициента трансформации силового давления  $\mu$ , угла  $\beta_{\Pi}$  и угла  $\chi$  в зависимости от шага расстановки пластин на

барабане. Величины угловых скоростей решета и барабана и коэффициенты трения – постоянны [123].

По графику изменения ускорений движения зернового материала в подсевном блоке центробежно-решетного сепаратора (рис. 2.10) хорошо прослеживается влияние шага расстановки пластин на движение зерновых слоев.

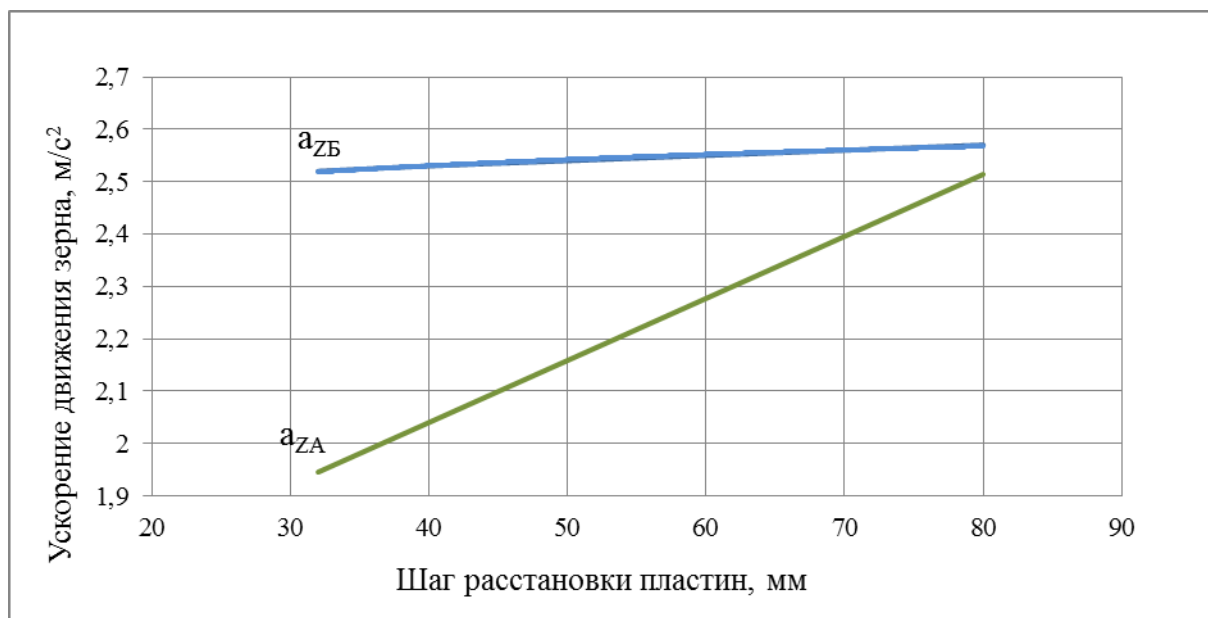


Рисунок 2.11 – Изменение ускорений активного слоя и слоя между пластинами в зависимости от шага расстановки пластин на барабане.

Величины угловых скоростей решета и барабана и коэффициенты трения – постоянны.

С увеличением расстояния между пластинами внутреннего барабана резко повышается ускорение зернового материала в активном слое, что обуславливается уменьшением давления со стороны пластин. Это приводит к уменьшению просеваемости мелких частиц. Ускорение слоя заключенного между пластинами меняется незначительно от 2,55 до 2,57 м/с<sup>2</sup>.

С изменением шага расстановки пластин в большую сторону, ускорение слоя между пластинами барабана и активного слоя увеличивается с 2,0 до 2,5 м/с<sup>2</sup>. Это указывает на рабочий диапазон центробежно-решетного сепаратора. При больших значениях угловой скорости вращения решета возникает уплотнение частиц в слое и, как следствие, его заклинивание.

Когда ускорения зерновых слоев начинают превышать значение  $3 \text{ м/с}^2$ , материал движется по сепарирующей поверхности вдоль решета с большими скоростями и процесс сепарации ухудшается, так как проходная фракция не успевает пройти через отверстия решета. [123]

## **2.6. Уравнение процесса сепарации на подсевном решете с пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора**

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

Таким образом, полноту выделения через решето можем выразить формулой [110]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\theta_1 \times e^{-\frac{t}{\theta_1}} - \theta_2 \times e^{-\frac{t}{\theta_2}}}{\theta_1 - \theta_2}; \quad (2.41)$$

где  $\theta_1$  – среднее время продвижения проходной частицы по толщине общего кольцевого зернового слоя, т.е. среднее время пребывания проходной частицы в общем зерновом слое от момента вступления этого общего слоя на начало решета до момента подхода проходной частицы к сепарирующей поверхности;

$\theta_2$  – среднее время пребывания проходной частицы на решете от момента ее поступления на поверхность решета до момента просеивания;

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

Поскольку  $\theta_1$  и  $\theta_2$  должны определяться экспериментально, а уравнение (2.41) не удастся решить при известных, но различных значениях  $\varepsilon$  (т.е. решить систему относительно двух неизвестных), то величину  $\theta_2$  определим теоретически.

Связав среднее время пребывания  $\theta$  со средним путем скольжения и, обозначив его через средний путь, пройденный по решетке  $H_{cp}$ , получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_{1cp} \times e^{-\frac{H}{H_{1cp}}} - H_{2cp} \times e^{-\frac{H}{H_{2cp}}}}{H_{1cp} - H_{2cp}} \quad (2.42)$$

Для упрощения записи введем обозначения:  $H_{2cp} = \lambda_2$ ;  $H_{1cp} = \lambda_1$  и преобразуем уравнение (2.42) в следующий вид:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\lambda_1 \times e^{-\frac{H}{\lambda_1}} - \lambda_2 \times e^{-\frac{H}{\lambda_2}}}{\lambda_1 - \lambda_2}; \quad (2.43)$$

где  $\varepsilon$  - полнота выделения мелких примесей, определяемая экспериментально.

Применение решет с продолговатыми отверстиями меняет теорию просеиваемости написанную, для круглых отверстий. В продолговатые отверстия может пройти несколько семян мелкой фракции, одновременно подошедших к решетке, а не одно как в круглые. Пластины с отгибом в конце цилиндра барабана способствуют снижению ускорения движения зерновой смеси по высоте решета, тем самым увеличивая время расслоения зернового вороха, что повышает процент выделения мелких примесей из глубины зернового слоя. Сделаем предположение, что процесс выделения мелких примесей в центробежно-решетном сепараторе можно описать однослойной моделью.

Тогда уравнения (2.42) и (2.43) примут вид:

$$\varepsilon = 1 - \lambda \times e^{-\frac{t}{\theta}}; \quad (2.44)$$

$$\varepsilon = 1 - \lambda \times e^{-\frac{H}{\lambda}}. \quad (2.45)$$

Подставляя в формулы  $\varepsilon$ , взятые из результатов конкретных опытов, определим  $\lambda$ . Сравним экспериментальную кривую эффективности очистки зерна от высоты решета и теоретическую, построенную по формуле 2.45 и приведенным на рисунке 2.12.

Найдем  $\theta$  среднее время пребывания материала в сепараторе, для этого воспользуемся формулой:

$$m = Q \times t; \quad (2.46)$$

где  $m$  – масса зерновой смеси, находящейся внутри цилиндрического решета;

$Q$  – производительность центробежно-решетного сепаратора.

Определим массу зерновой смеси с учетом технологических параметров:

$$m = V \times \rho; \quad (2.47)$$

где  $\rho$  – плотность сыпучего тела;

Для пшеницы «критическая» плотность (минимальная плотность укладки частиц в плоскостях сдвига)  $\rho=685 \text{ кг/м}^3$  [84].

$V$  – объем кольцевого слоя зернового материала, находящегося на сепарирующей поверхности.

Соответственно найдем объем:

$$V = S \times H; \quad (2.48)$$

где  $H$  – высота цилиндрического решета;

$S$  – площадь зерна в поперечном разрезе подсевного блока.

Рассмотрим объем зернового материала, находящегося на подсевном цилиндрическом решете при установившемся режиме.

Площадь в поперечном разрезе барабана, занятая зерном:

$$S = S_A + S_B; \quad (2.49)$$



где  $S_A$  – площадь активного слоя;

$S_B$  – площадь зернового материала между пластинами барабана.

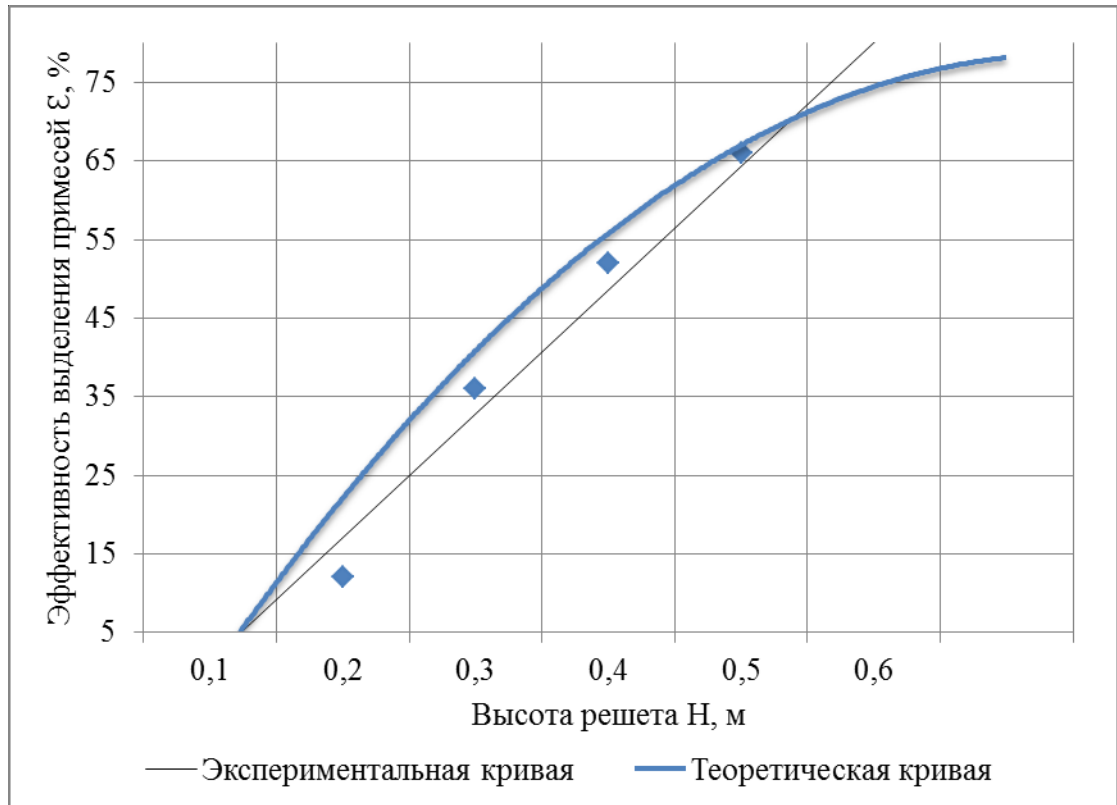


Рисунок 2.12 Зависимости эффективности выделения мелких примесей от высоты цилиндрического решета

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_o = 20^\circ$ ;  $S=32$  мм;  $\omega_p=12,42$  с<sup>-1</sup>;  $Q=12,06$  т/(м<sup>2</sup>×ч);  $h_A=10$  мм,  $W=13$  %;  $\Delta=3,5$  мм.

$$S = \pi(R_p^2 - R_B^2) + \pi(R_B^2 - R_{opr}^2) - \left[ 0,5R_B h_B \text{tg}\beta - \frac{\pi R_{opr}^2 \text{arctg} \frac{h \text{tg}\beta}{R_{opr}}}{360} \right] n; \quad (2.50)$$

где  $R_p$  – радиус решета;

$R_{opr}$  – радиус ограничивающего цилиндра;

$R_B$  – радиус пластинчатого барабана;

$h$  – высота пластины барабана;

$\beta_l$  – угол наклона грани пластины к радиусу, равный 0;

$n$  – количество пластин на барабане.

Время пребывания зернового материала на рабочей поверхности цилиндра с учетом (2.46) и (2.47) определится по формуле:

$$t = \frac{V\rho}{Q}. \quad (2.51)$$

Определив время по выражению (2.51), найдем среднее время пребывания частиц проходовой фракции  $\theta$  на решетке.

Зная значения  $\theta$  и используя выражение (2.41), проследим за изменением полноты выделения проходových частиц в зависимости от среднего времени пребывания зерновой смеси в подсевном блоке и различном количестве пластин на барабане (рис. 2.13)

Выявлены зависимости среднего времени пребывания проходových частиц на решетке при различном угле отгиба пластин на барабане. С увеличением времени пребывания частиц на решетке эффективность сепарирования возрастает. Видно существенное отличие в эффективности сепарирования, например, при большом и малом шагах расстановки пластин на барабане при одном и том же времени пребывания проходových частиц на решетке. Разница в эффективности выделения мелких примесей достигает 20%.

Высота решета оказывает влияние на процесс сепарирования, теоретические и экспериментальные зависимости приведены на рисунке 2.12.

Полученные зависимости отражают суть протекания технологического процесса сепарации и имеют закономерность, определенную другими исследователями [106,139]. Графики показывают, что увеличение высоты решета ведет к росту эффективности сепарирования. Достижение максимальной эффективности сепарирования должно ограничиваться конструктивными размерами барабана. Теоретическая кривая согласуется с экспериментальной в допустимых отклонениях.

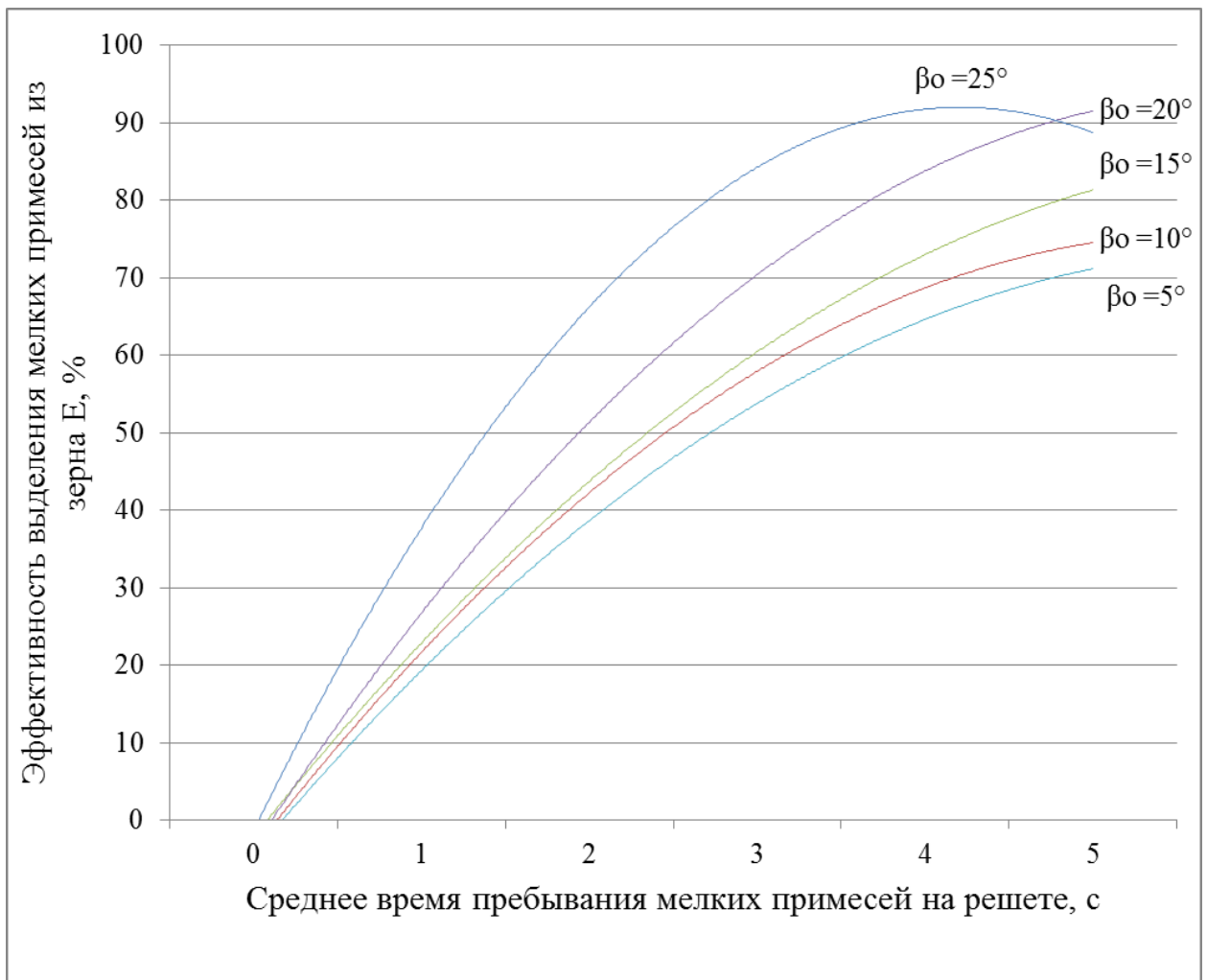


Рисунок 2.13 Изменение полноты выделения проходových частиц в зависимости от среднего времени пребывания зерновой смеси на решетке с различным углом отгиба пластин:

Параметры не менявшиеся в ходе эксперимента  $S=32$  мм;  $\omega_p=12,42$  с<sup>-1</sup>;  $Q=12,06$  т/(м<sup>2</sup>×ч);  $h_A=10$  мм,  $W=13$  %;  $\Delta= 3,5$  мм.

## 2.7. Кинематические и энергетические характеристики центробежно-решетного сепаратора

Привод решета (или блока – подсевное и зерновое решета) осуществляется посредством цилиндрической обечайки, которая жестко связана с приводом редуктора, имеющего два соосных выхода: один выход на пластинчатый барабан, а другой на цилиндрическое решето.

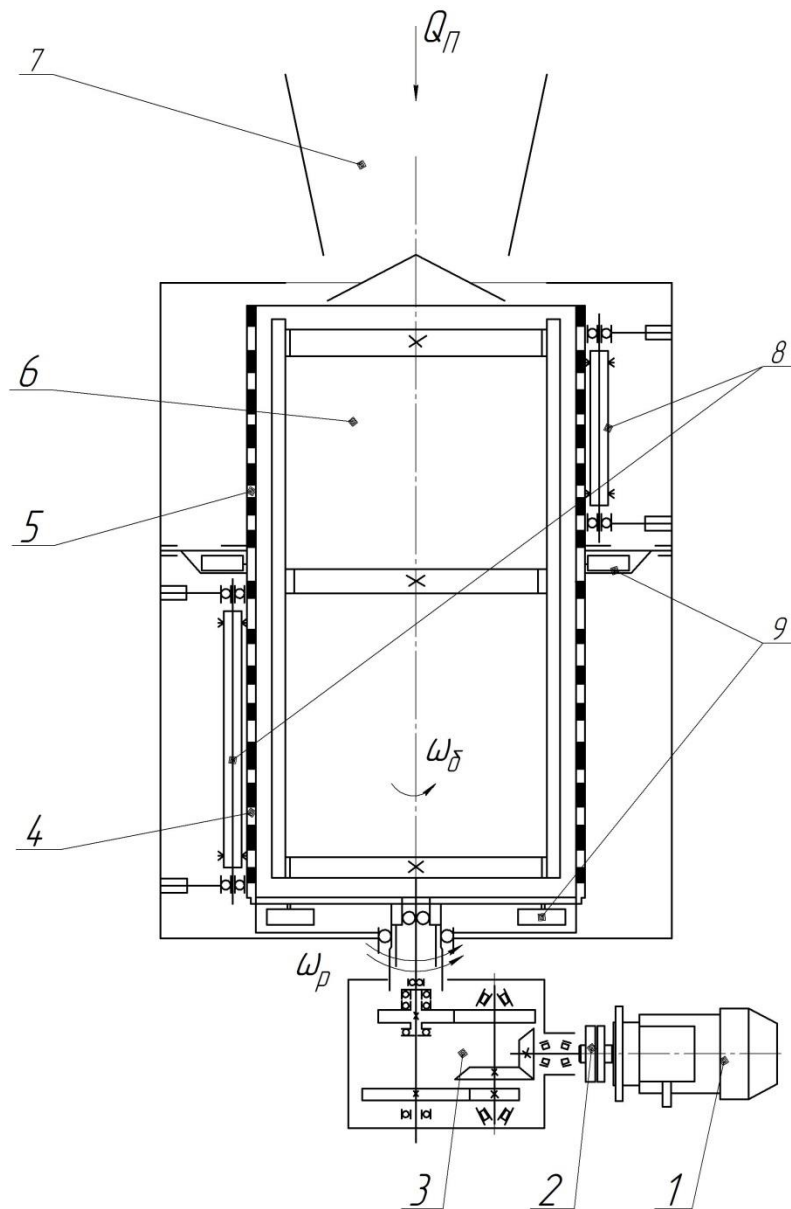


Рисунок 2.14 – Кинематическая схема привода центробежно-решетного сепаратора

1- электродвигатель; 2 – муфта; 3 –редуктор; 4- зерновое решето; 5 – подсевное решето; 6 – пластинчатый барабан; 7 – загрузочная горловина; 8 – щетка; 9 – скребки.

Из рисунка 2.14 следует, что по внешнему контуру крутящий момент передается через решето. Поэтому конструктивно-кинематические параметры цилиндрического решета и пластинчатого барабана должны иметь значения ранее обоснованные [102].

Для этого принимаем диаметр цилиндрического решета  $D=600$  мм, линейную скорость решета  $v_p = \omega_p \cdot R_p = 3,0 \dots 3,5$  м/с, что соответствует частоте вращения решета  $\omega_p = 10,0 \dots 11,6$  с<sup>-1</sup>, а отношение угловых скоростей барабана и решета принимаем равным  $\frac{\omega_B}{\omega_p} = 0,57$ .

Мощность  $N$ , необходимая для работы сепаратора в установившемся режиме представляет сумму мощностей:

$$N = N_{\text{сопр}} + N_{\text{кин}} + N_{\text{тр}} \quad (2.52)$$

$N_{\text{сопр}}$  – мощность, расходуемая на преодоление вредных сопротивлений: трение решета о наружную цилиндрическую щетку, трение в подшипнике скольжения, сопротивление воздуха;

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

$N_{\text{тр}}$  – мощность, расходуемая на трение зерна о зерно в активном слое, о рабочую поверхность решета.

Определим все составляющие энергетических затрат на работу сепаратора.

Мощность, затрачиваемую на преодоление вредных сопротивлений можно учесть увеличением полной мощности на 20...30%.

Мощность, потребная на преодоление вредных сопротивлений  $N_{\text{сопр}}$ , может быть определена экспериментальным путем. В первом приближении можно принять  $N_{\text{сопр}} = N_{\text{хх}}$ , где  $N_{\text{хх}}$  – это мощность, расходуемая на холостой ход сепаратора. [102]

Полагая, что при выходе из сепаратора зерновой материал имеет скорость, равную окружной скорости решета  $V_p = \omega_p \cdot R$  (м/с), получим

$$N_{\text{кин}} = \frac{m^I \cdot v_p^2}{2}, \quad (2.53)$$

где  $m^I$  – секундная масса зернового материала, поступившего в сепаратор.

При рабочей площади цилиндрического решета  $F_p = 2\pi R_p H$ , удельной производительности  $q_F = 20 \frac{\text{т}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$  и  $V_p = 3,5 \text{ м/с}$  получим  $m^I = \frac{q_F \cdot F_p}{3,6}$ .

Подсчеты показывают, что значение  $N_{\text{кин}}$  будет незначительным.

При вращении цилиндрического решета происходит проскальзывание слоев зерновой смеси, находящихся между решетом и пластинами барабана в результате разности их угловых скоростей.

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

Определим мощность  $N_{\text{тр}}$  для случая, когда  $\omega_b < \omega_p$ . При установившемся режиме работы сепаратора, приложенный к цилиндрическому решету приводной момент, необходимый для преодоления  $M_{\text{тр}}$ , создаваемого силами трения зерна о рабочую поверхность решета, будет передаваться через активный слой к барабану.

Мощность, расходуемая на движение зерна в активном слое равна разности:

$$N_{\text{тр}}^I = M_{\text{тр}} \cdot (\omega_p - \omega_b) \quad (2.54)$$

Найдем момент сил трения о первый элементарный слой:

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot R_p \cdot \cos \beta = f \cdot m_1 \cdot Z \cdot \omega_p^2 \cdot R_p^2 \cdot F_p \cdot \cos \beta \quad (2.55)$$

где  $f$  - коэффициент трения;

$Z$  – безразмерный показатель, равный отношению радиальной силы давления зерновой смеси на частицу к центробежной силе инерции частицы (при вращении ее с угловой скоростью решета),  $z=4$ ;

$F_p = 1,24 \text{ м}^2$  – полная площадь решета;

$\beta = 18^\circ$ .

Мощность, затрачиваемая на трение зерна в активном слое и потери в передаче, определится из соотношения:

$$N_{\text{тр}} = 1,5 \cdot N_{\text{тр}}^I \quad (2.56)$$

С учетом этого равенства можно подобрать электродвигатель на привод сепаратора.

Расчеты показывают, что наибольшая доля энергии затрачивается на транспортирование зерна по рабочей поверхности решета и преодоление сил трения зерна о зерно в активном слое.

При работе сепаратора в режиме ворохоочистителя, имеющего кольцевой пневмосепарирующий канал, подсевной и зерновой блоки цилиндрических решет, затраты мощности возрастут за счет применения скребковой транспортирующей системы вывода отходов и очищенного зерна. Это увеличение можно считать небольшим. Основной прирост энергетических затрат даст третья составляющая формулы (2.52).

Следует отметить, что при производстве сепараторов на современном предприятии, позволит несколько снизить энергозатраты на обработку одной тонны зерна при известных параметрах. [102].

### **Выводы по главе:**

1. Анализ математической модели движения зерновой смеси по цилиндрическому подсевному решету показывает, что интенсифицировать процесс очистки зерна от мелких примесей в центробежно-решетном сепараторе можно путем усовершенствования его внутреннего устройства –

пластинчатого барабана. При этом основными факторами, управляющими процессами являются параметры пластинчатого барабана: углы наклона пластин барабана, шаг расстановки пластин, коэффициенты внутреннего и внешнего трения.

2. Существенное влияние на процесс движения зерновой смеси оказывает коэффициент трансформации силового давления зернового материала  $\mu$ , находящегося между пластинами барабана на зерновой материал активного слоя. Наибольшее влияние на коэффициент  $\mu$  оказывает угол наклона  $\beta_1$  пластин к радиусу, а в нижней части этих пластин угол отгиба  $\beta_0$  к образующей цилиндра барабана.

3. Для радиальных пластин угол наклона  $\beta_1 = 0$ , а значение угла отгиба в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0$  должно лежать в пределах  $15^\circ \dots 20^\circ$ .

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



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

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

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

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

#### **3.2. Описание экспериментальной установки**

Установка для проведения экспериментальных исследований должна отвечать следующим требованиям:

- 1) простота конструкции (возможность быстрой разборки и сборки установки, компактность, возможность доступа ко всем элементам сепаратора, небольшие габариты);
- 2) возможность регулировки (конструктивных, кинематических 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-кинематических и технологических параметров одновременно.

Структурно-функциональная схема сепаратора представлена на рисунке 3.1.

Экспериментальная установка состоит из 3 автономных элементов (рис. 3.2):

1. Загрузочного бункера объемом  $0,1 \text{ м}^3$  с дозирующим устройством, способным осуществлять заданную подачу зерна посредством тарированной шиберной заслонки.
2. Рама, 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 неуставившемся режимах работы, а также емкостей, в которые поступает очищенное зерно и мелкие примеси.

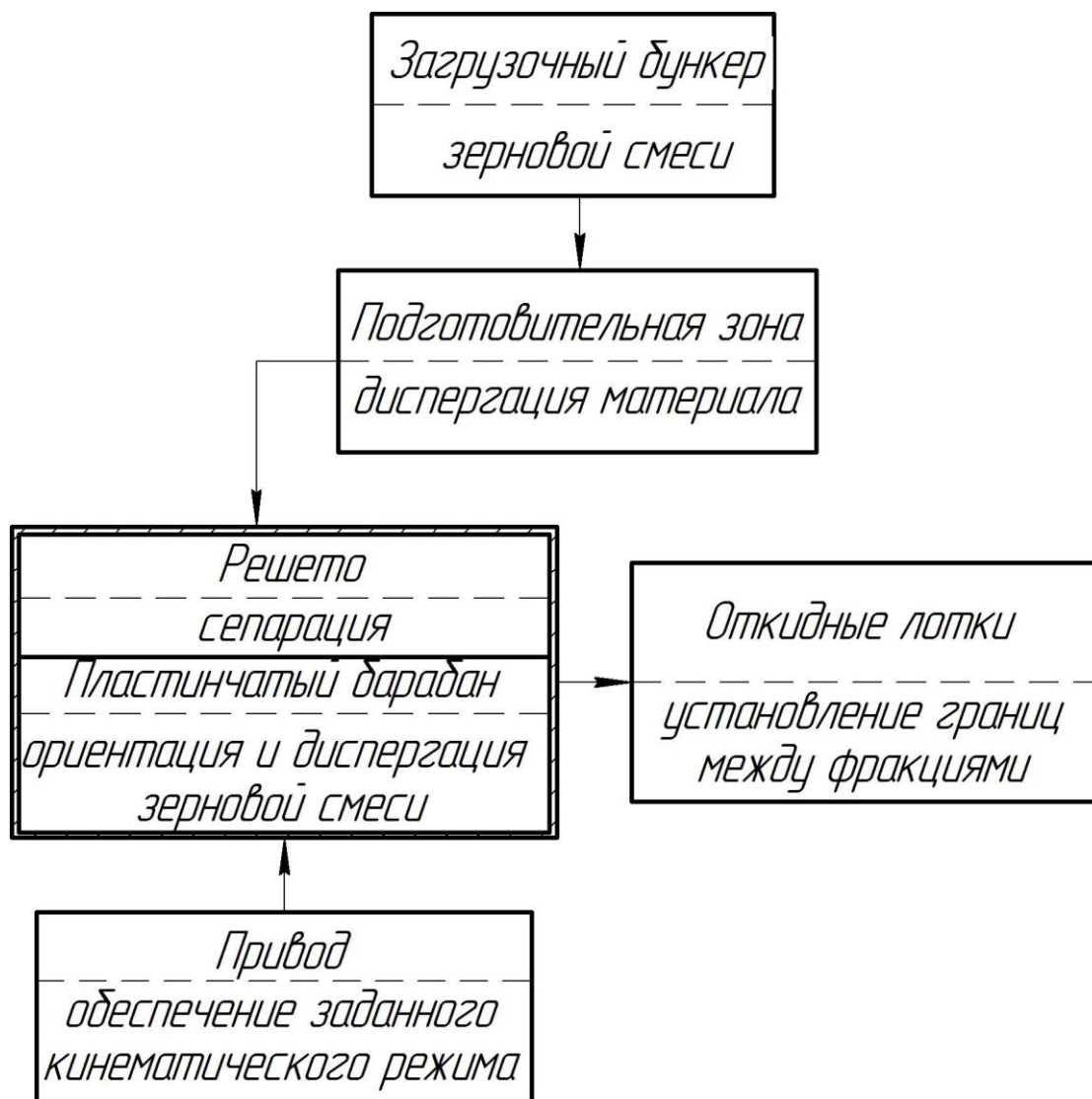


Рисунок 3.1 – Структурно-функциональная схема сепаратора

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 [105].

Выделение примесей из зерновой смеси осуществляется благодаря решету с продолговатыми отверстиями или круглыми отверстиями и

пластинчатому барабану, состоящему из вала, на который установлены два диска с резьбовыми отверстиями для крепления пластин.

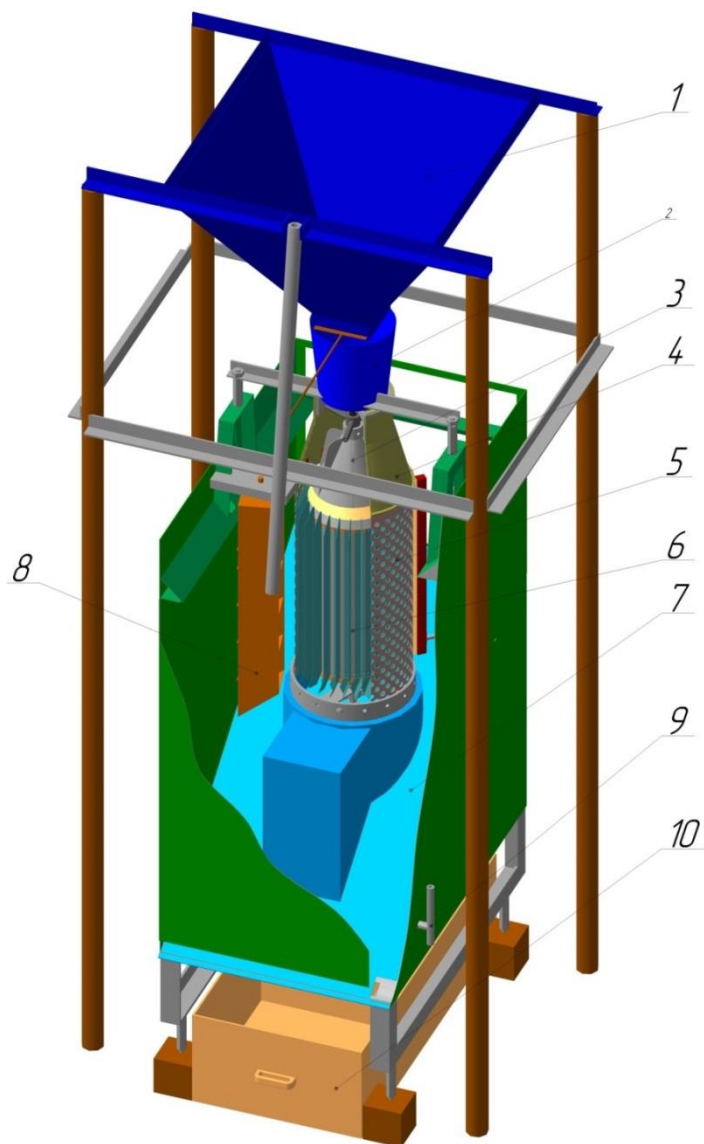


Рисунок 3.2 – 3D- модель лабораторной установки центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом:

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

Использовались пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, угол отгиба изменяли в интервале

15°...25° [138]. Количество пластин на барабане менялось перестановкой их по отверстиям дисков. Длина пластин составляла 500 мм, ширина 23 мм (без крепежных полок) при активном слое равном 10 мм, количество пластин изменялось от 20 до 24 штук. Внутри барабана установлен ограничительный цилиндр. Решета брали диаметром 300 мм и высотой 500 мм (рабочая высота сепарирующей поверхности решета), которые устанавливали на двух обечайках. Использовались решета с круглыми отверстиями различного диаметра и с продолговатыми отверстиями различной ширины. Были изготовлены и исследованы два типа пластин барабана. На рисунке 3.3 представлены геометрические параметры исследуемых пластин.

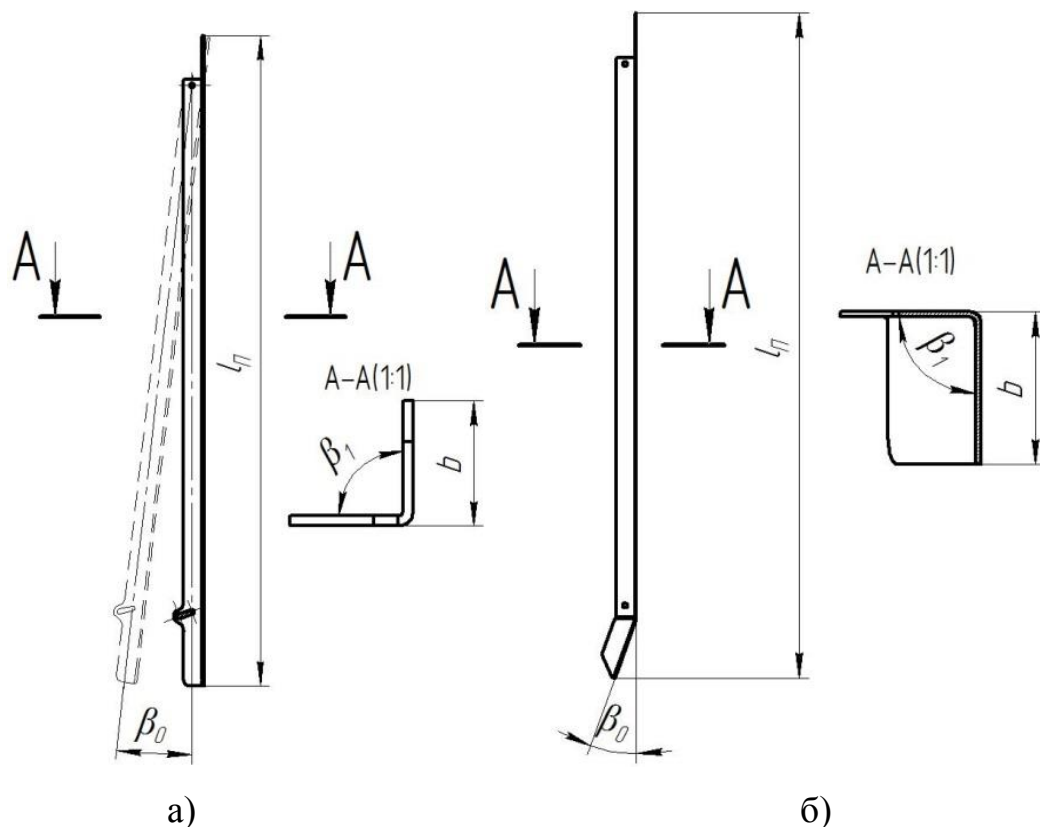
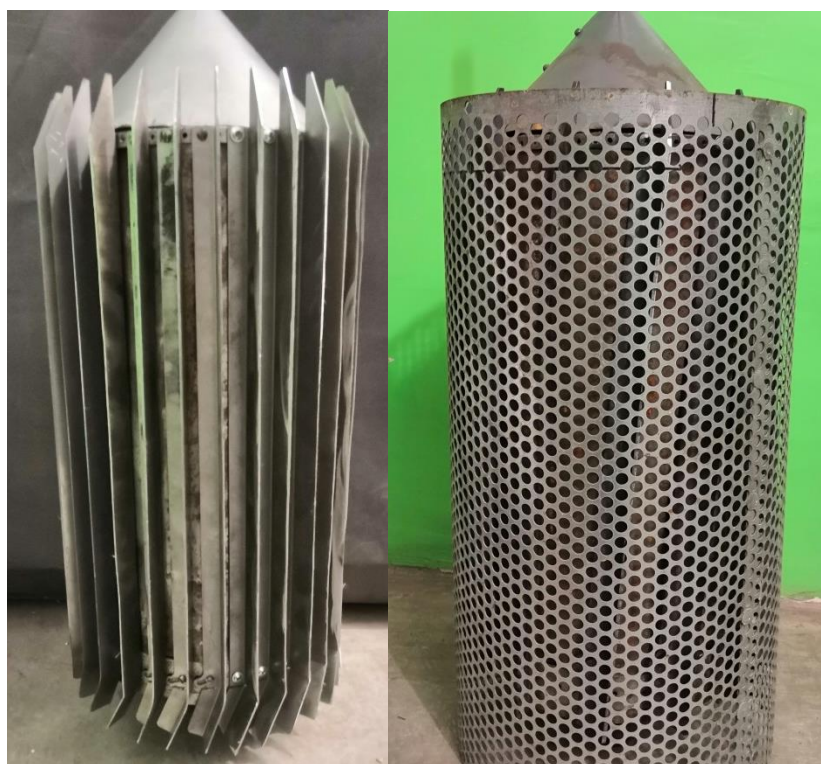


Рисунок 3.3 – Геометрические параметры пластин барабана центробежно-решетного сепаратора:

- а) Радиальные пластины с наклоном рабочего ребра относительно образующей барабана (угол наклона  $\beta_0 = 0 \dots 7^\circ$ );
- б) радиальные пластины, размещенные вдоль образующей, с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения

$$(\beta_0 = 15 \dots 25^\circ)$$

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



а)

б)

Рисунок 3.4 – Составляющие подсевного блока ЦРС:

а) – барабан с радиальными пластинами, с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения;

б) – решето с круглыми отверстиями.

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).



а)

б)

Рисунок 3.5 – Лабораторная установка центробежно-решетного сепаратора

а) общий вид; б) рабочий момент сепаратора.

Экспериментальная установка была создана на кафедре «Сельскохозяйственной техники и технологий», некоторые ответственные детали ее изготавливались в учебно-производственных мастерских Алтайского государственного аграрного университета, для получения опытных образцов пластин была разработана 3D-модель. При поддержке производственной площадки ООО «СибТрансСнаб» пластины были изготовлены на современном высокоточном оборудовании.

### **3.3. 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 –  $\omega_{\text{б}}, \omega_{\text{р}}$ .
2. Время опыта –  $t_{\text{оп}}$ .
3. Массу материала в проходе и в сходе с решета  $m_{\text{пр}}, m_{\text{сх}}$ .

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 барабана изменялась частотным преобразователем Веспер EI-8001-112Н 3Ф 380В 1,5 кВт.

Время опыта замерялось с помощью электронного секундомера.

В опытах потребляемая мощность на работу сепаратора регистрировалась с помощью измерительного комплекса К-50.

Взвешивание проходовой фракции, а также определение массы 1000 зерен осуществлялось на лабораторных электронных весах MW-300Т с точностью измерения 0,01 г.

Масса зерновой смеси взвешивалась на электронных весах МК – 15.2-A20 с максимальной массой взвешивания 15 кг и погрешностью измерения 2 гр.

Для определения влажности зернового материала использовался влагомер He-Lite «PFEUFFER». Высшая степень точности измерений подтверждена институтом метрологии Госстандарта России (сертификат об утверждении типа средств измерений DE.C. 31.005.A №18460, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений № 27519-04). Погрешность измерения влажности: в диапазоне от 5 до 20% не более 0,4 % (по паспорту 0,3%); диапазон рабочей температуры от -10° до +40° С.

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

Угол внутреннего трения зерновой смеси определялся по углу естественного откоса, который формировался способом насыпания [113]. Угол внешнего трения зернового материала по металлу определялся



прибором Желиговского В.А., а угол трения по решетке определяли согласно методике предложенной Ворошиловым А.И. [17].



Рисунок 3.6 – Приборы для проведения опытов: весы электронные МК – 15.2-A20, влагомер He-Lite

#### **3.4. Характеристика зернового материала**

Для исследований использовалась пшеница яровая сорта Омская 36, урожая 2020 года, обмолоченная на лабораторной молотилке МК-1М. Очистка зерна после обмолота осуществлялась лабораторной сеяноочистительной машиной СМ-0,15.

Из анализа литературных источников и собственных расчетов [108] 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 2,2 мм.

В качестве засорителя зерна использовался рапс сорта «Фаворит» в диапазоне проходовой фракции 1,8...2,2 мм. Засоренность исходной зерновой смеси изменялась от 2 до 6 % по весу.

При влажности 13 %: 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°.

Влажность зерна сохранялась постоянной в течение всего периода проведения экспериментов, а требуемое значение влажности обеспечивалось за счет искусственного увлажнения.

### **3.5. Методика проведения опытов**

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 исходную зерновую смесь 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% подготовленной смеси, 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 зерновую смесь дополнительно очищали от мелких примесей на лабораторном решетном классификаторе фирмы «Petkus», с целью создания однородной зерновой смеси 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:

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

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

где  $C_0$  – исходная засоренность зерновой смеси, %;

$Q$  – подача зерновой смеси, 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;

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

$h_A$  – толщина активного слоя, мм;

$W$  – влажность исходного материала, %;

$\Delta$  – геометрические размеры отверстий решет.

Для оценки технологического эффекта сепарирования разработано и используется достаточно большое число методов [18, 61, 113]. Подробный анализ преимуществ и недостатков большинства методов приведен в работах [130, 78].

Оптимизация процессов сепарации относится к числу компромиссных задач, и в качестве критериев оптимизации (откликов) приняты два критерия [50].

Эффективность сепарации определяли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{P_1 \cdot a_{\text{ВЫХ}}^M}{P_0 \cdot a_{\text{ИСХ}}^M} \cdot 100 \%;$$
 (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:

$$\Pi = \frac{P_1 \cdot a_{\text{ВЫХ}}^{\text{КР}}}{P_0 \cdot a_{\text{ИСХ}}^{\text{КР}}} \cdot 100 \%;$$
 (3.2)

где  $a_{\text{ВЫХ}}^{\text{КР}}$  – содержание крупной фракции в проходе;

$a_{\text{ИСХ}}^{\text{КР}}$  – содержание крупной фракции в исходном материале.

Было выявлено 10 факторов, влияющих на процесс сепарации центробежно-решетного сепаратора (кинематических, конструктивных, технологических). С помощью проведенных однофакторных экспериментов и, опираясь на предыдущие исследования [6, 52], было проанализировано

влияние большинства факторов. Некоторые параметры были зафиксированы и не рассматривались в дальнейшем исследовании – это:  $\beta_1$  – угол наклона пластин барабана (в исследовании использовали радиальные пластины с углом  $\beta_1 = 0$ );  $K$  – показатель кинематического режима.

Предварительные однофакторные эксперименты показали, что наиболее явно выражены линейные эффекты, поэтому отсеивающий эксперимент был реализован по плану Плакетта-Бермана (табл. 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 [65].

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

2. Проверяем эффекты отдельных факторов:

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

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

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:

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

Таблица 3.1 – Факторы и уровни их варьирования

Кодированное обозначение факторов	Условное обозначение	Наименование	Уровни варьирования	
			Нижний (-)	Верхний (+)
$X_1$	$C_0$	засорённость исходного зернового материала, %	2	6
$X_2$	$h_A$	толщина активного слоя, мм	8	12
$X_3$	$\Delta$	диаметр отверстий подсевного решета, мм	3,2	4,0
$X_4$	$\beta_0$	угол отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, град.	15	25
$X_5$	$S$	шаг расстановки пластин барабана, мм	30	40
$X_6$	$\omega_B$	угловая скорость вращения барабана, $c^{-1}$	10	14
$X_7$	$Q$	подача зерновой смеси, $т/(ч \times м^2)$ ;	10,31	13,81

Продолжение таблицы 3.1

$X_8$	$W$	влажность исходного зернового материала, %	12	20
$X_9$	-	фиктивный фактор	-	-
$X_{10}$	-	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 [51,123], были определены 4 наиболее значимых параметров 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 зерна

Факторы и их наименование	Обозначение	Интервал варьирования	Значение факторов соответствующим уровням		
			-1	0	+1
$h_A$ – толщина активного слоя, мм;	$X_1 (X_2)$	2	8	10	12
$\beta_0$ – угол отгиба пластин в основании цилиндрического барана по направлению его вращения, град.;	$X_2 (X_4)$	5	15	20	25
$S$ – шаг расстановки пластин, мм	$X_3 (X_5)$	4	28	32	36
$\omega_6$ -частота вращения барабана, $c^{-1}$ ;	$X_4 (X_6)$	2	10	12	14

Таблица 3.3 – Значимые факторы и уровни их варьирования по потерям зерна в отходы

Факторы и их наименование	Обозначение	Интервал варьирования	Значение факторов соответствующим уровням		
			-1	0	+1
$C_o$ – толщина активного слоя, мм;	$X_1 (X_1)$	2	2	4	6
$\beta_0$ – угол отгиба пластин в основании цилиндрического барана по направлению его вращения, град.;	$X_2 (X_4)$	5	15	20	25
$\omega_6$ -частота вращения барабана, $c^{-1}$ ;	$X_3 (X_6)$	2	10	12	14
$Q$ – подача зернового материала, $t/(ч \times м^2)$ .	$X_4 (X_7)$	1,75	10,31	12,06	13,81

Остальные факторы приняты на следующих уровнях: влажность исходного материала  $W= 13\%$ , диаметр отверстий решета  $\Delta=3,6$  мм, в исследовании использовали радиальные пластины с углом  $\beta_1 = 0^\circ$ ; угловая скорость решета  $\omega_p$  имеет связь с угловой скоростью барабана  $\omega_6$  угловая скорость решета в 0,57 раза больше, чем угловая скорость барабана.

### 3.6. Методика проведения многофакторного эксперимента

Используя полученные результаты, был выбран план многофакторного эксперимента (план № 60 композиционный симметричный трехуровневый план) [65]. По плану планирования экспериментов были составлены матрицы, в кодированном виде они представлены в таблицах 3.4 и 3,5.

Таблица 3.4 – Матрица плана факторного эксперимента по эффективности очистки зерна

№№ опыта	Варьируемые факторы в новом обозначении			
	$X_1 (h_A)$	$X_2 (\beta_0)$	$X_3 (S)$	$X_4 (\omega_6)$
1	2	3	4	5
1	+	+	+	+
2	-	+	+	+



1	2	3	4	5
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	+

Таблица 3.5 – Матрица плана факторного эксперимента по потерям зерна в отходы

№№ опыта	Варьируемые факторы в новом обозначении			
	$X_1 (C_0)$	$X_2 (\beta_0)$	$X_3 (\omega_6)$	$X_4 (Q)$
1	2	3	4	5
1	+	+	+	+
2	-	+	+	+
3	+	-	+	+
4	-	-	+	+
5	+	+	-	+
6	-	+	-	+
7	+	-	-	+
8	-	-	-	+
9	+	+	+	-
10	-	+	+	-
11	+	-	+	-

1	2	3	4	5
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 [65]:

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

где  $S_{nmax}^2$  – 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 [65].

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  $G_{\text{табл}} = 0,235$  [65].

Коэффициенты регрессии  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  вычисляли при помощи прикладной программы Statistica V6 для ПЭВМ.

Определение значимости коэффициентов регрессии проводили следующим образом:

а) определяли дисперсию  $S_y^2$  в опытах [60]

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

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 [65] дисперсия  $S^2$  и среднеквадратичные ошибки  $S$  оценок коэффициентов определяется по следующим формулам

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

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

Для трех уровней варьирования  $n = 3$  значения коэффициентов  $c_i$  будут следующими [65]:  $c_1 = 0,22917$ ;  $c_2 = 0,0625$ ;  $c_3 = 0,05556$ ;  $c_4 = 0,0625$ ;

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

в) критические значения коэффициентов уравнения регрессии определяются следующим образом:

$$\Delta_{b0} = t_{\alpha;f1} \cdot S_{b0}$$

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

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

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

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 [65]:

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

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

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

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

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

где  $\bar{y}_{u\text{расч}}$  и  $\bar{y}_{u\text{экс}}$  – значения отклика в  $u$ -ом опыте, соответственно рассчитанные по уравнению регрессии и полученные экспериментально;

$f_1 = N - k'$  – число степеней свободы;

$k'$  – число оставленных коэффициентов уравнения регрессии.

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_{iu} - \bar{y}_{u\text{расч}})^2}{f_2}; \quad (3.16)$$

где  $f_2 = N \cdot (n - 1)$ .

В случае, если  $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$ , 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  $F_{\text{табл}} = 2,31$  [57],  $F_{\text{расч}} = 2,1$ .

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

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

### **3.7. Моделирование процесса самосортирования на центробежно-решетном сепараторе**

Сложность протекания технологического процесса, происходящего при работе центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом и его быстротечность, не поддается визуальному наблюдению в силу целого ряда причин. Изнутри процесс сепарации увидеть не представляет возможности. В этой связи в реальных условиях очень сложно провести исследования по обоснованию параметров пластинчатого барабана. Применение специального моделирования позволяет с достаточной достоверностью изучить процесс.

Эффективность сепарирования зависит, прежде всего, от степени соответствия желаемых признаков разделения обусловленных потребностями производства, возможным признакам разделения, определяющим различное движение частицы в процессе сепарирования смеси [100].

Для подтверждения основных теоретических положений настоящей работы были разработаны частные методики экспериментальных

исследований. Выполнение таких исследований стало возможным после создания лабораторной установки (см. рисунок 3.7).

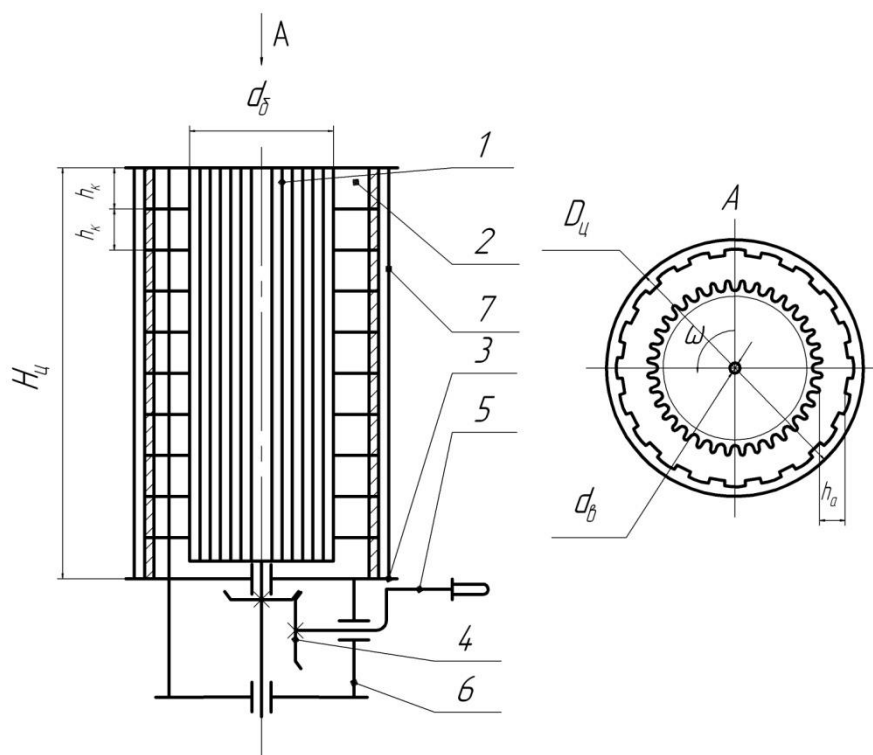


Рисунок 3.7 – Схема лабораторной установки

Установка выполнена из двух отдельных узлов: приводной станции и несущей рамы. Приводная станция состоит из конической пары шестерён с ручным приводом. Несущая рама предназначена для крепления на ней основных узлов лабораторной установки: внутреннего подвижного барабана и внешнего неподвижного цилиндра. На наружной поверхности внутреннего барабана имеются цилиндрические впадины и выступы. Внутренняя поверхность неподвижного цилиндра, набранного из колец толщиной 10мм в количестве 10 штук, имеет профрезерованные пазы. Кольца наружного цилиндра надёжно крепятся стяжками к несущей раме. Установка дает возможность проводить измерения основных параметров при проведении экспериментов.

Исследуемые материалы, предварительно взвесив, равномерно распределяли по поверхностному слою пшеницы, расположенной в

кольцевом пространстве. Далее приводили во вращение внутренний барабан, поворачивая его на  $n=0,25$ ,  $n=0,5$ ,  $n=1,0$  и  $n=1,5$  оборота.

Мелкие частицы исследуемого материала начинают проникать в поры на некоторую глубину внутрь слоев пшеницы. Затем убирая кольца и срезая массу зерна, находящуюся в кольцевом пространстве между цилиндром и барабаном, собирали ее в емкость. Путем просеивания собранного материала отделяли исследуемый материал и взвешивали на электронных весах. Так последовательно делали на всех кольцах.

Данные замеров заносились в таблицы и строились графики проникновения частиц исследуемого материала в зависимости от размеров частиц, числа оборотов барабана и пути скольжения.

Проводилась оценка влияния пути скольжения и диаметра частиц на среднюю глубину погружения ( $h_{\text{ср}}$ ).

Путь скольжения определяли по формуле:

$$S_{\text{ср}} = 2\pi R_{\text{ср}} \cdot n, \quad (3.17)$$

где  $R_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{в}} + d_{\text{н}}}{4}$ ;

$n$  - число оборотов внутреннего барабана.

Среднюю глубину погружения частиц определяем по формуле:

$$h_{\text{ср}} = \frac{\sum h_i \cdot P_i}{\sum P_i}, \quad (3.18)$$

где  $P_i$  - содержание исследуемого материала в каждом кольцевом слое в долях единицы от общего количества материала;

$h_i$  - среднее расстояние от верха до середины кольцевого слоя.

Для каждого проведенного опыта рассчитывали глубину погружения исследуемых материалов пшеницы.

Для определения условий, при которых происходит ориентация зерна, было изготовлено простейшее приспособление (см. рис. 3.9), которое состоит

из коробки с вертикальными прозрачными стенками. В нижней части коробки на некотором расстоянии от ее основания установлены пластины с регулируемым шагом. Приспособление позволяло изменить угол наклона пластин к вертикали и расстояние от нижних кромок пластин до основания коробки. Опыт проводили с зерном влажностью  $W_0 = 13\%$ ;  $W_0 = 24\%$  и при изменении угла наклона пластин.

Визуально велось наблюдение за поведением зерновых частиц между пластинами при перемещении установки по решетчатой поверхности. Определялось, при какой высоте слоя происходило активное закручивание, и фиксировали расстояние  $S$  между пластинами и высоту слоя  $h$ .

При работе решета на выделении мелких примесей, необходимо, чтобы между радиальными пластинами происходило активное перемешивание.

На рабочем фрагменте экспериментальной установки можно видеть активное закручивание по ориентации зерен в межпластинчатом пространстве. Это говорит о взаимной связи шага расстановки пластин  $S$ , угла их наклона  $\beta_1$  и высоты  $h$ .

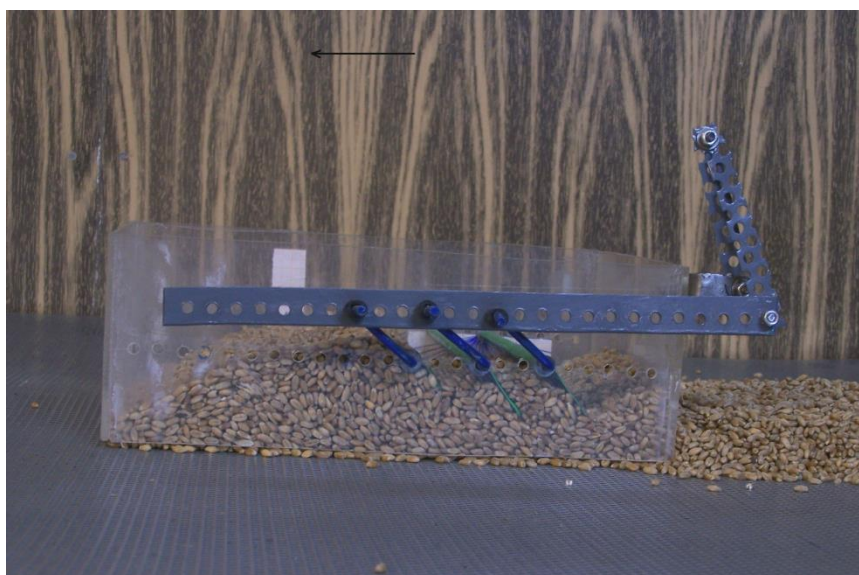


Рисунок 3.8 – Общий вид лабораторной установки для определения параметров пластин барабана



При проведении опытов коробка ставилась на решето, заполнялась зерновой смесью, которая перемещалась по решету с постоянной скоростью, равной примерно 0,1 м/сек (см. рис. 3.8) При перемещении коробки наблюдался процесс ориентации зерна между нижними кромками пластин и решетом.

До начала движения коробки по решету семена в нижней части слоя расположены беспорядочно.

При движении коробки по решету в нижней части общего слоя зерновой смеси образуется активный слой, толщина которого равна расстоянию от поверхности решета до нижних кромок пластин. Семена пшеницы в активном слое ориентируются, стремясь установиться параллельно поверхности решета.

Между нижним обрезом задней стенки коробки и решетом имеется зазор, достаточный для прохода одного элементарного слоя зерен.

### **3.8. Определение равномерности просеваемости зернового материала по высоте цилиндра**

При работе центробежных сепараторов с вертикальной осью вращения верхняя часть решета работает в условиях неполной загрузки, из-за поступающего на него с большой скоростью очищаемого материала. Для стабилизации процесса сепарации были: использованы конический питатель с шестью лопастями 3 и гасители окружной скорости, размещенные в нижней части конической обечайки (см. рис. 3.2).



Рисунок 3.9 – Экспериментальная установка отбора проходовой фракции по высоте цилиндрического решета с пластинчатым барабаном

Для оценки равномерности просеваемости по высоте цилиндрического решета были проведены специальные опыты. Для этого использовался пробоотборник, состоящий из шести секций. Пробоотборник представлял собой короб со встроенными в него наклонными перегородками. Наклонные перегородки образовывали секции пробоотборника, причем в верхней части два отсека располагались с шагом 50 мм, для установления более четкой картины просеваемости в верхней части решета, остальные с шагом 100 мм.

Пробоотборник, устанавливался вдоль образующей решета с возможностью поворота вокруг вертикальной оси подвеса, закрепленного на раме сепаратора. Во время пуска пробоотборник располагался тыльной стороной к решету для исключения попадания проходовой фракции в отсеки.

При установившемся режиме работы сепаратора, пробоотборник поворачивался, и проходовая фракция поступала в отсеки. После рабочего периода пробоотборник снова поворачивался тыльной стороной.

По окончании опыта сепаратор выключался, снимался пробоотборник с подвеса и производился разбор материала по секциям. Материал каждой секции взвешивался.

Относительная просеваемость определялась с помощью пробоотборника указанного выше, а численные значения получали по формуле:

$$P_{отн} = \frac{q_i}{q_{ср}} 100\% ; \quad (3.19)$$

где  $q_i$  – вес проходовой фракции в  $i$  секции пробоотборника;

$q_{ср}$  – средний вес по секциям пробоотборника.

Интенсивность просеваемости [26]:

$$\mu(t) = \frac{q(t)}{q^1(t)} ; \quad (3.20)$$

где  $q(t)$ -местная удельная просеваемость;

$q^1(t)$ -местная удельная нагрузка в момент  $t$ .

Местная удельная просеваемость определялась:

$$q(t) = \frac{m}{S \times t} ; \quad (3.21)$$

где  $m$  – масса выделенной примеси с площади  $S$ ;

$S$  – площадь решета, с которой улавливалась выделяемая примесь;

$t$  – время опыта.

Местная удельная нагрузка в момент  $t$  определялась:

$$q^1(t) = \frac{Q}{S} ; \quad (3.22)$$

где  $Q$  – подача зерновой смеси в сепаратор.

### **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 ООО «Лео» Калманского района.

Центробежно-решетный сепаратор разработан на кафедре «Сельскохозяйственная техника и технологии» (рис.3.10).

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.

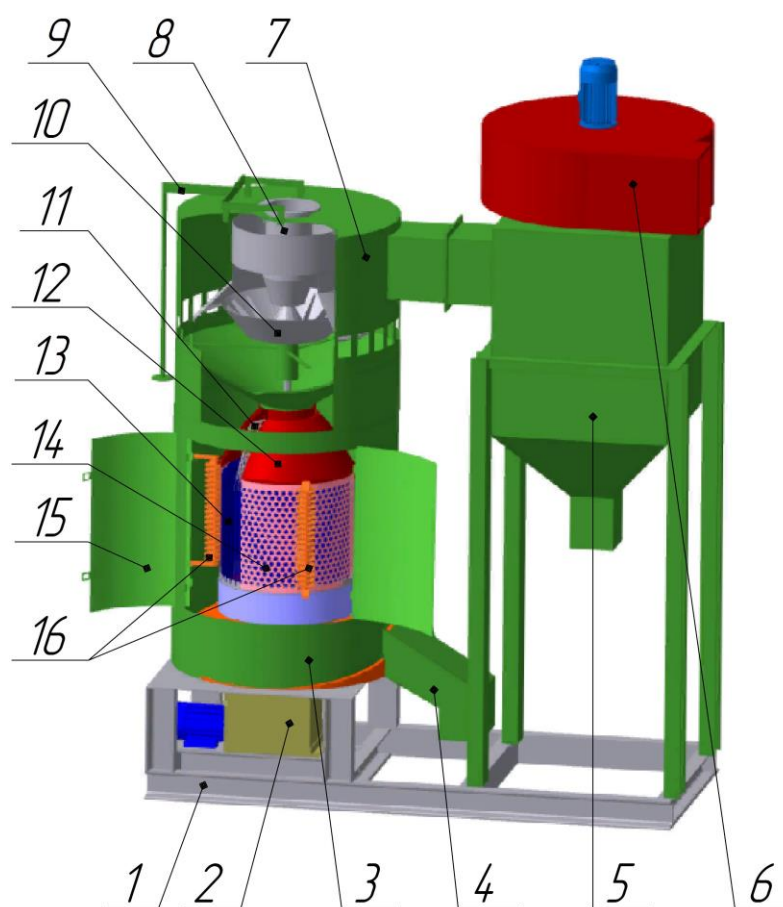


Рисунок 3.10 – 3D-модель воздушного центробежно-решетного сепаратора:

1 – рама, 2 – привод решета и барабана, 3 – корпус, 4 – патрубок выхода мелких примесей, 5 – осадочная камера, 6 – центробежный вентилятор, 7 – кольцевой пневмоканал, 8 – загрузочная горловина, 9 – регулятор воздушного потока, 10 – тарельчатый разбрасыватель, 11 – тарельчатый разбрасыватель, 12 – тарельчатый разбрасыватель, 13 – тарельчатый разбрасыватель, 14 – тарельчатый разбрасыватель, 15 – тарельчатый разбрасыватель, 16 – тарельчатый разбрасыватель.

делительное решето, 12 – питатель, 13 – пластинчатый барабан, 14 – подсевное решето, 15 – дверца, 16 – цилиндрическая щетка.

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 [134].

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

Исследования процесса сепарации на цилиндрическом решете с внутренним пластинчатым барабаном центробежно-решетного сепаратора проводилась на кафедре «Сельскохозяйственная техника и технологии» Алтайского государственного аграрного университета. Была модернизирована лабораторная установка, описанная в разделе 3.2. В результате проведенных ранее исследований [110, 95, 52] было установлено влияние таких параметров, как кинематический режим и угол отгиба пластин в основании цилиндра барабана. В центробежно-решетном сепараторе редуктор обеспечивает разность скоростей вращения пластинчатого барабана и решета, причем  $\frac{\omega_B}{\omega_P} = 0,57$  и это отношение оставалось постоянным при проведении всех опытов [110]. В работе было обосновано применение пластин с углом подгиба  $\beta_0 = 20^\circ$  в основании цилиндра барабана.

Ранее проведенные исследования показали, что влажность оказывает существенное влияние на производительность цилиндрических решет. При повышении влажности производительность плоских решет [112] снижается в пределах 3...5% на каждый процент её повышения свыше кондиционной. Такое же снижение производительности было установлено и на цилиндрических решетках [28,94]. При повышении влажности эффективность выделения мелких примесей возрастала в результате увеличения объема зерновок и, как следствие, пор между ними, но при этом падала производительность центробежно-решетного сепаратора [52].

Для проведения опытов использовалось зерно с кондиционной влажностью, предварительно очищенное. Требуемая в опытах засоренность достигалась путем искусственного введения мелких примесей в исходную смесь в виде семян рапса.

Активный слой (слой между решетом и краями пластин) не изменялся и составлял 10 мм. Радиус решета 0,145 м, показатель кинематического

режима  $K=3,69$ . Влажность исходного материала  $W=13\%$ , в исследовании использовали радиальные пластины с углом  $\beta_1 = 0^\circ$ . Данные параметры не изменялись при проведении всех экспериментов.

#### **4.1. Результаты моделирования процесса самосортирования**

Полнота выделения примесей зависит от того, насколько велики различия в признаках делимости между отдельными сорными примесями и семенами основной культуры. Следовательно, наибольший эффект очистки может быть достигнут при использовании того признака делимости, по которому различия между семенами основной культуры и сорняков выражены наиболее резко. Этому положению наиболее точно подходит работа подсевных решет при выделении мелких примесей.

Максимальное содержание частиц проходовой фракции (пшено, дробь) в зерновом слое по глубине погружения составляет 25...40 мм.

Отсюда следует, что при толщине зернового слоя, включая активный слой, в центробежно-решетном сепараторе, мелкие примеси, преодолевая зерновой подвижный слой, будут активно подходить к сепарирующей поверхности решета. Высокая эффективность выделения мелких примесей на подсевном решете сепаратора показана в исследованиях.

Опыты показывают, что диаметр мелких частиц (пшена и дроби) в исследуемом диапазоне не оказывает существенного влияния на среднюю глубину погружения (см. рисунок 4.1), составляющую  $h_{cp}=20...25$  мм. При этом размеры исследуемых фракций отличались по диаметру на 1,0 мм. Можно предположить, что увеличение среднего пути скольжения приведет к росту глубины погружения.

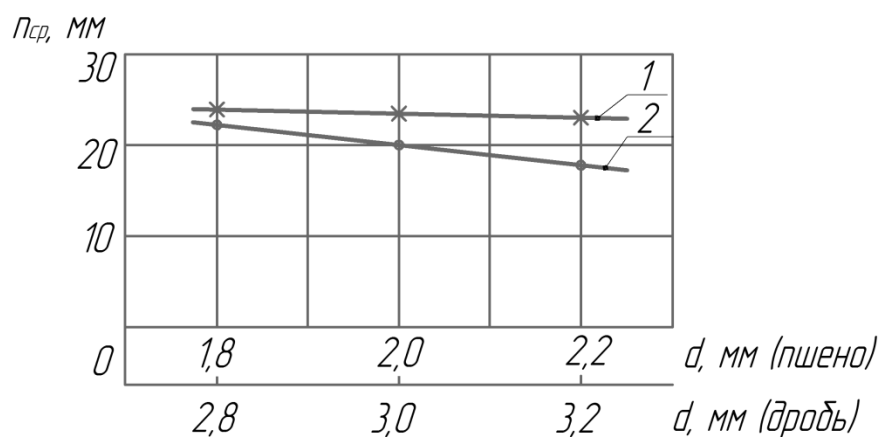


Рисунок 4.1 - График зависимости средней глубины погружения в зависимости от диаметра частиц при среднем пути скольжения

1 - пшеница; 2 - дробь.

Проведенные опыты также показывают, что наиболее интенсивно идет погружение частиц при среднем пути скольжения равным 250 мм (см. рисунок 4.2). Дальнейшее повышение пути скольжения не приводит к существенному увеличению средней глубины погружения.

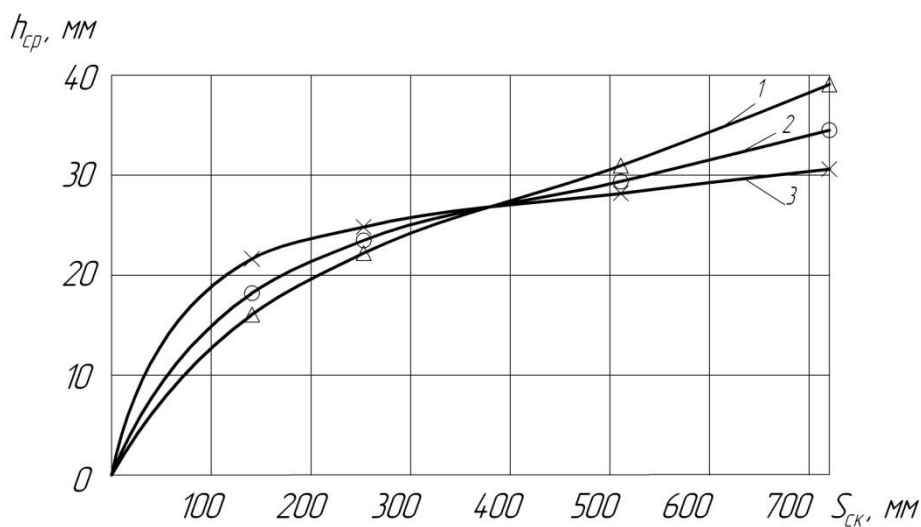


Рисунок 4.2 - График зависимости средней глубины погружения пшеницы от пути скольжения

1- d = 1,8 мм; 2 – d = 2,0 мм; 3 – d = 2,2 мм.

Таким образом, опытами установлена возможность работы центробежно-решетного сепаратора на очистке зерна от мелких примесей. Помимо проведенных экспериментов, можно предположить, что есть еще



пути интенсификации рабочего процесса подсевного решета сепаратора, которые требуют дальнейших исследований.

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

Экспериментальные исследования по изучению влияния шага расстановки пластин на внутреннем барабане на эффективность выделения мелких примесей показывают, что эффективность очистки зерна возрастает при увеличении числа пластин на барабане. Так с уменьшением шага расстановки пластин с 90 мм до 32 мм эффективность возрастает, но при этом и увеличиваются потери зерна в отходы. При дальнейшем уменьшении шага расстановки пластин на барабане эффективность падает, так как при диаметре барабана 270 мм с двадцатью восемью пластинами происходит заклинивание зернового материала, и процесс сепарации ухудшается.

Однако проведенные опыты показали, что при увеличенном шаге расстановки пластин нужно повысить подачу зерновой смеси, чтобы обеспечить необходимую толщину зернового слоя между пластинами барабана.

Применение пластин с отгибом к основанию цилиндра барабана позволило значительно уменьшить ускорение движения зернового материала, тем самым увеличить продолжительность процесса сепарирования. С использованием предлагаемых пластин проходные фракции при движении зерновой смеси не экранируются обратной стороной наклонной грани и движутся вдоль радиальной грани под действием центробежной силы, что повышает количество выделенных мелких примесей, а следовательно и эффективность очистки. Для внутреннего барабана с такими пластинами потребуется меньшее их количество, что снизит металлоемкость барабана и сепаратора в целом.

Из графика (рис. 4.1) видно, что рациональным шагом расстановки пластин следует считать  $S = 32$  мм, он соответствует 24 пластинам на

барабане. Эти 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.

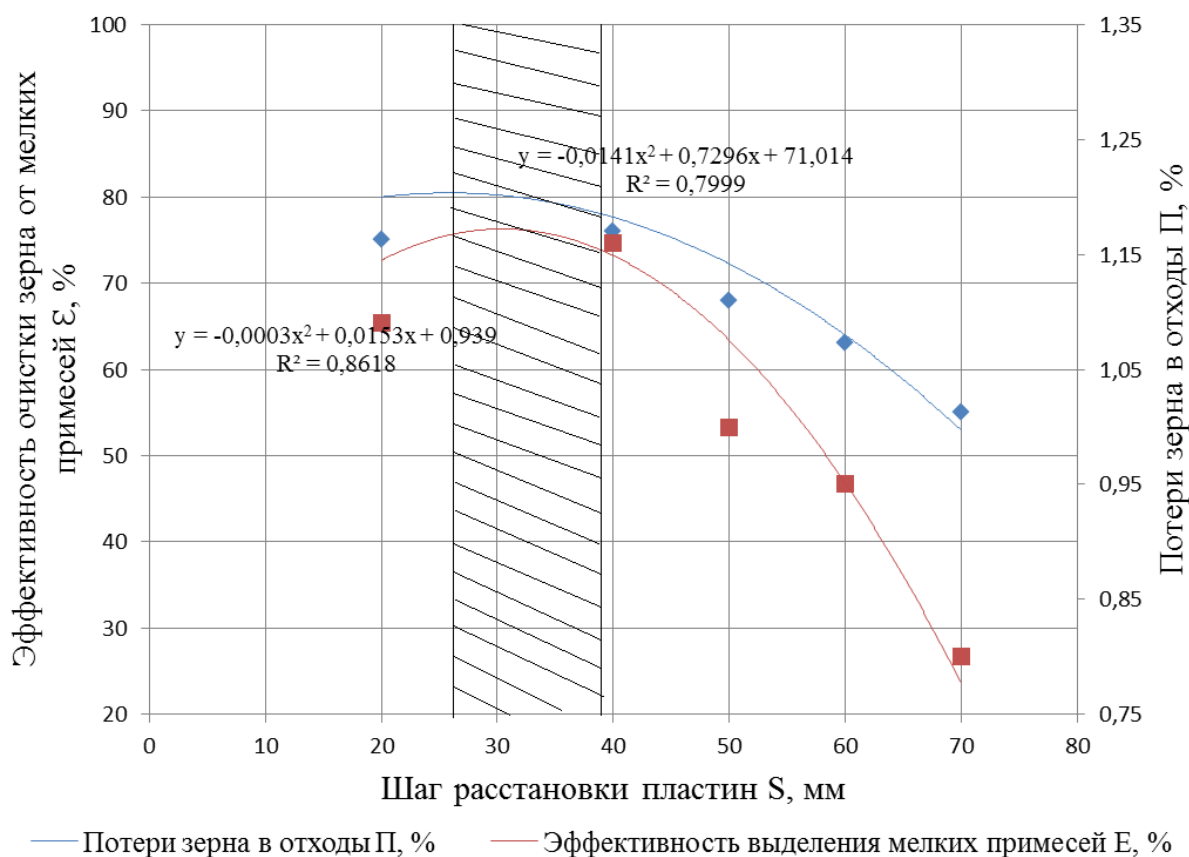


Рисунок 4.3 – Влияние шага расстановки пластин барабана на эффективность выделения мелких примесей и потери зерна в отходы.

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 20^\circ$ ;  $\omega_6 = 12,42 \text{ с}^{-1}$ ;  $Q = 12,06 \text{ т}/(\text{м}^2 \times \text{ч})$ ;  $\Delta = 3,6 \text{ мм}$ .

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 шагом расстановки 32 мм.

### 4.3. Влияние отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения на процесс сепарации

Процесс прохождения мелких частиц на подсевном решете происходит также как и на плоском решете с круглыми или продолговатыми отверстиями, только значительно интенсивнее, так как силы инерции, обуславливающие западание частиц в отверстия, значительно превосходят силы веса (которые являются основными при просеивании частиц на плоских решетках).

Применительно к условию работоспособности и эффективности подсевного решета центробежно-решетного сепаратора можно обеспечить путем использования пластин с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения. Теоретические предпосылки указывают на то, что интервал изменения угла отгиба пластин  $\beta_0$  должен находиться в пределах от  $15^\circ$  до  $25^\circ$ .

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают теоретические предпосылки, что наглядно видно на рисунке 4.2.

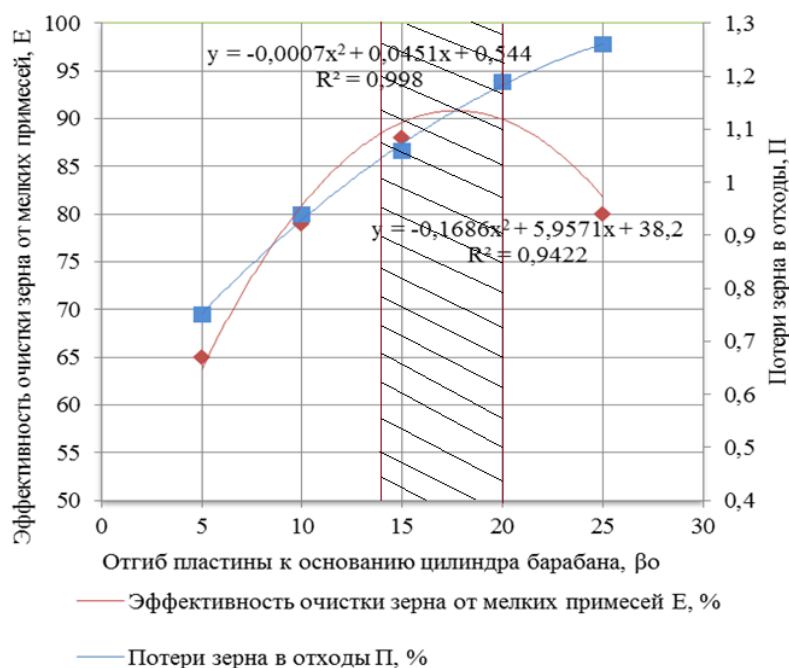


Рисунок 4.4 – Влияние отгиба пластин в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения на эффективность очистки зерна

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $S = 32$  мм;  $\omega_6 = 12,42$  с<sup>-1</sup>;  $Q = 12,06$  т/(м<sup>2</sup>×ч);  $C_0 = 4$  % (по весу).

#### **4.4. Влияние диаметра отверстий решета на эффективность очистки и потери зерна в отходы**

Опытами установлено, что увеличение диаметра отверстий решета приводит к росту эффективности очистки и одновременно к росту потерь зерна в отходы.

При диаметре отверстий решета  $\Delta = 4,0$  мм, эффективность очистки зерна от мелких примесей составляет  $\varepsilon = 95$  %, а потери зерна в отходы  $\Pi = 3,5$  %. Наилучшие показатели по потерям зерна в отходы  $1,0$  % имеют решета с диаметром отверстий  $3,6$  мм, но при более низкой эффективности  $\varepsilon = 90$  %.

Использование решета с диаметром отверстий  $3,6$  мм позволяло выделять не только мелкие примеси, такие как сурепка, просо куриное, щирца, но и мелкие семена гречишки татарской и гречишки вьюнковой [93]. Выделение этих трудноотделимых примесей способствует разгрузке машин окончательной очистки.

Таким образом, целесообразно устанавливать решета с круглыми отверстиями диаметром  $3,6$  мм. При установке 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 решетке с таким же диаметром отверстий и комбинированными пластинами [123].

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 4.3.

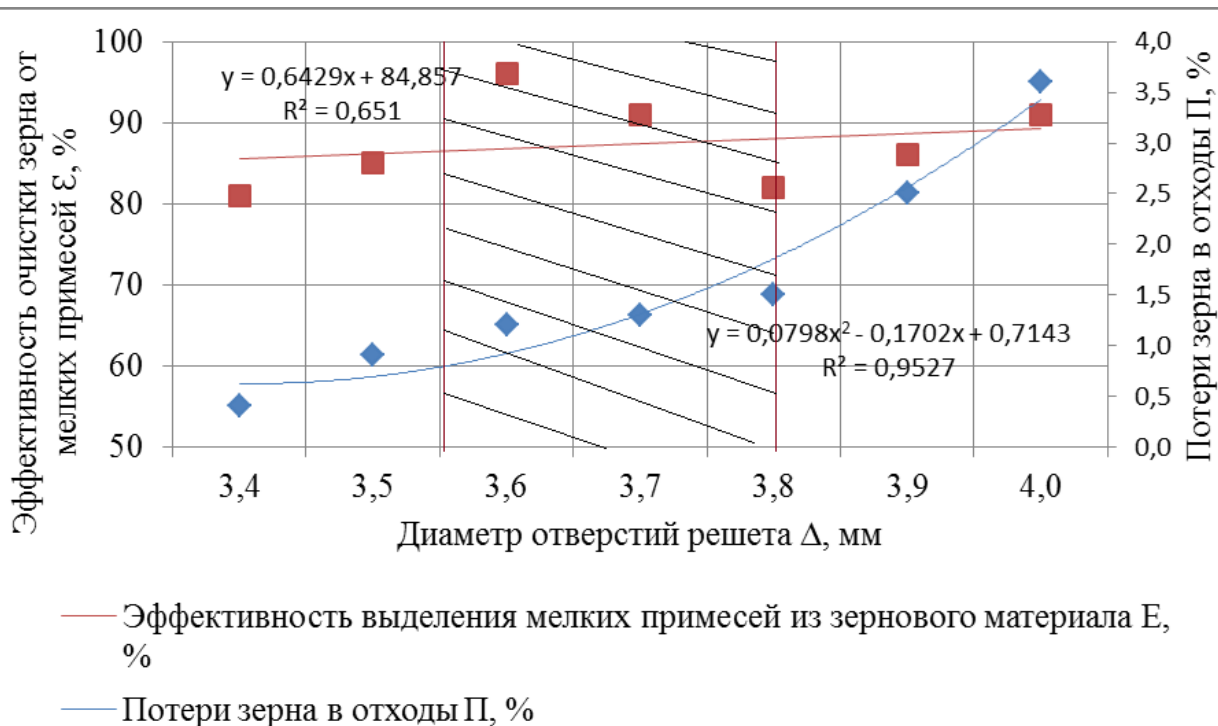


Рисунок 4.5 – Зависимость эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от диаметра отверстий решета

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 20^\circ$ ;  $S = 32$  мм;  $\omega_6 = 12,42$  с<sup>-1</sup>;  $Q = 12,06$  т/(м<sup>2</sup>×ч);  $C_0 = 4$  % (по весу).

Таким образом, опытами была установлена высокая эффективность очистки зерна от мелких примесей в центробежно-решётном сепараторе с применением пластин с отгибом в основании цилиндра барабана и решета с диаметром отверстий  $\Delta = 3,6$  мм. Чтобы производить очистку зерна от трудноотделимых примесей, используя данный способ сепарирования, необходимо провести исследования в этом направлении. Можно предположить, что такой рабочий орган будет отдельной машиной.

#### 4.5. Исследование цилиндрического решета с продолговатыми отверстиями на очистке зерна от мелких примесей

Для оценки работы цилиндрического решета с продолговатыми отверстиями в центробежно-решетном сепараторе были поставлены опыты с использованием различных размеров по ширине.

Практический опыт использования подсевных решет на плоскорешётных сепараторах при очистке зерна от мелких примесей показывает, что ширина продолговатых отверстий должна быть до 2,0 мм. Учитывая свойства сепарируемой смеси, нами были проведены эксперименты на решетках с продолговатыми отверстиями 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0 мм. Длина отверстий была одинаковой у всех решет и составляла 16 мм. Выбор увеличенного размера продолговатых отверстий решет на цилиндрическом решете обусловлен характером движения зерновой смеси по сепарирующей поверхности. Большое влияние оказывает скорость движения зерна по рабочей поверхности цилиндрического решета под действием центробежной силы и силы тяжести.

При использовании плоских решет на сортировании размер продолговатых отверстий по ширине должен быть в пределах 2,2...2,6 мм [49].

Проведенные экспериментальные исследования по очистке зерна от мелких примесей в центробежно-решетном сепараторе, показали на высокую эффективность работы цилиндрического подсевного решета с прямоугольными отверстиями на таких культурах как овес, по сравнению с круглыми.

Применение продолговатых отверстий  $2,4 \times 16$  мм, расположенных вдоль вертикальной оси цилиндрического решета позволило получить эффективность очистки  $\varepsilon = 87\%$ , а потери зерна в отходы составили менее 0,4% (рис. 4.4). При одинаковых параметрах нагрузки и исходной засоренности эффективность очистки возросла на 8% по сравнению с круглыми отверстиями  $\Delta = 3,6$  мм. Это говорит о том, что вероятность просеивания мелких примесей у продолговатых отверстий выше.

Такой результат был достигнут при среднем диаметре проходовых частиц от 1,8 до 2,2 мм, близких к размеру продолговатых отверстий цилиндрического решета. Можно предположить, что если размер мелких частиц будет меньше, то эффект очистки возрастет.

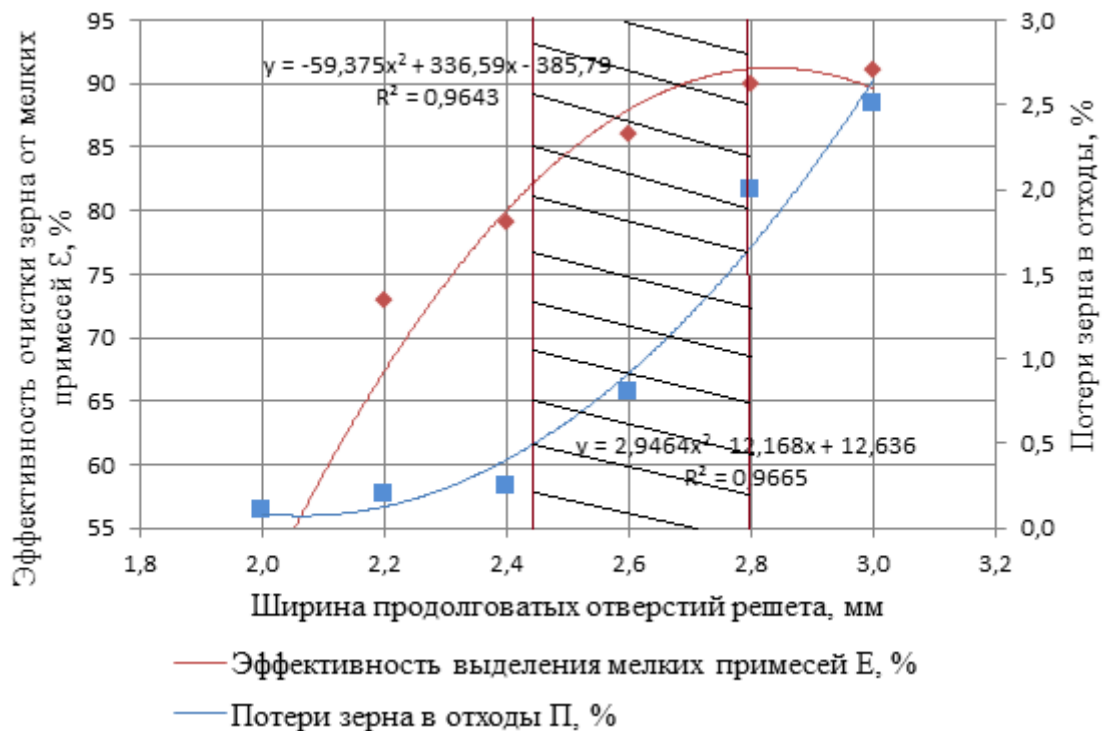


Рисунок 4.6 – Эффективность очистки зерна от мелких примесей в зависимости от ширины отверстий решета

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 20^\circ$ ;  $S = 32$  мм;  $\omega_6 = 12,42$  с<sup>-1</sup>;  $Q = 12,06$  т/(м<sup>2</sup>×ч);  $C_0 = 4$  % (по весу).

Из графика видно, что более интенсивно растет эффективность очистки при увеличении ширины отверстий решета. В диапазоне изменения размеров отверстий 2,2...2,6 мм потери зерна составляют менее 1%.

Дальнейшее увеличение ширины продолговатых отверстий (свыше 2,8 мм) при более высокой эффективности очистки приводит к резкому увеличению потерь зерна. Решета с такими отверстиями можно использовать для дальнейшей очистки и сортирования [51]. Таким образом, опытами установлена возможность использования подсевного цилиндрического решета с прямоугольными отверстиями как сортировальное в центробежно-решетном сепараторе.

#### **4.6. Влияние кинематического режима на эффективность очистки зерна от мелких примесей**

Кинематический режим является одним из наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на работу центробежно-решетного сепаратора. При малых скоростях вращения центробежная сила мала и материал не прижимается к решетке, а движется вниз, вследствие чего мелкие примеси не выделяются. С ростом центробежной силы эффективность сепарации возрастает, но до определенного момента, когда зерновой слой начнет вращаться вместе с решеткой (происходит заклинивание). Как было сказано выше, редуктор лабораторной установки обеспечивает разность скоростей вращения пластинчатого барабана и решетки, равную 0,57 и данное соотношение не изменялась.

При проведении опытов производилось изменение окружной скорости решетки и барабана одновременно.

Угловая скорость решетки  $\omega_r$  изменялась в пределах от 8 до 16  $\text{с}^{-1}$ .

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

Из анализа результатов следует, что при увеличении угловой скорости до 13,7  $\text{с}^{-1}$  рабочий процесс протекает устойчиво, эффективность очистки зерна возрастает. Однако увеличение угловой скорости свыше 16  $\text{с}^{-1}$  приводит к «заклиниванию» зерновой смеси, т.е. прекращению ее движения 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 11 до 14  $\text{с}^{-1}$ . Это подтверждают и исследования, проведенные в работе [6].



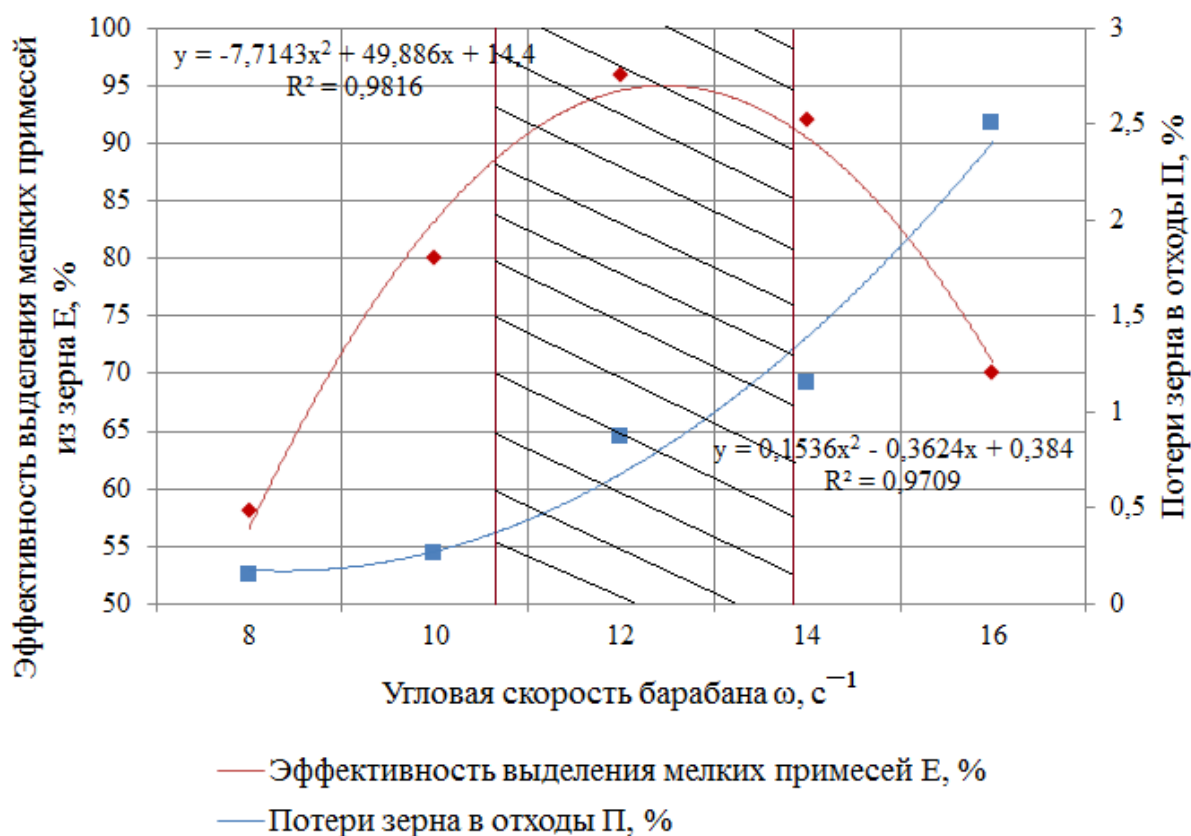


Рисунок 4.7 – Влияние угловой скорости решета на эффективность выделения мелких примесей и потери зерна в отходы

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 20^\circ$ ;  $S = 32$  мм;  $Q = 12,06$  т/(м<sup>2</sup>×ч);  $C_0 = 4$  %;  $\Delta = 3,6$  мм.

Увеличение угловой скорости приводит к возрастанию энергоемкости процесса сепарирования и увеличению потерь зерна в отходы, которые достигают значения 2,5% при 16 с<sup>-1</sup>. 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 заключенным между пластинами барабана) и зерна о рабочую поверхность решета. Центробежно-решетный сепаратор имеет малое энергопотребление и увеличение угловой скорости вращения барабана приводит к незначительному его повышению.

#### **4.7. Влияние удельной подачи зерновой смеси на полноту выделения мелких примесей**

Проведенные исследования по оценке влияния подачи зерновой смеси на процесс сепарации позволили установить, что с увеличением удельной подачи от 9 до 15 т/ч×м<sup>2</sup> эффективность очистки зерна возрастает от 85 до 94%, что видно из рисунка 4.6. Это объясняется тем, что толщина зернового слоя между пластинами в радиальном направлении увеличивается, следовательно, возрастает и значение коэффициента трансформации силового давления.

Использование пластин с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, увеличивает давление зерновой смеси на решето. Это способствует уменьшению ускорения свободного падения зерна и увеличению выделения мелкой примеси, но приводит к уменьшению площади, занятой зерном между пластинами барабана.

Плоскорешётные сепараторы хорошо выделяют мелкую фракцию при подаче 10...15 т/ч×м<sup>2</sup>, с увеличением подачи до 20 т/ч×м<sup>2</sup> происходит резкое снижение эффективности очистки зерна (до 30%) [143]. Это связано с тем, что мелкие частицы не успевают пройти к решету с увеличением толщины зерновой смеси на нем.

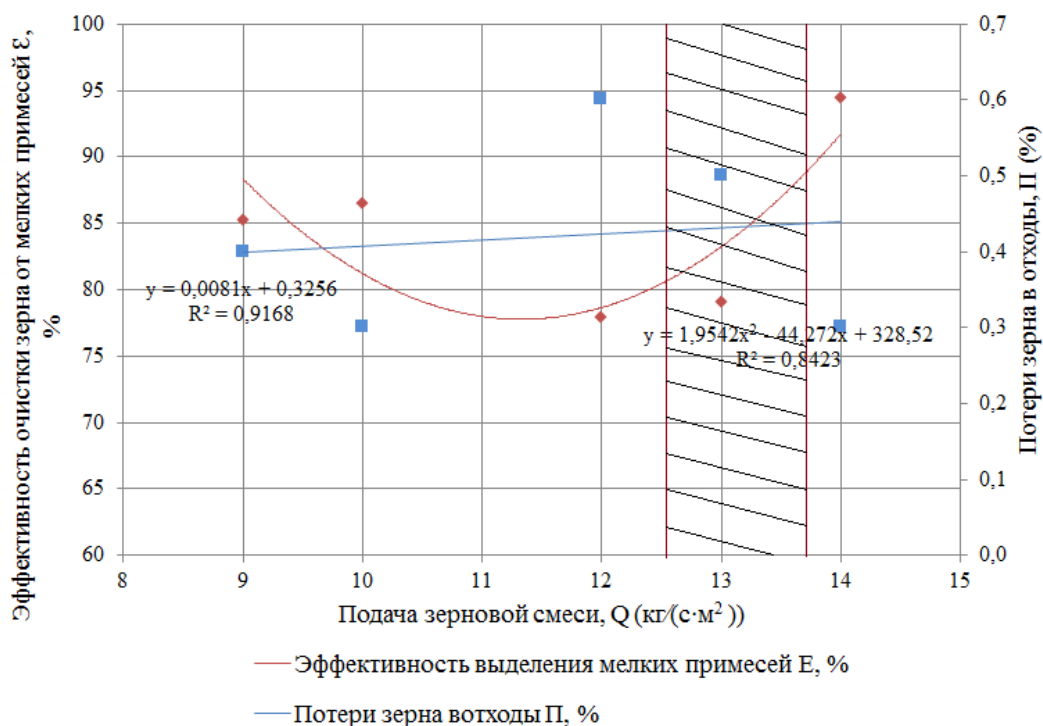


Рисунок 4.8 – Влияние удельной подачи зерновой смеси на эффективность выделения мелких примесей и потери зерна в отходы

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 20^\circ$ ;  $S = 32$  мм;  $\omega_6 = 12,42$  с<sup>-1</sup>;  $C_0 = 4$  %;  $\Delta = 3,6$  мм.

Согласно исследованиям Гончарова Е.С. [21], увеличение подачи зерновой смеси 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> тогда как для исследуемого центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом подача зерновой смеси составила 13 т/ч×м<sup>2</sup>.

#### 4.8. Влияние высоты решета на интенсивность просеваемости мелких примесей

Высота решета оказывает влияние на полноту выделения мелких примесей.

По графику, изображенному на рисунке 4.7 видно, что наибольшая интенсивность просеваемости наблюдается в верхней части решета (когда

зерновая смесь находится в состоянии интенсивного расслоения), а затем происходит снижение просеиваемости. Это объясняется тем, что мелкие частицы подходят к сепарирующей поверхности решета с дальних элементарных зерновых слоев за счет сегрегации смеси.

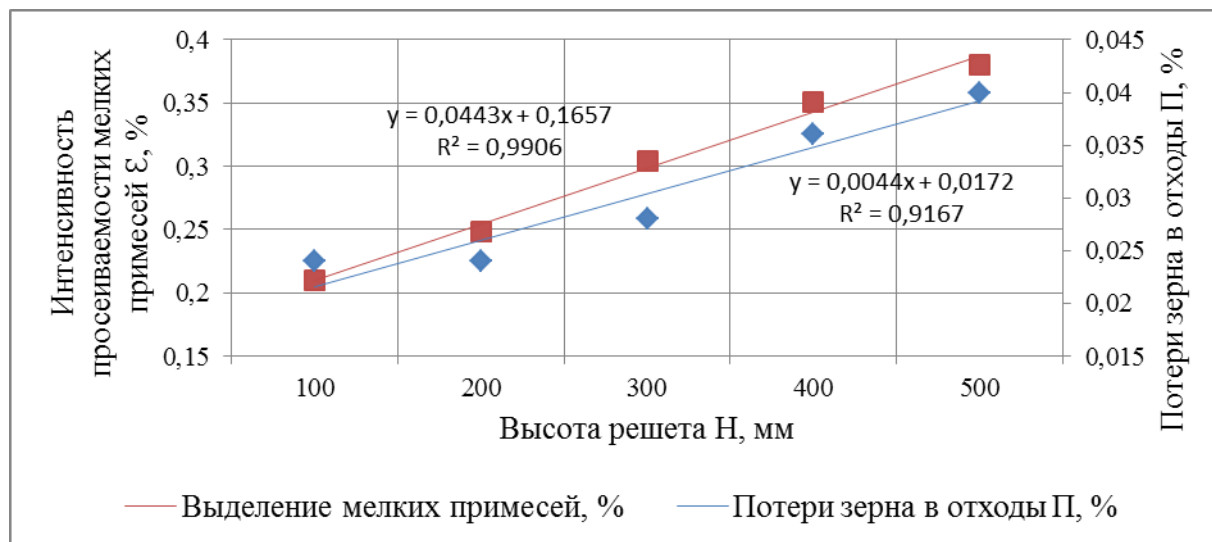


Рисунок 4.9 – Интенсивность просеиваемости по высоте цилиндрического решета

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 20^\circ$ ;  $S = 32$  мм;  $\omega_6 = 12,42$  с<sup>-1</sup>;  $C_0 = 4$  %;  $\Delta = 3,6$  мм.

При работе центробежно-решетного сепаратора с пластинами с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения наблюдается равномерная просеиваемость по всей высоте решета. Это связано с тем, что отгиб пластин в основании цилиндра барабана в значительной мере подпирает подаваемый объем зерна, а время заполнения межпластинчатого и активного слоев гораздо меньше в сравнении с комбинированными пластинами [123].

#### 4.9. Влияние засоренности исходной зерновой смеси на показатели процесса сепарации

Засоренность зерна оказывает значительное влияние на эффективность работы зерноочистительных машин, особенно предназначенных для

предварительной и первичной очистки. Полученная зависимость эффективности выделения мелких примесей на центробежно-решетном сепараторе от засоренности исходного материала, представлена на рисунке 4.8. По графику хорошо прослеживается снижение эффективности очистки при увеличении засоренности. Повышение засоренности зернового материала мелкими примесями с 2 до 6% приводит к снижению эффективности очистки с 97 до 72%. Снижение составило 25%, т.е. на каждый процент увеличения засоренности происходит снижение эффективности на 5 %. Такое снижение характерно для работы зерноочистительных машин. Потери зерна в отходы с увеличением засоренности снижаются. Это объясняется тем, что отверстия решета в процессе сепарации «заняты» проходовой фракцией.

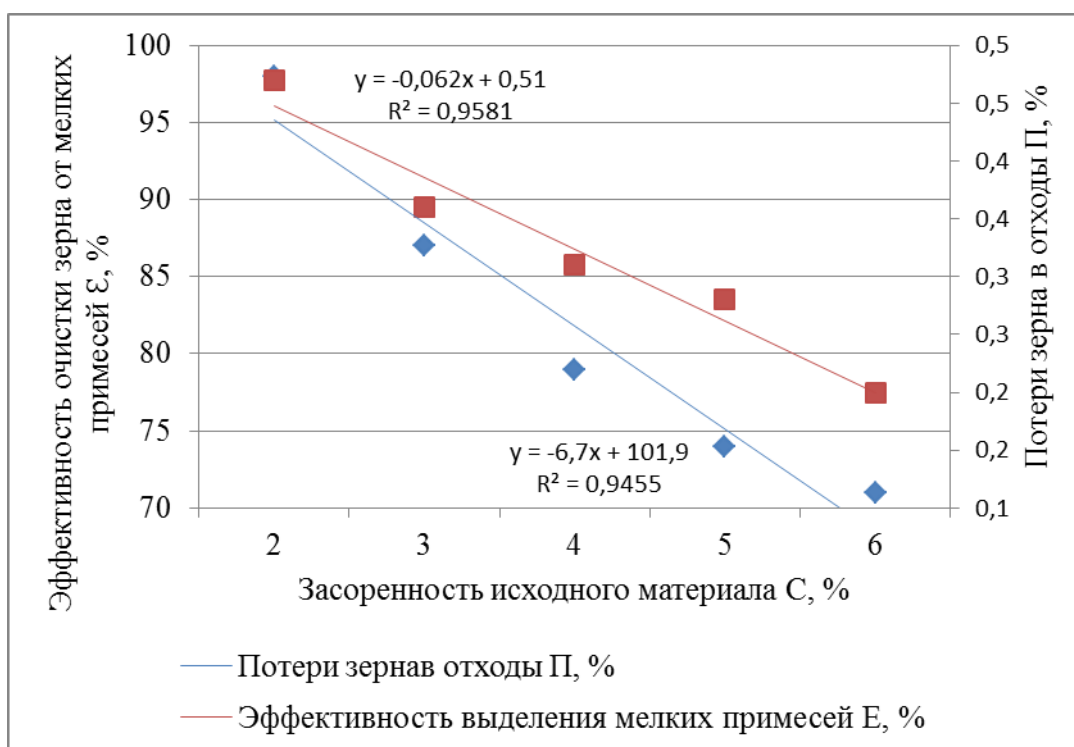


Рисунок 4.10 – Зависимость эффективности выделения мелких примесей и потерь зерна в отходы от засоренности исходного материала

Пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 20^\circ$ ;  $S = 32$  мм;  $\omega_6 = 12,42$  с<sup>-1</sup>;  $\Delta = 3,6$  мм;  $W = 13$  %.

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

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 шаг расстановки пластин барабана, а также технологические факторы.

#### **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 барабаном с радиальными пластинами. 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>	ε, %	Π, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	83	1,4
2	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	87	0,6
3	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	88	0,7
4	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	91	0,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	67	1,4
6	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	75	1
7	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	75	1,1
8	+	+	+	-	-	+	-	+	+	-	86	1,2
9	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	64	1,4
10	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	61	1,3
11	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	78	0,6
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74	0,9

Вычисления по определению значимости факторов проводили с помощью программы Statistica 6.1 для ПЭВМ. Результаты расчета представлены на диаграммах значимости факторов рисунок 4.11 и 4.12. Значения коэффициентов значимости взяты по модулю.

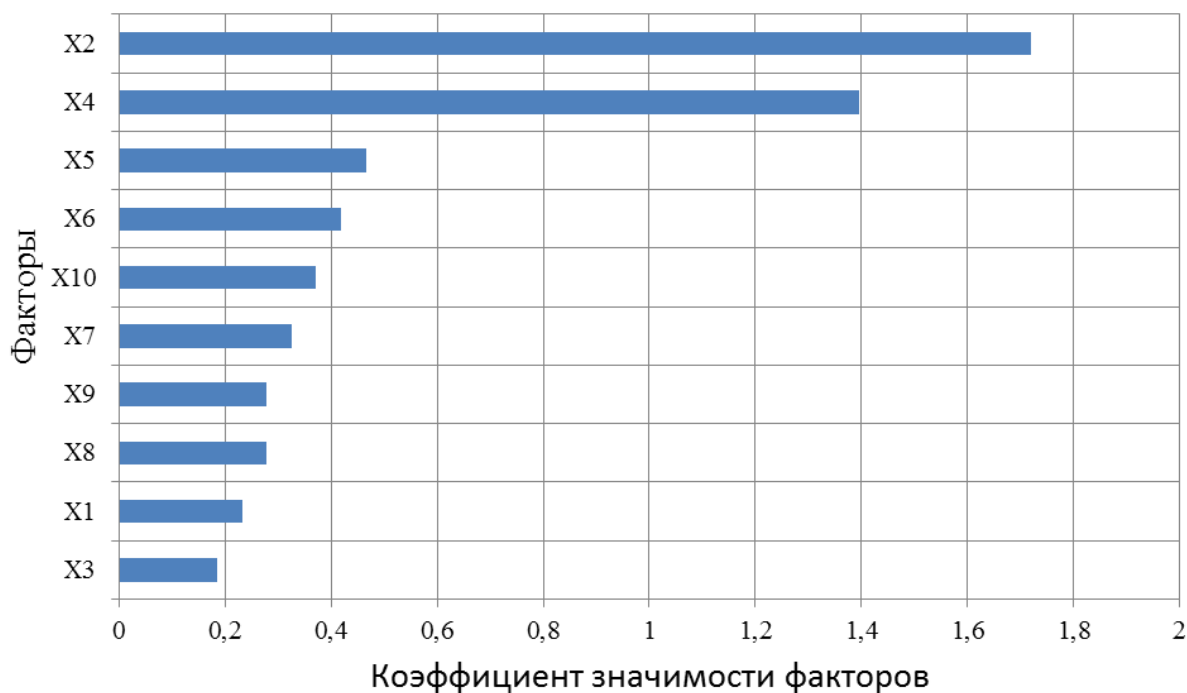


Рисунок 4.11 - Диаграмма значимости факторов, влияющих на эффективность очистки зернового материала

На основании полученных данных, следует, что наиболее значимыми факторами являются  $X_2$ ,  $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$  – это толщина активного слоя, угол отгиба пластин в основании цилиндра барабана по направлению его вращения, шаг расстановки пластин и угловая скорость барабана.

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

$$E = f(h_A, \beta_0, S, \omega_B) \quad (4.1)$$

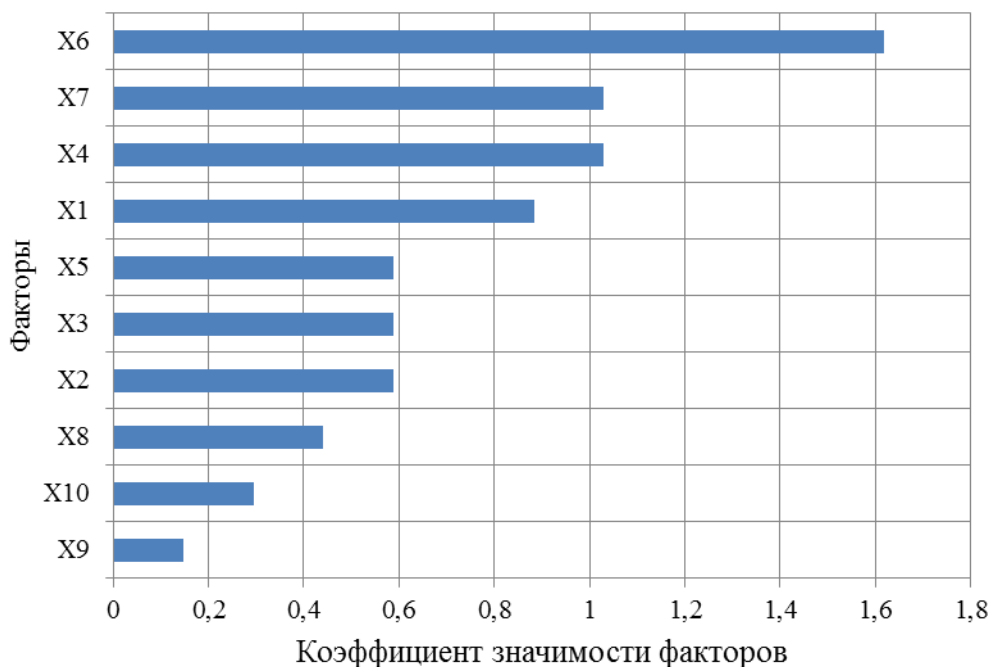


Рисунок 4.12 – Диаграмма значимости факторов, влияющих на потери зерна в отходы

Анализируя полученный результат делаем вывод, что наибольшее влияние на потери зерна в отходы оказывают факторы  $X_6$ ,  $X_7$ ,  $X_4$ ,  $X_1$  – это угловая скорость вращения барабана, подача зерновой смеси, угол отгиба пластин в основании цилиндра барабана по направлению его вращения и засоренность исходного материала.

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

$$\Pi = f(C_0, \omega_B, \beta_0, Q) \quad (4.2)$$

План многофакторного эксперимента и его результаты представлены в таблице 4.2.

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 6.1 для ПЭВМ.

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|.

Таблица 4.2 – Влияние наиболее значимых факторов на эффективность очистки зерна.

№ опыта	Варьируемые факторы				Значение, % $\varepsilon$
	$X_1 (h_A)$	$X_2 (\beta_0)$	$X_3 (S)$	$X_4 (\omega_B)$	
1	2	3	4	5	6
1	12	25	36	14	75
2	8	25	36	14	63,5
3	12	15	36	14	74,1
4	8	15	36	14	68,8
5	12	25	28	14	76,3
6	8	25	28	14	61,3
7	12	15	28	14	71,4
8	8	15	28	14	62,6
9	12	25	36	10	57,3

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6
10	8	25	36	10	63,4
11	12	15	36	10	66,5
12	8	15	36	10	75,3
13	12	25	28	10	78,4
14	8	25	28	10	74,3
15	12	15	28	10	76,5
16	8	15	28	10	74,3
17	8	20	32	12	86,9
18	12	20	32	12	83,2
19	10	15	32	12	88,3
20	10	25	32	12	90,2
21	10	20	28	12	94,5
22	10	20	36	12	88,3
23	10	20	32	10	90,1
24	10	20	32	14	76,3

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 представлены в таблице 4.3, а зависимость потерь зерна в отходы от наиболее значимых факторов представлено в уравнении 4.2.

Таблица 4.3 – Влияние наиболее значимых факторов на потери зерна в отходы.

№ опыта	Варьируемые факторы				Значение, % П
	$X_1 (C_0)$	$X_2 (\beta_0)$	$X_3 (\omega_B)$	$X_4 (Q)$	
1	2	3	4	5	6
1	6	25	14	13,81	1,85
2	2	25	14	13,81	1,81
3	6	15	14	13,81	1,74
4	2	15	14	13,81	1,78
5	6	25	10	13,81	1,69
6	2	25	10	13,81	1,65
7	6	15	10	13,81	1,52
8	2	15	10	13,81	1,01
9	6	25	14	10,31	1,63
10	2	25	14	10,31	1,54

1	2	3	4	5	6
11	6	15	14	10,31	0,96
12	2	15	14	10,31	0,98
13	6	25	10	10,31	0,83
14	2	25	10	10,31	0,81
15	6	15	10	10,31	0,63
16	2	15	10	10,31	0,70
17	2	20	12	12,06	0,96
18	6	20	12	12,06	1,03
19	4	15	12	12,06	0,87
20	4	25	12	12,06	0,94
21	4	20	10	12,06	0,83
22	4	20	14	12,06	1,25
23	4	20	12	10,31	0,98
24	4	20	12	13,81	1,12

Максимальное значение эффективности очистки зерна ( $E$ ) 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 частоты вращения барабана  $X_4$  ( $\omega_B$ ) и угла отгиба пластин  $X_2$  ( $\beta_0$ ), при фиксированных значениях  $X_1$  и  $X_3$  на средних уровнях.

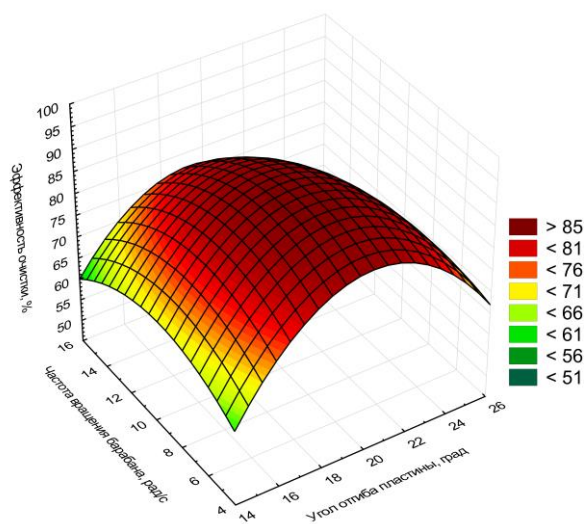


Рисунок 4.11 – Поверхности отклика для критерия оптимизации  $\varepsilon$  – эффективности выделения мелких примесей от  $X_2$  ( $\omega_6$ ) и  $X_4$  ( $\beta_0$ )

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$E = -177,721 + 24,4905 \cdot X_4 + 5,6672 \cdot X_2 - 0,5932 \cdot X_4^2 - 0,0983 \cdot X_4 \cdot X_2 - 0,2247 \cdot X_2^2 \quad (4.3)$$

На графике наблюдается совместное влияние значимых параметров частоты вращения барабана и угла отгиба пластин. С возрастанием частоты вращения барабана наблюдается повышение эффективности выделения мелких примесей, что говорит об изменении коэффициента трансформации силового давления. Это подтверждается и однофакторным экспериментом по влиянию угловой скорости на эффективность очистки. С увеличением угла отгиба пластин  $\beta_0$  свыше  $25^\circ$  эффективность очистки снижается. Поэтому рациональное значение угла должно лежать в пределах  $20 \dots 25^\circ$ .

Поверхность отклика эффективности очистки зерна в зависимости от шага расстановки пластин  $X_3$  (S) и толщины активного слоя  $X_1$  ( $h_A$ ) при фиксированных значениях на среднем уровне  $X_2$  ( $\beta_0$ ) и  $X_4$  ( $\omega_B$ ) представлены на рисунке 4.12.

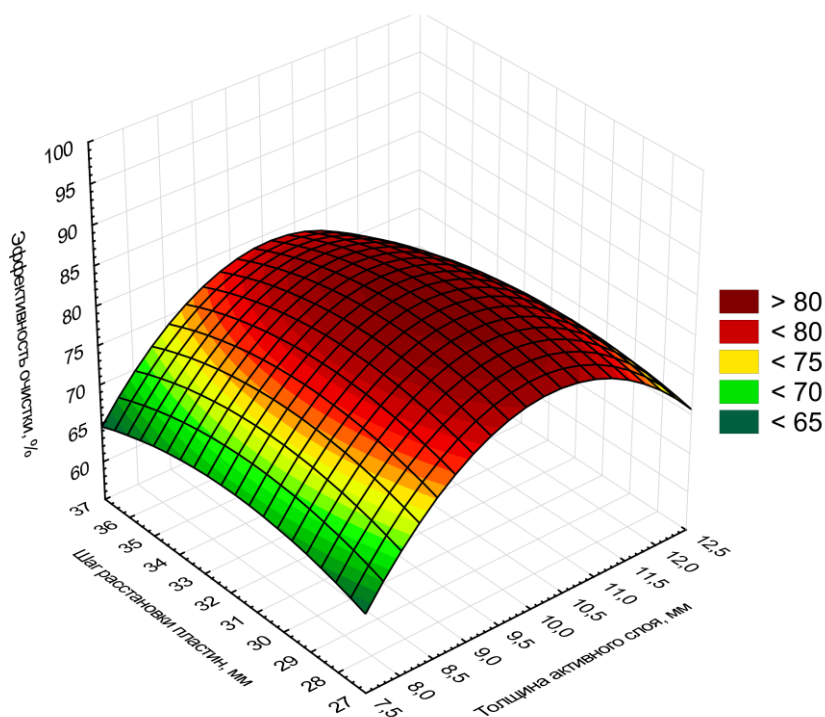


Рисунок 4.12 – Поверхности отклика для критерия оптимизации  $\varepsilon$  – эффективности выделения мелких примесей от  $X_3$  (S) и  $X_1$  ( $h_A$ )

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$E = -294,6444 + 45,8262 \cdot X_3 + 9,3053 \cdot X_1 - 2,1384 \cdot X_3^2 - 0,0719 \cdot X_3 \cdot X_1 - 0,1377 \cdot X_1^2 \quad (4.4)$$

Исследованиями установлено, что при уменьшении шага расстановки пластин барабана, эффективность очистки возрастает. Однако, малое расстояние между пластинами барабана (шаг расстановки) может привести к «зависанию» зернового материала, и прекращению рабочего процесса. Исходя из представленной зависимости, оптимальным значением этого параметра является  $S = 32 \dots 33$  мм. Толщина активного слоя  $h_A$  оказывает влияние на процесс сепарации. Ранее проведенное обоснование толщины активного слоя подтверждается графически  $h_A = 10$  мм.

Параметры, оказывающие наибольшее влияние на процесс прохода зерновых частиц через отверстия решет, то есть потери зерна в отходы.

Представлен график зависимости потерь зерна от засоренности исходного зернового материала  $X_1$  ( $C_0$ ) и угла отгиба пластин  $X_2$  ( $\beta_0$ ) при фиксированных значениях угловой скорости барабана  $X_3$  и подачи зерна  $X_4$  на среднем уровне.

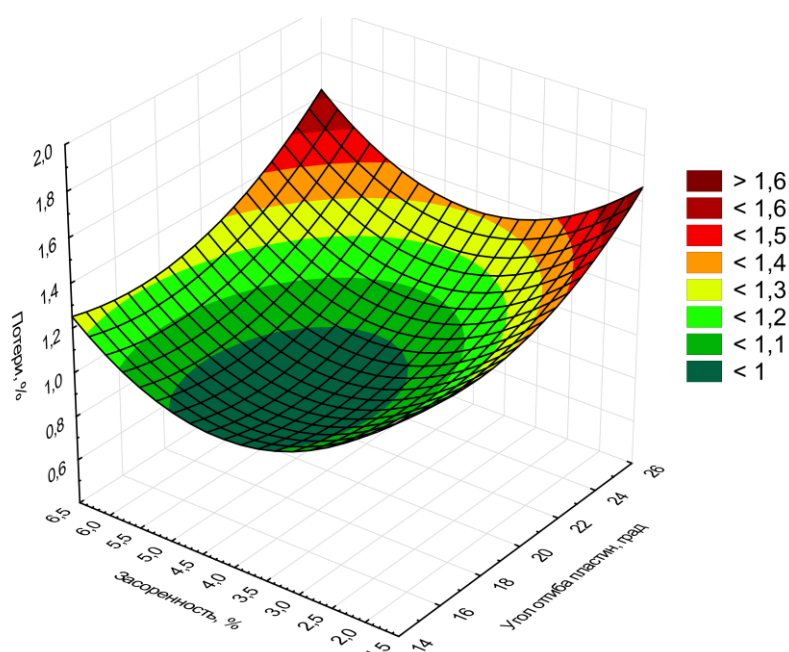


Рисунок 4.13 – Поверхности отклика для критерия оптимизации  $\Pi$  – потери зерна в отходы от  $X_1$  ( $C_0$ ) и  $X_2$  ( $\beta_0$ )

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\Pi = 3,4194 - 0,178 \cdot X_1 - 0,4698 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_1^2 + 0,0012 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,054 \cdot X_2^2 \quad (4.5)$$

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

Исследование влияния кинематических и технологических параметров, частоты вращения барабана ( $\omega_B$ ) и подачи зерна ( $Q$ ) показывает, что график (рисунок 4.14) зависимости от этих параметров на потери зерна в отходы носит линейный характер.

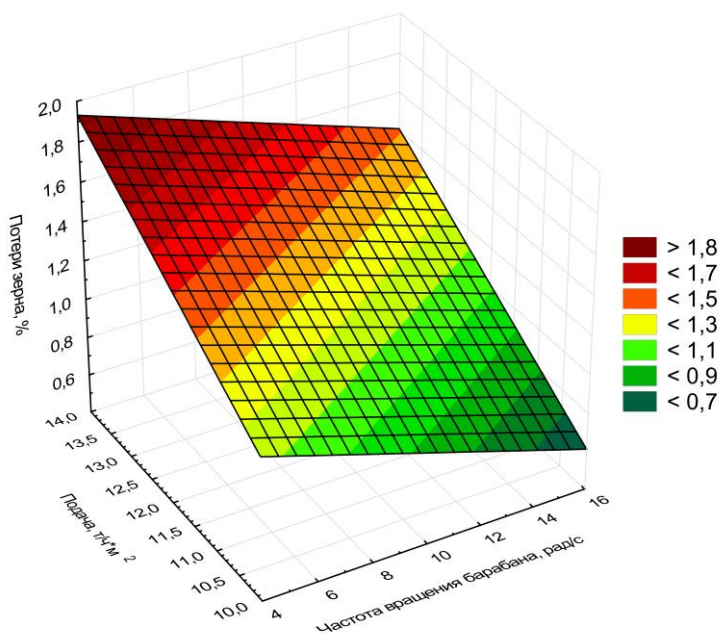


Рисунок 4.14 – Поверхности отклика для критерия оптимизации  $\Pi$  – потери зерна в отходы от  $X_3$  ( $\omega_B$ ) и  $X_4$  ( $Q$ )

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\Pi = -0,6875 - 0,0435 \cdot X_4 + 0,1995 \cdot X_3 \quad (4.6)$$

Наиболее существенное влияние на потери зерна показывает подача исходного материала на очистку, при этом величина засоренности  $X_1$  и угол отгиба пластин  $X_2$  были зафиксированы на среднем уровне.

#### 4.11. Энергетические затраты на работу сепаратора

Расчеты показывают, что наибольшая доля энергии затрачивается на транспортирование зерна по рабочей поверхности решета и преодоление сил трения зерна о зерно в активном слое.

Проведенными экспериментальными исследованиями ставилась задача определить фактические затраты мощности на работу центробежно-решетного сепаратора.

Приводим графические зависимости изменения мощности в зависимости от линейной скорости решета  $v_p$  (см. рисунок 4.15).

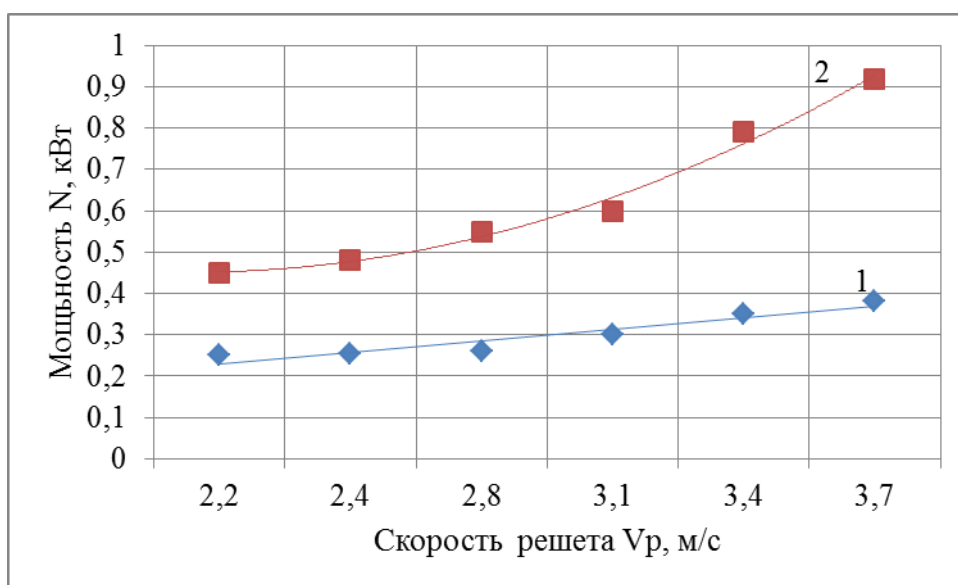


Рисунок 4.15- Изменение энергетических затрат в зависимости от скорости решета

1- мощность холостого хода при изменении  $v_p$ ;

2- энергозатраты на работу сепаратора при диаметре отверстий решета  $\Delta=3,6$  мм.

С увеличением  $V_p$  мощность холостого хода  $N_{xx}$  повышается по линейной зависимости. В исследуемом диапазоне по скорости решета ( $V_p=2,450\dots3,708$  м/с) это изменение невелико. При работе сепаратора в режиме подсевного решета ( $\Delta=3,6$  мм) с увеличением  $V_p$  мощность возрастает.

Следует отметить, что энергозатраты на обработку одной тонны зерна при известных параметрах сепаратора могут быть несколько снижены, если его изготавливать в промышленных условиях.

#### **4.12. Результаты производственных испытаний центробежно-решетного сепаратора с подсевным решетом**

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

Сепаратор включал в себя воздушный кольцевой пневмоканал с осадочной камерой, делительное решето, подсевное решето с пластинчатым барабаном. Решето использовалось с прямоугольными отверстиями, а барабан состоял из цилиндра с расположенными по образующей пластинами с отгибом в основании барабана по направлению его вращения.



Рисунок 4.16 – Воздушный центробежно-решетный сепаратор на  
испытаниях

Результаты производственных испытаний воздушного центробежно-решетного сепаратора в ООО «Лео» Калманского района представлены в таблице 4.4.



Таблица 4.4 – Данные проведения хозяйственной проверки центробежно-решетного сепаратора

№	Наименование показателя	Результаты испытаний
1	Обрабатываемый материал	Пшеница Алтайская 325
2	Влажность зерна, %	14,50
3	Содержание мелких примесей, %	5,29
	В т.ч. гречишка вьюнковая	1,56
	сурепка	2,43
	щерица	0,09
	просо куриное	1,21
5	Полнота выделения легких примесей, %	73,0
6	Полнота выделения мелких примесей, %	89,8
7	Потери зерна в отходы, %	0,5
8	Общая эффективность очистки, %	76,4
9	Рабочая площадь решета, м <sup>2</sup>	1,2
10	Установленная мощность электродвигателей в том числе на привод решета, кВт	7,0
		1,5
11	Угол наклона грани пластин барабана, град	0 <sup>0</sup>
12	Угол отгиба радиальной пластины в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения, град	20°
13	Шаг расстановки пластин, мм	44,0
14	Толщина активного слоя, мм	10,0
15	Размер отверстий решета, мм	□ 2,2×16
16	Производительность машины, т/ч	32,6
17	Вес машины, кг.	1270,0
18	Удельная металлоемкость, кг/т	38,9
19	Забиваемость решета	С применением цилиндрической щетки

Центробежно-решетный сепаратор имеет наименьшую металло и энергоёмкость в сравнении с машинами сходными по производительности.

Вертикальное расположение подсевного решета и пластинчатого барабана делает данную машину более компактной при высокой производительности.

#### 4.13. Методика расчёта центробежно-решетного сепаратора

При разработке методики расчета сепаратора нами взяты за основу некоторые теоретические положения исследований Б.Т. Тарасова и Стрикунова Н.И. [106, 102].

В качестве исходных данных используем следующие параметры: диаметр цилиндрического решета  $D=600$  мм, диаметр пластинчатого барабана (по кольцу)  $D_6=520$  мм.

1. Принимаем окружную скорость цилиндрического решета  $V_p=3,25$  м/с, что соответствует угловой скорости  $\omega=10,8$  с<sup>-1</sup> и показателю кинематического режима  $K=3,59$ , а соотношение скоростей вращения барабана и решета  $\frac{\omega_B}{\omega_P} = 0,57$ , использовали радиальные пластины с отгибом в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0 = 20^\circ$ .

Делительное решето устройства для предварительной подготовки зернового материала имеет окружную скорость цилиндрического решета.

2. Определяем диаметр загрузочной горловины. Задаемся диаметром трубы  $D_0 = 200$  мм и проверяем пропускную способность. Исходя из того, что сепаратор может работать и в режиме ворохоочистителя производительностью 50 т/ч, то целесообразно при обосновании диаметра горловины вести расчет по максимальному значению производительности.

Для производительности  $Q=50$  т/ч будем иметь  $F=0,02588$  м<sup>2</sup>. Так как загрузочная горловина имеет встроенные лучи  $n_\lambda$  (штук), то фактическая площадь ее будет меньше на величину  $\alpha_n$ .

$$F = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot \alpha_n \quad (4.5)$$

где  $D_0$  – диаметр горловины;

$\alpha_n$  – коэффициент перекрытия горловины лучами,  $\alpha_n < 1$ .

$$\alpha_n = 1 - \frac{d_0^2}{D_0^2} - \frac{2 \cdot n_n}{D_0} \cdot \left(1 - \frac{d_0}{D_0}\right), \quad (4.6)$$

где  $d_0$  – диаметр втулки;

$n_n$  – количество лучей.

Для диаметра  $D_0=200$  мм  $\alpha_n=0,92$ .

Учитывая, что диаметр самотечных труб в современных поточных линиях для послеуборочной обработки зерна 200 мм, то диаметр загрузочной горловины назначаем  $D_0=200$  мм.

3. Определяем угол  $\beta_{\Pi}$  раскрытия конуса питателя из условия

$$\gamma_{\text{тр}} \geq \arctg [2 \cdot f \cdot (1 + k)] \quad (4.7)$$

где  $f$  – коэффициент трения;

$k$  – коэффициент восстановления;

$\gamma$  – угол между начальной скоростью движения частицы и нормалью к поверхности конуса;

Применительно к конусу питателя:

$$\beta_{\Pi} = 90^\circ - \gamma, \quad (4.8)$$

Получаем приемлемое значение угла раскрытия конуса  $\beta_{\Pi} = 45^\circ$ , при котором будет обеспечиваться скольжение частицы после удара ее о поверхность конуса.

4. Определяем скорость движения  $V_0'$  зерна по загрузочной горловине и начальную скорость  $V_0$  движения по питателю.

Найдем скорость истечения зерна по самотечной трубе по формуле:[100]

$$V_{\text{ист}} = 1,91^{0,25} \quad (4.9)$$

$V_{\text{ист}}=1,17$  м/с.

В конце самотечной трубы предусматриваем гасители скорости зернового материала и определяем начальную скорость зерна в момент вступления на питатель. С учетом вышесказанного принимаем высоту свободного падения материала по загрузочной горловине  $h_{\text{п}}=0,1$  м и по формуле определяем скорость движения зерновки по загрузочной горловине до момента касания поверхности питателя.

$$V_0' = V_{\text{ист}} + \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\text{п}}}, \quad (4.10)$$

где  $h_{\text{п}}$  – высота падения зерна после гашения скорости.

Из расчетов имеем  $V_0' = 2,16$  м/с и при  $\beta_{\text{п}} = 45^\circ$  получим  $V_0=1,5$  м/с.

5. Определяем скорость схода частицы зернового материала с поверхности питателя по формуле:

$$V_{\text{сх}} = \dot{X} = \left( V_0 \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} - X_0 \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} - a \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \cdot e^{\lambda_1 t} + \left( X_0 \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} - V_0 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} - a \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \cdot e^{\lambda_2 t} \quad (4.11)$$

где 
$$a = \frac{g}{tg \cdot (\beta_{\text{п}} + \varphi) \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta_{\text{п}}}$$

При  $\beta_{\text{п}} = 45^\circ$ ,  $f=0,3$ ,  $X_0 = 0,05$  м,  $V_0=1,5$  м/с получим  $V_{\text{сх}} = 2,1$  м/с.

6. Определяем количество лопастей  $z$  на питателе, исходя из условий раскрутки зернового материала по формуле:

$$z > \frac{2 \cdot \pi \cdot V_0}{\omega \cdot l_{\text{т}}}, \quad (4.12)$$

где  $l_{\text{т}}$  – длина образующей от точки соприкосновения частицы до конца конуса питателя.

При  $l_{\text{т}}=0,18$  м и  $V_0=1,5$  м/с получим  $z > 5,9$  (шт). Принимаем  $z=6$  шт.

7. Определяем величину потребной площади кольцевого зазора  $\delta$  между питателем и делительным решетом, исходя из условия обеспечения потребной максимальной пропускной способности.

$$F_{\delta} = \frac{q_c}{V_{oc} \cdot \rho \cdot \xi_F}, \quad (4.13)$$

где  $q_c = \frac{Q}{3,6}$ ;

$Q$  – производительность сепаратора, т/ч;

$\xi_F$  – коэффициент заполнения сечения;

$\rho$  - объемная масса,  $\rho = 700$  кг/м<sup>3</sup>.

Требуемая величина кольцевого зазора равна:

$$\delta = \frac{F_{\delta}}{2 \cdot \pi \cdot \bar{r}_{cp}}, \quad (4.14)$$

где  $\bar{r}_{cp} = 0,18$  м средний радиус кольцевого пространства.

Из формулы (9) при  $V_{oc} = 0,7$  м/с,  $\xi_F = 0,9$  получим  $F_{\delta} = 0,032$  м<sup>2</sup>, что соответствует величине кольцевого зазора  $\delta = 28$  мм. Учитывая возможные изменения влажности, засоренности зерна и значительное снижение скорости  $V_0$ , влияющих на пропускную способность, назначаем  $\delta = 30$  мм.

8. Для безотрывного движения частицы угол раскрытия конуса делительного решета  $\theta$  должен удовлетворять условию:

$$\theta > \theta > \theta'_{кр}, \quad (4.15)$$

где  $\operatorname{tg} \theta = \frac{f \cdot K - 1}{K + 1}$

$K = \frac{\omega_p^2 \cdot R}{g}$  - показатель кинематического режима делительного решета в

данном сечении.

Учитывая конструктивные параметры цилиндрического решета и пластинчатого барабана, приходим к выводу, что рациональный угол раскрытия конуса делительного решета должен быть  $10 \dots 11^\circ$ . Такому углу раскрытия соответствует высота конуса  $300 \dots 350$  мм.

9. Выбираем угол раскрытия конуса обечайки.

Исходя из конструктивных соображений, принимаем  $\theta_k = 18^\circ$ , что не противоречит условию:

$$\theta_k < \arctg k_p, \quad (4.16)$$

При совместной работе подсевного и зернового цилиндрических решет необходимо также создать условия для эффективного выделения мелких примесей, поэтому коническая обечайка имеет на своей внутренней части ступенчатую поверхность.

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.

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\delta} \cdot \left( \frac{\gamma_0}{\gamma} - 1 \right) = \bar{\delta} \cdot \left( \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0} \right) = \bar{\delta} \cdot \left( \frac{1-k}{k} \right) = 0,82 \cdot \bar{\delta}, [2] \quad (4.17)$$

где  $\gamma_0$  - объемный вес дисперсной среды;

$\gamma$  - удельный вес частиц;

$k = \frac{\gamma_0}{\gamma}$  - коэффициент плотности укладки частиц.

Для пшеницы этот коэффициент колеблется в пределах  $k_{min} = 0,55$  и  $k_{max} = 0,655$ . [102]

При  $k_{max} = 0,655$  средний размер пор принимает значение  $\bar{\varepsilon} = 0,503\bar{\delta}$ .

Если принять для пшеницы  $\bar{\varepsilon} = 3$  мм, то:

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

$$\bar{\varepsilon}_{k_{max}} = 0,82 \cdot \bar{\delta} = 2,46 \text{ мм}$$

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

10. Определим пропускную способность делительного решета по формуле:

$$Q_1 = \frac{Q_{\text{нп}}}{c} \cdot (1 - e^{-\frac{cs}{s_0}}), \quad (4.20)$$

где  $Q_{\text{нп}} = \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot m_{\text{ср}} \cdot V_{\text{лср}} \cdot (1 - C)$  ;

$S_0$  – средний путь скольжения зерновки по решету от момента вступления ее в контакт с решетом до момента просеивания;

$C$  – относительное содержание сходовой фракции (по объему) в исходном материале в долях единицы.

При диаметре отверстий решета  $d=6,5$  мм,  $S_0=0.07$  м (для зерна пшеницы),  $V_{\text{лср}}=1,0$  м/с получим  $Q_1=15,6$  кг/с или  $Q_1=56$  т/ч.

При сравнительно небольшой площади сепарирующей поверхности делительного решета ( $0,46$  м<sup>2</sup>) по отношению к цилиндрическому, оно обеспечивает требуемую пропускную способность.

Проведем расчет основных параметров блока цилиндрических решет – подсевного и зернового.

Подсевное решето.

Исходные данные:

- рабочая высота решета –  $0,5$  м;
- диаметр решета –  $0,6$  м;
- общая толщина зернового слоя –  $0,04$  м;
- диаметр пластинчатого барабана –  $0,52$  м;
- толщина активного слоя с учетом того, что скорость скольжения зерна по решету была бы меньше критической,  $h_a = 10$  мм ;
- направление пластин барабана – радиальное  $\beta_1=0^\circ$ ;
- количество пластин  $n = 45$  шт.

Вследствие относительного скольжения частиц в зерновом слое между пластинами барабана и в активном слое пористость сыпучего тела будет максимальной [102]. Для эффективного выделения мелких примесей из

зернового материала высоту подсевного решета достаточно иметь 0,5 м, а диаметр отверстий решета  $d_p = 3,6$  мм, с прямоугольными отверстиями - 2,0 мм.

Зерновое решето.

- рабочая высота решета – 0,65 м;
- диаметр решета – 0,6 м;
- диаметр отверстий решета  $d_p = 5,25$  мм (первичная очистка),  
 $d_p = 6,5$  мм (предварительная очистка);
- угол подъема винтовой спирали  $\alpha = 10^\circ$ , имеющая по высоте цилиндра два захода, а в нижней части четыре захода;
- направление пластин барабана  $\beta = 45^\circ$ .

Для решетного блока принимаем окружную скорость цилиндрических решет  $V_p = 3,25$  м/с, что соответствует  $\omega = 10,8$  с<sup>-1</sup> и показателю кинематического режима  $K_p = 3,59$ , а соотношение угловых скоростей вращения барабана и решета соответственно  $\frac{\omega_b}{\omega_p} = 0,5$ .

В предлагаемой методике использованы формулы для расчета параметров, полученные Б.Т. Тарасовым. [107]

11. Определяем скорость  $V_r$  скольжения зерна по рабочей поверхности цилиндрического решета и осевую составляющую этой скорости по формуле:

$$V_r = (\omega_p - \omega_b) \cdot R \cdot \frac{k_c \cdot \Phi}{\cos \alpha}, \quad (4.21)$$

где  $R$  – радиус цилиндра;

$k_c$  – коэффициент, зависящий от толщины активного слоя, физико-механических свойств зерновой смеси и других факторов;



$\Phi$  – коэффициент скорости, определяемый аналитически.

При  $k_c = 0,25$ ,  $\Phi = 0,715$  и  $\alpha = 10^\circ$  получим  $V_r = 0,296 \text{ М/с}$  и  $V_z = 0,0515 \text{ М/с}$ .

12. Определяем величину критической скорости  $(V_r)_{\text{кр}}$  скольжения зерна по рабочей поверхности цилиндрического зернового решета по формуле:

$$V_r = \left(d_p - \frac{\Delta}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{g}{2}} \cdot \frac{\sqrt{K_r}}{1 + \left(d_p - \frac{\Delta}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{R \cdot \Delta} \cos \alpha}}, \quad (4.22)$$

где  $\Delta$  – ширина зерновки;

При  $d_p = 5,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\Delta = 0,0036 \text{ м}$  получим  $(V_r)_{\text{кр}} = 0,311 \text{ М/с}$ .

Таким образом,  $V_r < (V_r)_{\text{кр}}$ . Необходимые условия для просеивания зерна пшеницы выполняются.

13. Определяем значение осевой скорости скольжения зерна по колосовому решету в конце цилиндра:

$$V_z^1 = \sqrt{V_{0z}^2 + 2 \cdot g \cdot H_k \cdot (1 - f \cdot K_k)}, \quad (4.23)$$

где  $H_k$  – высота цилиндра колосового решета;

$K_k$  – кинематический показатель режима работы колосового решета.

При  $H_k = 0,61$ , коэффициенте трения  $f = 0,325$  и начальной скорости  $V_{0z} = 0,1 \dots 0,3 \text{ М/с}$  получим  $V_z^1 = 2,933 \dots 2,984 \text{ М/с}$ , что значительно превышает критическую скорость скольжения зерна по решету с круглыми отверстиями диаметром 10 мм. Поэтому гасители скорости должны быть

установлены не только в начале колосового решета, но и в промежуточных точках по его высоте.

14. Определяем производительность сепаратора (по проходу) по формуле:

$$Q = 3,6K_{\text{сп}}\pi D\Delta V_z \gamma \frac{1-c_0(1-\xi)}{c_0(1-\xi)} \left[ 1 - e^{-\frac{c_0(1-\xi)H}{l_0 \sin \alpha}} \right] \text{Т/ч}, \quad (4.24)$$

где  $K_{\text{сп}} = 0,957$  – коэффициент, учитывающий перекрытие рабочей площади

решета винтовой спиралью;

$D$  – диаметр цилиндрического решета;

$V_z$  – осевая скорость движения слоя зерна;

$C_0$  – содержание длинных примесей в исходном материале;

$\Delta$  – вес элементарного слоя,  $\Delta = 2 \text{ кг/м}^2$ ;

$\gamma$  – объемная масса проходной фракции;

$\xi$  – коэффициент, учитывающий расслоение зерновой смеси,  $\xi = 0,75$ ;

$H$  – высота цилиндрического решета;

$l_0$  – средний путь скольжения зерна по решету от момента вступления его в контакт с решетом, до момента просеивания;

$\alpha$  – угол подъема винтовой спирали;

Определим величину  $l_0$  по формуле:

$$l_0 = \frac{\pi d^2}{4\mu_0(d-d_0)}, \quad (4.25)$$

где  $d_0$  – эффективный диаметр зерна,  $d_0 = 4,4 \text{ мм}$ ;

$\mu_0$  – относительная живая площадь,  $\mu_0 = 0,458 \text{ м}^2$ .

При высоте рабочей части цилиндра  $H=0,65 \text{ м}$ ,  $V_z = 0,0515 \text{ м}$ ,  $\xi = 0,75$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $l_0 = 0,07 \text{ м}$  получим  $Q = 34,4 \text{ Т/ч}$ .

Используя полученную формулу, при различных значениях  $\xi$ , можно построить теоретические зависимости  $Q_F$  от исходной засоренности зернового материала.

Энергетические параметры работы сепаратора.

15. Мощность, необходимая для привода сепаратора при установившемся режиме:

$$N = N_{\text{тр}} + N_{\text{кин}} + N_{\text{сопр}}, \quad (4.26)$$

где  $N_{\text{тр}}$  – мощность, расходуемая на трение зерна о зерно в активном слое, о рабочую поверхность и в подшипниках, а также трение очистительных щеток о поверхность решета;

$N_{\text{кин}}$  – мощность, расходуемая на сообщение кинетической энергии;

$N_{\text{сопр}}$  – мощность, расходуемая на выгрузное устройство.

16. Определяем мощность, расходуемую на трение зерна в активном слое и в подшипниках по формуле:

$$N_{\text{тр}} = f m_1 F_p z \frac{(\omega_p R)^2}{R} \left( 1 - \eta_k \frac{\omega_b}{\omega_p} \right) \frac{\cos \beta}{\eta_{\text{д-р}}}, \quad (4.27)$$

где  $f$  – коэффициент трения зерна о зерно;

$m_1$  – масса элементарного слоя, отнесенная к единице площади;

$z$  – безразмерный параметр, равный отношению радиальной силы  $P$  давления зерновой смеси на частицу к центробежной силе инерции частицы (при вращении ее с угловой скоростью решета);

$\beta$  – угол между направлением силы трения зерна о первый элементарный слой и горизонтальной плоскостью;

$\eta_{\text{д-р}}$  – к.п.д. передачи от двигателя решету;

$\eta_k$  – к.п.д. замкнутого контура, по которому циркулирует мощность.

При  $f = 0,7$ ,  $m_1 = 2 \text{ кг/м}^2$ ,  $F_p = 1,2 \text{ м}^2$ ,  $\eta_k = \eta_{д-р} = 0,8$ ,  $z = 3$ ,  
 $\omega_p R = 3,25 \text{ м/с}$ ,  $\frac{\omega_6}{\omega_p} = 0,5$  и  $\cos\beta = 0,97$  получим  $N_{тр} = 0,419 \text{ кВт}$ .

Полагаем, что при выходе из сепаратора зерновой материал имеет скорость, равную окружной скорости решета  $V_p = \omega_p R \text{ (м/с)}$  получим:

$$N_{кин} = m^I \frac{V_p^2}{2}, \quad (4.28)$$

где  $m^I$  – секундная масса зернового материала, поступившего в сепаратор.

Мощность  $N_{сопр}$ , затрачиваемая на выгрузку зерна и отходов:

$$N_{сопр} = \sum M_{тр} \cdot \omega_p, \quad (4.29)$$

## Глава 5. Техничко-экономическая оценка центробежно-решетного сепаратора

Полученные результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса сепарации зернового материала на воздушном центробежно-решетном сепараторе свидетельствует 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.

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 [7, 58, 59].

Расчеты произведены в ценах 2022 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.

$$C_{\text{м}} = C_{\text{изг}} + П_{\text{н}} \quad (5.1)$$

где  $C_{\text{изг}}$  – себестоимость изготовления машины, руб.;

$П_{\text{н}}$  – нормативная прибыль, руб.;

5.1.1  $C_{\text{изг}}$  – себестоимость изготовления машины, руб.

$$C_{\text{изг}} = Z_{\text{м}} + Z_{\text{зп}} + Z_{\text{н}} \quad (5.2)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – стоимость материалов,  $Z_{\text{м}} = 182500$  руб.;

$Z_{\text{зп}}$  – затраты на заработную плату, руб.;

$Z_{\text{н}}$  – накладные расходы, руб.;

5.1.2 Расходы на оплату труда определяются по формуле:

$$Z_{\text{зп}} = (T_{\text{ф}} + D_{\text{м}}) \times K_{\text{р}} \times K_{\text{отп}} \times K_{\text{соц}}, \text{ руб} \quad (5.3)$$

где  $T_{\text{ф}}$  – тарифный фонд, руб.;

$D_{\text{м}}$  – доплаты к тарифному фонду, руб.;

$K_{\text{р}}$  – районный коэффициент ( $K_{\text{р}} = 1,15 \dots 1,18$  для Алтайского края);

$K_{\text{отп}}$  – коэффициент, учитывающий отчисления на отпуск ( $K_{\text{отп}} = 1,067$ );

$K_{соц}$  – 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:

$$T_{\phi} = T_{ч} \times t_p, \text{ руб.} \quad (5.4)$$

где  $T_{ч}$  – часовая тарифная ставка, руб./час;

$T_{ч} = 135$  руб. - принимается по данным предприятия: К(Ф)Х «Рифер»;

$t_p$  – 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.,

$$D_m = 10\% \times T_{\phi}. \quad (5.5)$$

$$D_m = 10\% \times 48600 = 4860, \text{ руб.}$$

$$З_{ЗП} = (48600 + 4860) \times 1,15 \times 1,067 \times 1,26 = 82657, \text{ руб.}$$

5.1.5 Общие накладные расходы предприятия, включая электроэнергию, амортизацию и ремонт оборудования.

$$C_H = 2,5 \times З_{ЗП}, \text{ руб.} \quad (5.6)$$

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

$$П_H = \frac{P \times Ц_m}{100}, \text{ руб.} \quad (5.7)$$

где  $P$  – уровень рентабельности  $P = 20 \dots 30\%$  берём 24%

$$П_H = \frac{24 \cdot 471789}{100} = 113229, \text{ руб}$$

$$Ц_m = 471789 + 113229 = 585018, \text{ руб.}$$

## 5.2. Балансовая стоимость машины

$$Ц_B = Ц_M \times K_{дос} \times K_{мон} \times K_{пн}, \text{ руб.} \quad (5.8)$$

где  $K_{дос}$  – коэффициент учитывающий доставку зерноочистительной машины к месту монтажа,  $K_{дос} = 1,07$ ;

$K_{мон}$  – коэффициент, учитывающий затраты на монтаж в линию

$$K_{мон} = 1,15;$$

$K_{пн}$  – коэффициент, учитывающий затраты на пусконаладочные работы;

$$K_{пн} = 1,03.$$

$$Ц_{Б\text{ ВЦР}} = 585018 \times 1,07 \times 1,15 \times 1,03 = 741460 \text{ руб.}$$

$$Ц_{Б\text{ МПР}} = 842000 \times 1,07 \times 1,15 \times 1,03 = 1067163 \text{ руб.}$$

## 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 [59];

$K$  – коэффициент использования рабочего времени  $K = 0,85$  [59].

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

$$Z_{ЗПО} = \frac{T_{ф} \times K_{кач} \times K_p \times K_{омн} \times K_{соц}}{W_G}, \text{ руб./т} \quad (5.11)$$



где  $T_{\phi}$  – 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

$$T_{\phi} = C_{\text{ч}} \times T_{\text{з}}, \text{ руб} \quad (5.12)$$

где  $C_{\text{ч}}$  – часовая ставка рабочего по данным хозяйства,  $C_{\text{ч}} = 60$  руб./час;

$T_{\text{з}}$  – время работы оператора;

$$T_{\phi} = 120 \times 260 = 31200, \text{ руб.}$$

для ВЦР – 50 и МПР – 50

$$З_{\text{зпо}} = \frac{31200 \cdot 1,1 \cdot 1,15 \cdot 1,067 \cdot 1,26}{11050} = 4,8, \frac{\text{руб}}{\text{т}}$$

#### 5.4.3 Удельные амортизационные отчисления

$$З_{\text{ам}} = \frac{H_A \Pi_B}{100 W_{\Gamma}}, \text{ руб./т} \quad (5.13)$$

где  $H_A$  – процент отчислений на реновацию,  $H_A = 12,5\%$

$$\text{для ВЦР – 50 } З_{\text{ам ВЦР}} = \frac{12,5 \cdot 741460}{100 \cdot 11050} = 8,39, \text{ руб/т};$$

$$\text{для МПР – 50 } З_{\text{ам МПР}} = \frac{12,5 \cdot 1067163}{100 \cdot 11050} = 12,07, \text{ руб/т.}$$

#### 5.4.4 Удельные отчисления на ремонт и техническое обслуживание

$$З_{\text{рм}} = \frac{H_p \Pi_B}{100 W_{\Gamma}}, \text{ руб./т} \quad (5.14)$$

где  $H_p$  – процент отчислений на ремонт и техническое обслуживание,  $H_p = 12\%$

$$\text{для ВЦР} - 50 \quad Z_{\text{Б ВЦР}} = \frac{12 \cdot 741460}{100 \cdot 11050} = 8,05, \text{ руб/т};$$

$$\text{для МПР} - 50 \quad Z_{\text{Б МПР}} = \frac{12 \cdot 1067163}{100 \cdot 11050} = 11,59, \text{ руб/т}.$$

#### 5.4.5 Удельные затраты на электроэнергию

$$Z_{\text{Э}} = \frac{NK_{\text{Э}}C_{\text{Э}}T_{\text{Г}}}{W_{\text{Г}}}, \text{ руб./т} \quad (5.15)$$

где  $K_{\text{Э}}$  – коэффициент использования мощности электродвигателей,  $K_{\text{Э}} = 0,85$ ;

$C_{\text{Э}}$  – цена 1кВт×ч электроэнергии на сентябрь 2022 г,

$$C_{\text{Э}} = 5,94 \text{ руб./кВт×ч};$$

$$Z_{\text{Э ВЦР}} = \frac{7,0 \cdot 0,85 \cdot 5,94 \cdot 260}{11050} = 0,83, \text{ руб/т};$$

$$Z_{\text{Б МПР}} = \frac{9,4 \cdot 0,85 \cdot 5,94 \cdot 260}{11050} = 1,12, \text{ руб./т}.$$

Определение удельных эксплуатационных расходов:

для ВЦР – 50

$$C_{\text{уд}} = 4,8 + 8,39 + 8,05 + 0,83 = 22,07 \text{ руб/т};$$

для МПР – 50С

$$C_{\text{уд}} = 4,8 + 12,07 + 11,59 + 1,12 = 29,58 \text{ руб./т}.$$

#### 5.5. Удельная энергоёмкость

$$\text{Э} = \frac{N \times T_{\text{Г}}}{W_{\text{Г}}}, \text{ кВт ч/т} \quad (5.16)$$

где  $N$  – мощность, потребляемая машиной, кВт×ч

$$\text{Э}_{\text{ВЦР}} = \frac{7,0 \times 260}{11050} = 0,16, \text{ кВт ч/т};$$

$$\text{Э}_{\text{МПР}} = \frac{9,4 \times 260}{11050} = 0,22, \text{ кВт ч/т}.$$

#### 5.6. Удельная металлоёмкость

$$M = \frac{M}{W_{\text{Г}}}, \text{ кг/т} \quad (5.17)$$

где  $M$  – масса машины, кг

$$M_{ВЦР} = \frac{1270}{11050} = 0,11, \text{ кг/т};$$

$$M_{МПР} = \frac{1885}{11050} = 0,17, \text{ кг/т}.$$

### 5.7. Расчет удельной трудоемкости работы машин

$$T = \frac{C_p T_G}{W_G}, \text{ чел} \times \text{час/т} \quad (5.18)$$

где  $C_p$  – число обслуживающих рабочих,  $C_p = 1$  человек;

$$T_{ВЦР,МПР} = \frac{1 \times 260}{11050} = 0,23, \text{ чел} \times \text{час/т}.$$

### 5.8. Удельные капиталовложения на единицу работы

$$Y = \frac{C_B}{W_G}, \text{ руб./т} \quad (5.19)$$

$$Y_{ВЦР} = \frac{741460}{1105} = 67,1, \text{ руб/т};$$

$$Y_{МПР} = \frac{1067163}{1105} = 96,6, \text{ руб/т}.$$

### 5.9. Приведенные затраты на единицу работы

$$Z_{ПР} = C_{y\partial} + E_{нор} \times Y, \text{ руб./т} \quad (5.20)$$

где  $E_{нор}$  - нормативный коэффициент эффективности капиталовложения,  
 $E_{нор} = 0,2 \dots 0,25$ ;

$$Z_{ПР ВЦР} = 22,07 + 0,2 \times 67,1 = 35,49, \text{ руб/т};$$

$$Z_{ПР МПР} = 29,58 + 0,2 \times 96,6 = 48,9, \text{ руб/т}.$$

### 5.10. Годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой зерноочистительной машины ВЦР – 50

$$\Delta_G = (Z_{ПР МПР} - Z_{ПР ВЦР}) \times W_G \quad (5.21)$$

$$\Delta_G = (48,9 - 35,49) \times 11050 = 148140 \text{ руб.}$$

### 5.11. Экономия капиталовложений в связи с внедрением новой машины

$$\pm \Delta = C_{Б\text{ Баз}} - C_{Б\text{ Нов}} \frac{W_{ГН}}{W_{ГБ}}, \text{ руб.} \quad (5.22)$$

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

$$\Delta = 1067163 - 741460 = 325703, \text{ руб.}$$

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	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	Приведенные затраты	руб./т	35,49	48,90
10	Удельная металлоемкость	кг/т	0,11	0,17
11	Удельная энергоемкость	кВт ч/т	0,16	0,22
12	Годовой экономический эффект	руб.	148140	-
13	Экономия капиталовложений	руб.	325703	-

## Общие выводы

1. Проведенный анализ центробежно-решетных сепараторов показал, что обеспечение устойчивости рабочего процесса сепарирования на подсевном решете возможно за счет применения внутреннего пластинчатого барабана с радиальными пластинами. Анализ математических моделей движения зерновой смеси по поверхности цилиндрического подсевного решета показывает, что чем меньше путь проходит частица относительно сепарирующей поверхности, тем больше происходит относительное перемещение прилегающих к решету последующих слоев, а следовательно увеличивается вероятность проникновения между слоями проходových частиц. Установлено, что основными факторами, управляющими процессами, являются параметры пластинчатого барабана: угол наклона пластин барабана к радиусу  $\beta_1$ , угол отгиба пластины в основании цилиндрического барабана по направлению его вращения  $\beta_0$ , шаг расстановки пластин  $S$ .

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

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

4. Производственные испытания экспериментального образца сепаратора с подсевным решетом показали, что при производительности

сепаратора 32,6 т/ч полнота выделения мелких примесей составила 89,8%, а потери зерна в отходы не превышали 0,5%.

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

## 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. Рошин // 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. Вибрационно-центробежный сепаратор [Текст]: а.с. 1535650 СССР, В 07 В 1/26, 4/08. / Л.Н. Тищенко, С.В. Проценко. - №4360735/30-03; заявл. 02.12.87; опубл. 15.01.90, Бюл. №2.

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. Виброцентробежная просеивающая машина [Текст]: а.с. 1546179 А1 СССР, В 07 В 1/26. / А.Ф. Прокопенко, Е.Л. Орлов, Л.А. Борискин, Е.А. Алабин, Ю.А. Лесик. -№ 4408977/25-03; заявл. 12.04.88; опубл. 28.02.90, Бюл. №8.

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. 435-437.
25. Горячкин, В.П. Собрание сочинений [Текст]: в 3-х томах.- М.: Колос, 1965.- Т. 3.- С. 183 - 185.
26. Дашевский, В.И. К теоретическому изучению процесса сортирования кукурузы и гороха [Текст] / В.И. Дашевский, Е.А. Непомнящий // Тр./ ВНИИЗ. - М., 1965.- Вып. 54. - С. 18-26.
27. 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.

28. 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.
29. Дринча, В.М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки [Текст].- Воронеж: НПО «МОДЭК», 2006.- 384 с.
30. Евграфов, В.А. Вероятностная оценка структуры дисперсной среды. [Текст] / В.А. Евграфов // Инженерно-физический журнал №10, 1964. – с. 121-127.;
31. Ермольев, Ю.И. Интенсификация технологических операций в воздушно-решетных зерноочистительных машинах [Текст] / ДГТУ. - Ростов н/Д, 1998. - 496 с.
32. 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.
33. 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.
34. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов [Текст]. - 2-е изд. перераб. и доп. -М., Машиностроение, 1964. – 216 с.
35. 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.
36. 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.

37. Иванов, Н.М. Сепарация зерна на конических решетках с профилированной поверхностью [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. - Новосибирск, 1988. - 171 с.
38. 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.
39. Каталог продукции ОАО ГСКБ "Зерноочистка" [Текст]. - Воронеж: Изд-во ОАО "Издательско-полиграфическая фирма "Воронеж" 2010. – 58 с.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. Кожуховский, И.Е. Зерноочистительные машины [Текст]. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.
45. 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.

46. 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.
47. 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>
48. 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.
49. Куринная, Н.О. Повышение эффективности сепарации зерна круговыми колебаниями решет в режиме самоочистки отверстий от застрявших частиц [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н.О. Куринная. - Челябинск, 2009. – 22 с.
50. 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.
51. 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.
52. 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.
53. 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.

54. Летошнев, М.Н. Сельскохозяйственные машины [Текст].- М.;Л.: Сельхозгиз, 1955. - 764 с.

55. 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.

56. Машина предварительной очистки с решетной приставкой МПР – 50 руководство по эксплуатации [Текст]. – Воронеж: Изд-во ОАО ГСКБ "Зерноочистка" 2001. – 22 с.

57. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов [Текст] / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин.- 2-е изд., перераб. и доп.- Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1980. – 168 с.

58. Методика определения оптовых цен на новые сельскохозяйственные машины [Текст]. - М.: Прейскурантгиз, 1979. - 239 с.

59. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [Текст] / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Российской Федерации. - М., 1998. - 219 с.

60. 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.

61. 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.

62. 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.

63. Непомнящий, Е.А. Расчет извлечения мелких частиц из сепарируемой смеси при равномерном начальном распределении [Текст] // Тр. / ВНИИЗ.- М., 1963.- Вып. 48. - С. 97 - 104.
64. 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.
65. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Ф.С. Новиков, Я.Б. Арсов. - М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. - 304 с.
66. 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
67. 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.
68. Папин, Б.Д. Методология детерминированно-статистического моделирования процессов сепарации [Текст]// Электротехнологические методы и установки в с.-х. пр-ве. - Челябинск, 1989. - С. 5-21 .
69. 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.
70. 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
71. 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»)

72. Платонов, П.Н. Физико-механические свойства зерна как сыпучего тела [Текст] // Пищевое машиностроение: сб. науч.-тех. инфор.- М., 1959.- №14-15.- С. 3-15.
73. Полуэктов, Н.И. К вопросу сепарирования семенных смесей центрифугированием [Текст] // Тр. / Благовещен. с.-х. ин-т. - Благовещенск, 1961.- Т.2. - С. 145-153.
74. 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.
75. 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.
76. 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.
77. Саитов, В.Е. Совершенствование технологического процесса воздушно-решетных зерно- и семяочистительных машин [Текст]: рекомендации.- Киров: Вятская ГСХА, 2008.- 89 с.
78. Сельскохозяйственные машины. Теория, конструкция и расчет [Текст] / Б.Г. Турбин, А.Б. Лурье А.Б., Григорьев. - М.; Л.: Машгиз, 1963.- 575 с.
79. 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.

80. Слепов, А.П. Исследование процесса разделения зерновой смеси центрифугованием в сочетании с потоком воздуха (пневмоцентрифугование) [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.П. Слепов. - Волгоград.- 1984.- 19 с.
81. 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.
82. Слипченко, М. В. Аналіз факторів, що впливають на швидкості сходу зернової та домішкової фаз з тарілчастого розкидача вібровідцентрового сепаратора [Текст] / М. В. Слипченко, М. В. Півень // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. — 2015. — Вип. 157. — С. 106–113.
83. Совершенствование конструкции шариковой очистки [Текст] / А.П. Тарасенко [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. - 2008. -№4. – С.41-43.
84. Современные машины для послеуборочной обработки зерна и семян: учебное пособие для вузов [Текст] / Тарасенко А.П. - М.: КолосС, 2008. - 232 с.
85. 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.
86. 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.
87. 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.



88. Способ и устройство Буркова Л.Н. для очистки сортировальных решет [Текст]: пат. RU 2376747 C1 / Бурков Л.Н. - № 2008140654/12; заявка 13.10.2008, опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.
89. Способ и устройство Буркова Л.Н. для очистки сортировальных решет [Текст]: пат. RU 2377762 C1 / Бурков Л.Н. - № 2008143167/12, заявка 30.10.2008, опубл. 10.01.2010, Бюл. № 1.
90. 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.
91. 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.
92. Степаненко С. П. Експериментальні дослідження процесу очищення зерна в пневмовібродцентровому сепараторі з удосконаленою аспіраційною камерою [Текст] / С. П. Степаненко, В. О. Швидя // Вібрації в техніці та технологіях. — 2012. — № 3. — С. 129–133.
93. 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.
94. 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.
95. 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.

96. 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
97. 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.
98. Стрикунов, Н.И. Техническое состояние мехтоков и перспективы их совершенствования [Текст] / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов // Агровестник Алтая. – 2009. - №.6(60) – С. 16.
99. 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.нучн.тр. Алт. с.х. ин-т.- Барнаул.-1987.- С.34-38.;
100. 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.;
101. 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. -2000.- №
102. Стрикунов, Н. И. Кинематические и энергетические характеристики центробежно-решетного сепаратора [Текст] / Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов, С.С. Щербаков // Вестник АГАУ № 4 (162).- 2018.- С. 168-172.
103. Сычугов Н. П., Сычугов Ю. В.2004106191/13. Центробежно-пневматический сепаратор для очистки зернового материала /; заявл. 02.03.2004; опубл. 20.12.2005, Бюл. № 35, 6 стр.

104. 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.
105. 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.
106. Тарасов, Б.Т. К теории процесса сепарации зерновых смесей виброрешетками [Текст] // Тр. / Алт. с.-х. ин-т. - 1966. - Вып. 7. - С. 9-16.
107. 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.
108. 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.
109. 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.
110. 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.
111. Терсков Г.Д. О влиянии основных факторов на пропускную способность решет с круглыми отверстиями // Тр. / ЧИМЭСХ. - 1958. - Вып. 6. - С. 33-94.

112. Терсков, Г.Д. Расчет зерноуборочных машин [Текст].- М.; Свердловск: Машгиз, 1961. – 214 с.
113. Тиц, З.Л. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Теория и расчет машин, технология и автоматизация процессов [Текст]. - М.: Машиностроение, 1967.- 448 с.
114. . 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.
115. Тищенко, Л. Н. Колебания зерновых потоков на виброрешетах [Текст]: [монография] Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский. - Харьков: "Міськдрук" 2012. - 267 с.
116. Тищенко, Л. Н. Результаты производственных испытаний зернового сепаратора А1-БЦСМ-100 с разработанными решетами [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.
117. 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.
118. Ткачев, В.В. О новой конструкции механизма очистки решет лесных семяочистительных машин [Текст] / В.В. Ткачев // Региональный вестник молодых ученых.-2004.-№3.- 53-57.
119. Торопов, В.Р. Исследование работы цилиндрического решета планетарной сортировки [Текст] // Тр. / ВИМ.- М., 1974.- Т. 65.- С. 111-118.

120. 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
121. 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.
122. 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.
123. 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.
124. 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.
125. 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.
126. 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.
127. 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.

128. 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.
129. 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.
130. Цециновский, В.М. Методы оценки технологического эффекта сепарирования [Текст] // Сб. науч. тр. / ВНИИЗ. - М., 1963. - Вып. 44. - С. 77-94.
131. Цециновский, В.М. Теория простого сепаратора [Текст] // Тр./ ВНИИЗ. - М., 1963.- Вып. 48. - С. 39-63.
132. 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. -
133. 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
134. 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.
135. Швидя В. О. Підвищення ефективності пневмовідцентрового сепаратора та обґрунтування параметрів робочих органів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11«Машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / Швидя Віктор Олександрович — Глеваха, 2012. — 18 с.

136. Шевцов, И.В. Решета провлочно-сварной конструкции с круглыми перемычками [Текст] // Аграрный вестник Урала. - 2007. - №2.- С. 46-53.
137. 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.
138. 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.
139. 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.
140. 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.
141. 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.
142. 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.
143. Ямпиров, С.С. Технологические и технические решения проблемы очистки зерна решетками [Текст].- Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2004.- 165 с.

144. 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.
145. 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.
146. Патент № 2749395 Российская Федерация, МПК В07В 9/00 (2006.01)/ Мобильный зерноочистительный агрегат/ Стрикунов Н.И., Леканов С.В., Черкашин С.А., Щербаков С.С.; заявитель и патентообладатель Барнаул, АлтГАУ. № 2020132603; заявл. 01.10.2020; опубл.: 09.06.2021, Бюл. №16.-10 с.
147. 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.
148. Цилиндричне решето [Text]: ua 35149 (51) МПК (2006) В07В 1/18. /Л.М. Тищенко; М.В. Півень; О.В. Мандрика; Ф.М. Резніченко; В.М. Пуха. - № 200708062; заявка 16.07.2007; опубл 10.09.2008, Бюл.№ 17.
149. Cleaning machine with a vertical cylinder screen [Text]: us 4534859 / A. Ingmar - № 553721; filed Nov. 21, 1983; publication Aug. 13, 1985.
150. Screen for vibrating centrifugal separation machines [Text]: us 4247392 В04В 7/18 / E. S. Goncharov: № 52,360; filed Jun. 27, 1979, publication Jun. 27, 1981.
151. Trommel cleaner [Text]: us 5605233 / D.A. Nauch - № 380025; filed Jan. 30, 1995; publication Feb. 25, 1997.
152. UA 42728 U МПК (2009) МПК А01С 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.



153. UA 48909 U (51) МПК (2009) МПК В07В 1/28. Вібраційно-відцентровий сепаратор / С.І. Малюта. — № u200910543 заявка 19.10.2009; опубл. 12.04.2010, Бюл.№ 7, 3 с.

# **ПРИЛОЖЕНИЕ**

## Приложение А. Патенты Российской Федерации



Рисунок 1 – Патент №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 патентного права на изобретение истекает 01 октября 2040 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев*



Рисунок 2 – Патент №2749395 Мобильный зерноочистительный агрегат

## **Приложение Б. Акты внедрения**