

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
К.Е. ВОРОШИЛОВА»

На правах рукописи



Круглых Никита Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИИ СЕМЯН ТЫКВЕННЫХ
КУЛЬТУР ПНЕВМАТИЧЕСКИМ СЕПАРАТОРОМ С
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОПОРНОЙ СЕПАРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного
комплекса

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Ильченко А.А.

Луганск – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	стр. 5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СЕПАРАЦИИ СЕМЯН ТЫКВЕННЫХ КУЛЬТУР, ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА....	12
1.1. Роль сепарации в эффективности возделывания сельскохозяйственных культур.....	12
1.2. Анализ состояния сепарации семян тыквенных культур с целью отбора биологически ценных семян.....	15
1.3. Анализ исследований ученых в области сепарирования.....	29
1.4. Обоснование улучшения способа разделения семян тыквы по массе.....	36
1.5. Преимущества и недостатки прототипов сепаратора.....	40
1.6. Анализ сепарирующих поверхностей применительно к разрабатываемому сепаратору.....	42
1.7. Выводы по главе.....	46
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА.....	47
2.1. Модель функционирования пневматического сепаратора.....	47
2.2. Математическое моделирование работы пневматического сепаратора.....	53
2.3. Моделирование работы камеры разрежения сепаратора.....	64
2.4. Определение основных показателей работы сепаратора.....	69
2.5. Выводы по главе.....	73
ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА.....	75
3.1. Программа экспериментальных исследований.....	75
3.2. Методика исследования сепарирующих поверхностей.....	76

3.3.	Методика исследования работы воздушных камер пневматического сепаратора	82
3.4.	Планирование однофакторных экспериментов по разделению семян для нахождения рациональных параметров сепаратора	85
3.5.	Планирование многофакторного исследования разделения семян тыквы	88
3.6.	Методика исследования разделения семян тыквы экспериментальными сепарирующими поверхностями	91
3.7.	Методика разделения семян огурца.....	92
3.8.	Экспериментальная установка.....	93
3.9.	Выводы по главе.....	96
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....		98
4.1.	Общая характеристика экспериментальных исследований и полученных результатов.....	98
4.2.	Результаты исследования рабочих поверхностей пневматического сепаратора.....	98
4.3.	Результаты исследования камеры разрежения пневматического сепаратора.....	103
4.4.	Результаты однофакторных экспериментов по разделению семян пневматическим сепаратором.....	104
4.5.	Результаты проведения многофакторного эксперимента.....	109
4.6.	Результаты разделения семян разными рабочими поверхностями...	116
4.7.	Результаты разделения семян огурца.....	118
4.8.	Выводы по главе.....	120
ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....		122
5.1.	Создание опытной модели пневматического сепаратора.....	122

5.2. Анализ перспектив внедрения сепаратора на рынок.....	123
5.3. Экономическая эффективность внедрения сепаратора ССБ-0,1.....	126
5.4. Рекомендации по использованию сепаратора в производстве.....	128
5.5. Выводы по главе.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. По мнению специалистов, продовольственная независимость любой страны зависит от импорта продуктов питания в общем объеме [112, 153]. В XXI веке наблюдается тенденция увеличения валовых сборов бахчевых культур в России [125]. Согласно Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации [88], утверждённой Указом Президента РФ от 21.01.2020 № 20, к 2030 году должен быть достигнут уровень самообеспеченности семенами полевых культур в 75%. Эта цель реализуется в рамках Государственной программы развития сельского хозяйства через задачи по модернизации семеноводства и повышению качества посевного материала. Известно, что улучшение качества посевного материала путем отбора семян с наибольшей массой позволяет увеличить урожайность плодов [10, 15, 119, 144].

Сепарация семян воздушным потоком является наиболее перспективной, поскольку не приводит к повреждению семян и при этом позволяет достаточно точно разделять их по массе [38, 85]. Однако, свободное перемещение семян в воздушном потоке приводит к потере качества в результате изменения площади миделевого сечения. В особенности это относится к семенам тыквенных культур, имеющих плоскую форму. Активные исследования аэродинамических свойств семян, прогнозирования их поведения в воздушном потоке и разработки новых конструкций сепараторов для минимизации данных рисков ведутся и зарубежными учеными [154, 155], что подчеркивает актуальность проблемы.

Одним из перспективных способов сепарации семян воздушным потоком является использование активной цилиндрической сепарирующей поверхности, которая ориентирует семена относительно направления воздушного потока, что существенно влияет на качество сепарации, однако тема требует дальнейшего исследования [50].

Степень разработанности темы исследования. Значительный теоретический вклад своими научными работами в изучение вопроса воздушной сепарации внесли: А.В. Бутовченко, В.П. Ермак, А.А. Ильченко, А.И. Нелюбов,

А.Л. Глушков, А.М. Любимов, А.И. Бурков, Петренко Д.И., В.Ф. Веденьев, А.М. Васильковский, Н.В. Пашинова, В.Г. Хамуев, Н.Л. Конышев, В.И. Исупов, В.Е. Саитов, Д.С. Булдаков, С.В. Корнеев, В.Л. Андреев, В.Н. Скоробогатых, другие ученые.

На основе проведенного анализа выполненных ранее исследований, отметим, что улучшения качества сепарации семян достигается ориентированием в воздушном потоке с использованием опорной поверхности, однако движение частицы внутри наклонного вращающегося цилиндра сепаратора с учетом действия силы присасывания требует дальнейшего изучения.

Цель исследования – повышение эффективности технологического процесса сепарации семян тыквенных культур путем разработки пневматического сепаратора с цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью, в которой семена удерживаются на внутренней поверхности за счёт совместного действия центробежной силы и вакуумного всасывания, что обеспечивает их ориентацию и управляемый отрыв по массе, на примере семян тыквы и огурца.

Гипотеза для достижения цели. Повышение эффективности технологического процесса сепарации семян тыквенных культур пневматическим сепаратором, которое достигается за счет ориентирования семян на цилиндрической опорной сепарирующей поверхности, что исключает хаотичное изменение миделевого сечения семян в процессе сепарации.

Связь работы с научными программами, планами. Работа над диссертацией велась в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова» на кафедре сельскохозяйственных машин с 2021 по 2026 год. Выполнение работы осуществлялось в соответствии с утвержденным индивидуальным планом аспиранта по теме «Повышение эффективности сепарации семян тыквенных культур пневматическим сепаратором с цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью». После заключения договора с Фондом содействия инновациям,

программа работ была расширена созданием эксплуатационного образца сепаратора для более эффективного внедрения и интенсификации технологии.

Задачи исследований:

- проанализировать текущее состояние сепарации семян и выявить возможности для улучшения технологии;
- предложить и обосновать схему пневматического сепаратора семян с цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью, обеспечивающего высокое качество разделения семян;
- теоретически обосновать параметры и формы деталей пневматического сепаратора семян с помощью метода конечных объемов в программе SolidWorks Flow Simulation и разработать математическую модель работы сепаратора;
- экспериментально подтвердить теоретические исследования и установить рациональные конструктивно-технологические характеристики сепаратора семян;
- изготовить опытный образец пневматического сепаратора семян, оценить его с точки зрения технико-экономической эффективности, предложить план по его успешному внедрению в сельское хозяйство Российской Федерации.

Объект исследования – технологический процесс сепарации семян тыквенных культур по массе, выполняемый новым пневматическим сепаратором с цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью.

Предмет исследования – закономерности технологического процесса сепарации семян тыквенных культур по массе, выполняемой новым пневматическим сепаратором с цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью.

Методы исследования – теоретические исследования проводились с использованием методов теоретической механики, аэродинамики и метода конечных объемов. При математическом моделировании процесса сепарации семян использовался модернизированный метод Ньютона. Результаты экспериментальных исследований проанализированы с использованием дисперсионного анализа для оценки значимости влияния факторов и адекватности математической модели.

Личное участие автора состоит в комплексном решении целей, поставленных при утверждении темы диссертации и договора с Фондом Содействия Инновациям. Проведен анализ текущего состояния сортировальной техники, в результате чего выявлен способ повышения качества сепарации, путем разработки технологии сепарации с ориентированием семени в рабочей поверхности. Был проведен патентный поиск, предложена новая схема сепаратора, разработана математическая модель движения семени в рабочем органе, изготовлена экспериментальная модель сепаратора, экспериментально подтверждены теоретические исследования и найдены рациональные, затем оптимальные параметры работы сепаратора. На базе лабораторного образца был разработан и изготовлен опытный образец сепаратора.

Достоверность и обоснованность работы достигалась за счет сочетания теоретических и экспериментальных исследований. Исследования опираются на стандартные методы оценки точности экспериментов. Измерительное оборудование – поверено, сертифицировано, тарировано под задачи исследований.

Научная новизна полученных результатов:

- обоснована математическая модель, которая позволяет определять угол отрыва семени от сепарирующей поверхности с учетом аэродинамической силы и силы вакуумного присасывания семян к отверстиям решета;
- получены результаты программного аэродинамического расчета для выбора рациональной формы камер разрежения пневматического сепаратора;
- выявлены рациональные конструктивно-технологические параметры пневматического сепаратора, учитывающие качественные показатели сепарации семян тыквенных культур;
- получены оптимальные конструктивно-технологические параметры пневматического сепаратора путем проведения многофакторного эксперимента по сепарации семян тыквы.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании физико-математической модели взаимодействия семян с

цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью под действием сил вакуумного присасывания, центробежной и аэродинамической, что расширяет теоретические основы процессов пневматической сепарации семян тыквенных культур. Полученные аналитические зависимости и результаты многофакторного эксперимента вносят вклад в развитие методологии проектирования сепарирующих рабочих органов на основе комплексного учёта конструктивных, технологических и физико-механических параметров семян.

Практическая значимость заключается в разработке конструкции пневматического сепаратора с цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью, позволяющей отобрать наилучшие семена для посева по комплексному признаку. Техническая новизна всех конструкторских решений при разработке сепаратора подтверждена патентом на изобретение №2822527 и патентом на полезную модель №237751 U1. Получены положительные отзывы о пневматическом сепараторе от компаний Луганской Народной Республики, таких как ГУП ЛНР «Агрофонд», ООО НПФ «Аэромех», ООО «Технаука». Заключен договор о финансировании научного проекта с федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» с целью интенсификации и дальнейшего использования в сельскохозяйственных организациях. Проект представлен на конкурсах-выставках на «Южный инновационный форум» (г. Ростов-на-Дону, 2024 г.), а также на платформе научного управления «Маяк» (г. Ставрополь, 2024 г.), где занял второе место в номинации «Новые приборы и интеллектуальные производственные технологии». На базе лабораторной установки изготовлен опытный образец сепаратора, получивший условное название ССБ-0,1, который представлен на выставке «День поля» на территории «Славяносербская сортоиспытательная станция» (Луганская обл., 2025). Результаты диссертационного исследования внедрены в производственный процесс крестьянского (фермерского) хозяйства «Аграрный дом «Агродар» (ЕГРЮЛ № 61140703, ОГРН 12294000068), что подтверждено Актом о внедрении (от 13

октября 2025 г.), подписанным представителями Луганского государственного аграрного университета и руководством хозяйства.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на ежегодных научных конференциях, проводящихся в ЛГАУ (2021-2025 г.); на XI Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Профессия инженер» (г. Орел, 2023 г.); на Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (г. Москва, 2023 г.); на конференции «Научные чтения, посвященные памяти академика Николая Васильевича Парахина» (г. Орел, 2023 г.); на всероссийском молодежном научном форуме, посвященном 45-летнему юбилею студенческого конструкторского бюро ФГБОУ ВО РГАТУ, «Молодежная наука для решения актуальных задач АПК» (г. Рязань, 2025 г.). Основные результаты научно-исследовательской работы использованы в учебном процессе на кафедре сельскохозяйственных машин Луганского ГАУ. Материалы диссертации применяются при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по дисциплине «Сельскохозяйственные машины» направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», что подтверждено Актом о внедрении в учебный процесс, одобренным на заседании кафедры (протокол № 3 от 08.10.2025 г.).

Личный вклад. В ходе работы над диссертацией автор самостоятельно:

- провел анализ патентов и накопленных литературных источников;
- разработал математическую модель работы сепаратора на основе схожих моделей;
- разработал и изготовил лабораторный пневматический сепаратор;
- провел экспериментальные исследования;
- обработал полученные данные и систематизировал их;
- изготовил опытный образец сепаратора;
- сформулировал практические рекомендации.

Публикации. Полученные результаты диссертационного исследования опубликованы в 18 научных работах, в изданиях, индексируемых в РИНЦ, трех

публикациях в издании рецензируемой ВАК Российской Федерации. Техническая новизна подтверждена патентом на изобретение и патентом на полезную модель.

Основные положения, выносимые на защиту:

- технологический процесс и конструкция пневматического сепаратора семян с использованием внутренней цилиндрической поверхности, обеспечивающий ориентирование семян на ней;

- математическая модель движения семени во внутренней цилиндрической поверхности пневматического сепаратора, позволяющая прогнозировать угол отрыва семени от поверхности в зависимости от его физико-механических свойств, для оптимизации конструкции и режимов работы;

- результаты экспериментальных исследований, обосновывающие оптимальные рабочие параметры разработанного пневматического сепаратора, подтверждающие эффективность предложенного технологического процесса;

- расчеты, подтверждающие экономическую эффективность внедрения пневматического сепаратора в технологический процесс подготовки посевного материала.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации включает введение, пять глав, заключение и список литературы. Объем работы составляет 154 страницы машинописного текста, в том числе 16 таблиц, 91 рисунков, список из 157 источника литературы и 12 приложений.

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СЕПАРАЦИИ СЕМЯН ТЫКВЕННЫХ КУЛЬТУР, ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА

1.1 Роль сепарации в эффективности возделывания сельскохозяйственных культур

Основной задачей послеуборочной доработки семян является доведение их до кондиций продовольственного или семенного назначения [29, 30, 33], при этом затрачивая на процесс меньшее количество энергии и времени и сохраняя необходимое количество семян.

Одним из способов определения рентабельности возделывания сельскохозяйственных культур [107], что выражается в затратах и прибыли, является критерий — отношение энергии, аккумулированной растением, к израсходованной на его выращивание. При подсчете затрат энергии в совокупности учитываются основные средства производства (тракторы, с.-х. машины, орудия), оборотные средства производства и трудовые ресурсы.

Среди путей повышения рентабельности возделывания важное место занимает создание высокоэффективных сепарирующих машин и модификация существующих. Учитывая достоинства и недостатки технологий, необходимо оценивать текущее состояние машинного комплекса, используемого на всех этапах сепарации.

Совершенствование технологий для подготовки посевного материала сокращает расходы за счет внедрения машин с меньшей энергоемкостью и материалоемкостью, и более качественным отбором семян с лучшими посевными свойствами. Заключенная в семенах энергия расходуется более рационально. Семена высокого качества обладают большей силой начального роста, лучшей жизнеспособностью всходов, они устойчивы к вредителям и болезням. Полученный урожай имеет значительно лучшие показатели. Такой продукт

дольше хранится, лучше находит сбыт и на его переработку уходит меньше энергии.

Исследователями были изучены основные факторы, влияющие на всхожесть посевного материала [28, 132]. К ним относится травмирование, плотность, размер, размещение семени в растении. Крупность семян, выраженная в массе, обычно характеризуется показателем массы тысячи семян. На них могут влиять погодные условия, технология выращивания, сбор урожая, спелость самого растения. Недозревшие семена бахчевых культур имеют большее количество оболочки, а также больше воздушных пустот, поэтому масса тысячи таких семян меньше, чем у кондиционных семян.

Интегральным показателем качества семян, экологических условий и эффективности агротехники является полевая всхожесть. Полевая всхожесть – это процент всходов от количества высеянных всхожих семян.

А.А. Мусиенко была изучена связь между массой 1000 семян и полевой всхожестью: с увеличением массы 1000 семян с 7 до 15 г увеличивается всхожесть с 75 до 98% [84] (рисунок 1.1).

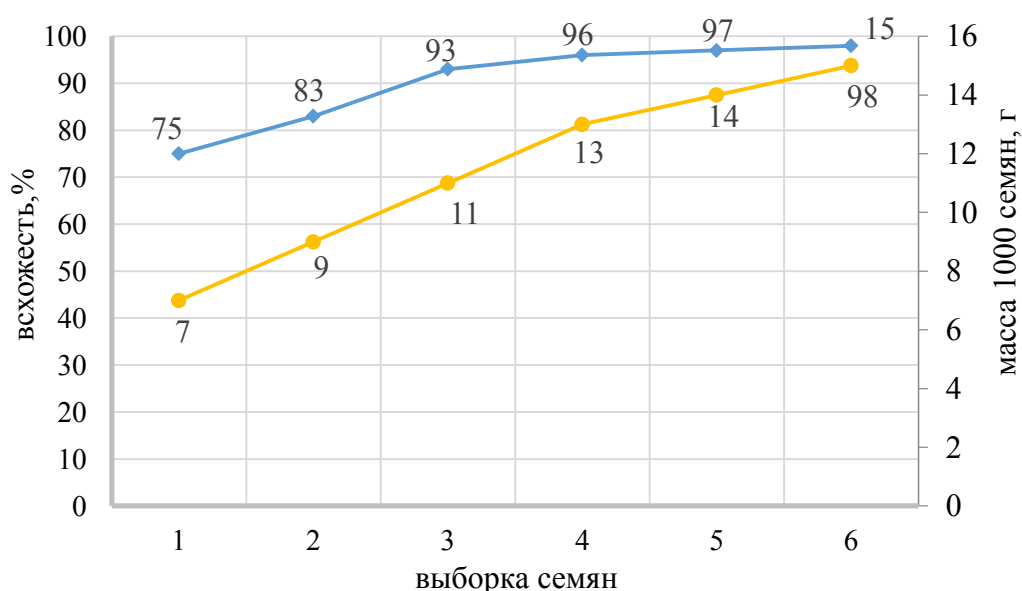
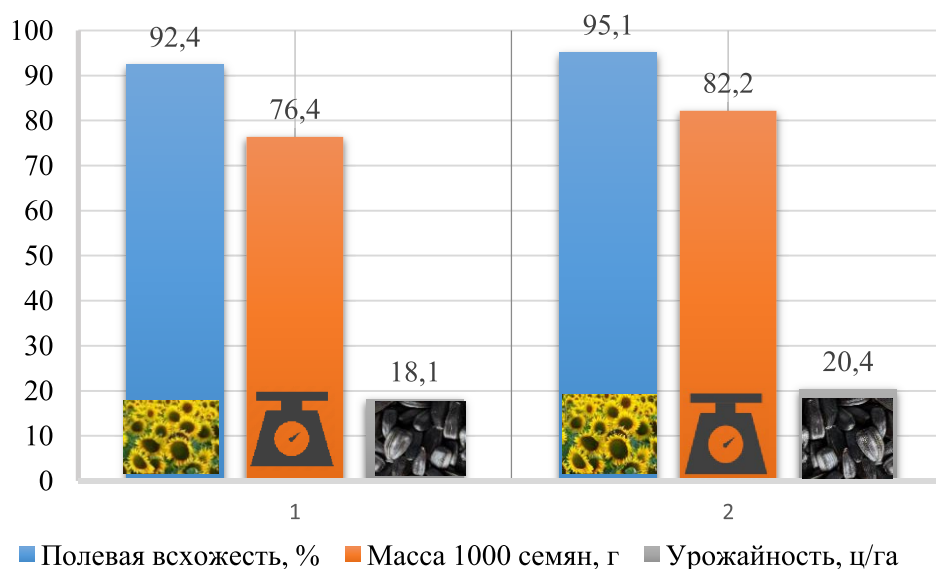


Рисунок 1.1 – Влияние массы 1000 семян на показатели полевой всхожести сахарной свеклы

Г.О. Жатова в своих опытах [45] проводила отбор из крупных, более плотных семян подсолнечника, что увеличило массу 1000 семян с 76,5 до 82,2 г и урожайность с 18,1 до 20,4 ц/га (рисунок 1.2).



1 – семена отобраны по крупности, 2 – семена, отобранные по плотности

Рисунок 1.2 – Влияние массы 1000 семян на показатели полевой всхожести и урожайности семян подсолнечника

Важную роль сепарация играет и в борьбе с сорняками. Не существует универсального средства избавления от сорняков. Этот процесс необходимо решать комплексно. Он состоит из множества методов, один из которых — это предупреждение. Очистка семян культурных растений от семян сорных — важный технологический метод борьбы с сорняками. Также нельзя забывать, что это впоследствии способствует экономии средств, затраченных на химикаты, с целью борьбы с сорными растениями [83].

1.2 Анализ состояния сепарации семян тыквенных культур с целью отбора биологически ценных семян

Сепарацию семян тыквы проводят по признакам, представленным на рисунке 1.3: по ширине – на вращающихся цилиндрических вибрационных решетках с круглыми или плоскими отверстиями; по толщине и длине – на цилиндрических и дисковых триерах с внутренними ячейками. Также применяется сепарация по критической скорости витания и аэродинамической силе на пневматических сепараторах.

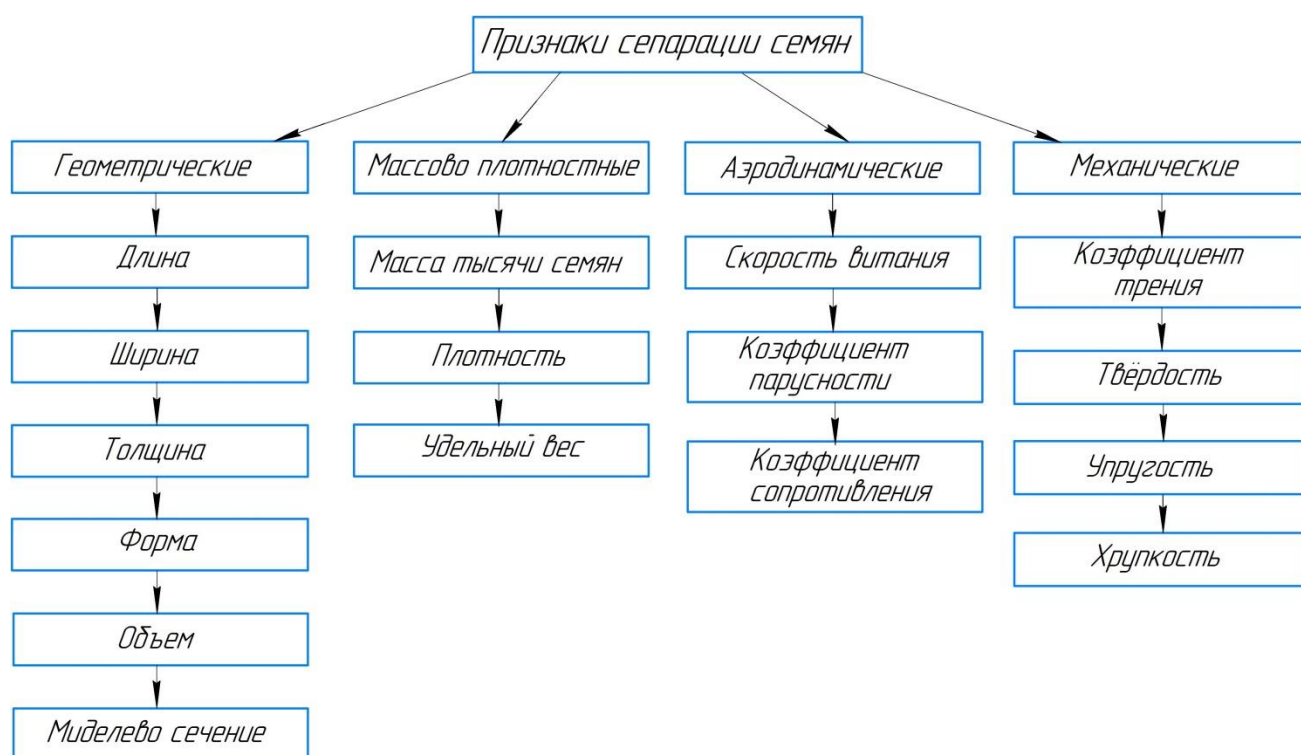


Рисунок 1.3 – Классификация признаков для сепарации семян

Первичную очистку проводят на воздушно-решетных машинах: ОВ-10, ОВП-20А, ОСМ-3У, «Petkus» 218/1, «Petkus» К531/1 (Германия), ОСВ-10, ОС-4,5, К 212, ВС-2, ОС-1. Механическая сортировка семян на металлических решетках приводит к их повреждению, это негативно сказывается на всхожести, потому целесообразно использовать для сортировки воздушный поток. Любое тело, попадая в воздушный поток, испытывает давление движущегося воздуха.

Свойство тел сопротивляться этому давлению называется коэффициентом парусности, который чаще всего определяется по скорости витания [17]. Величина давления на семя зависит от площади его проекции, перпендикулярной направлению воздушного потока, а также его формы и размера. У неориентированных семян в воздушном потоке из-за изменения положения по направлению к потоку воздуха будет меняться парусность, из-за этого одинаковые по всем параметрам семена могут относиться потоком воздуха на разное расстояние, что существенно снижает качество сепарации таких плоских семян, как семена тыквы. Количество семян, отсортированного воздушным потоком за единицу времени, зависит от скорости его подачи, этот параметр сепараторов называют производительностью.

Конструктивную основу пневматических сортировальных столов формируют два ключевых элемента: вибрирующая дека и воздуходувная установка. Дека представляет собой жесткий каркас из металла, оснащенный натянутой проволочной сеткой с ячейками. Ее рабочая поверхность ориентирована с двойным углом наклона: продольным (до $8,5^\circ$) и поперечным (до $5,5^\circ$). Под декой расположена герметичная камера, куда вентилятор нагнетает воздушный поток. Интенсивность потока регулируется шиберной заслонкой до достижения режима «псевдооживления» (кипящего слоя) сепарируемого материала.

Привод эксцентрикового вала, управляемый вариатором, сообщает деке возвратно-поступательные колебания. Семенная масса, поступающая из питателя на верхнюю зону стола, под комбинированным воздействием аэродинамических сил и вибрации подвергается стратификации по плотности. В результате гравитационного расслоения наблюдаем:

- 1) тяжелые фракции концентрируются у основания деки (зона схода);
- 2) средние по плотности компоненты транспортируются в средний лоток;
- 3) легкие примеси и щуплые семена вытесняются воздушным потоком к периферийным выводам.



Рисунок 1.4 – Пневматический сортировальный стол ПСС-1



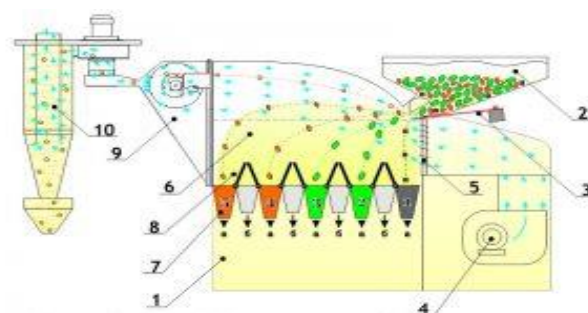
Рисунок 1.5 – Классификация пневматических сортировальных столов

К недостаткам пневматических сортировальных столов можно отнести высокую материалоемкость и сильную вибрацию при работе. На качество сепарации негативно может повлиять большое количество показателей, в особенности, если семена отличаются по размерным характеристикам. Так же пневматическим сортировальным столам свойственна неравномерность воздушного потока, при работе на различных сельскохозяйственных культурах, это не обеспечивает требуемого качества разделения семян и примесей.

Сепаратор САД-20 [97], представленный на рисунке 1.6, находит применение в фермерских хозяйствах различного масштаба. Ключевыми достоинствами модели выступают простота конструкции, облегчающая техническое обслуживание, способность эффективно сепарировать материал с высокой степенью загрязненности при низком энергопотреблении, а также наличие циклона для улавливания мелкодисперсных примесей и пыли.



а)

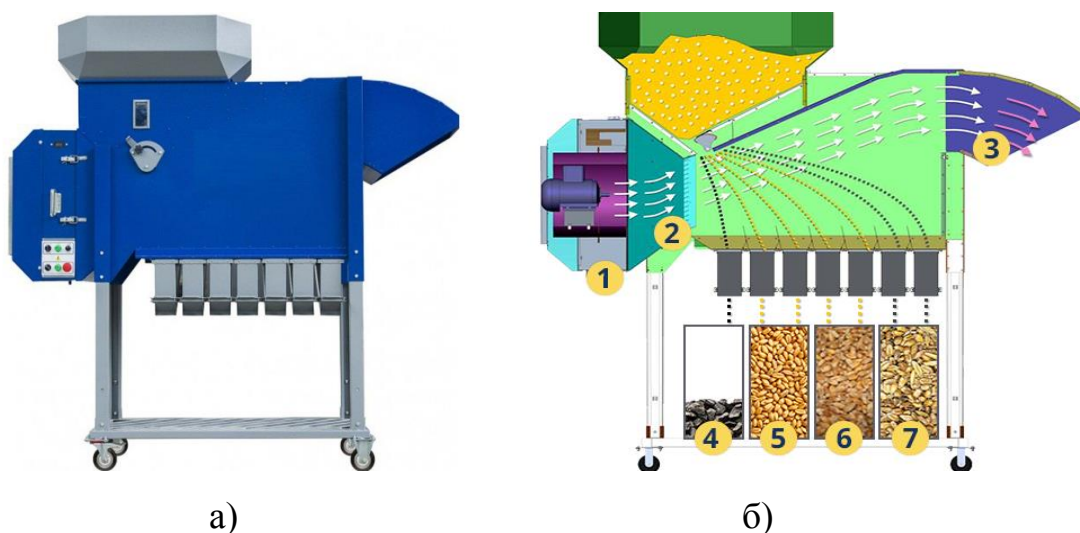


б)

а) внешний вид, б) схема работы сепаратора: 1 – базовый модуль; бункер-питатель; 3 – вибродоток; 4 – главный вентилятор; 5 – струйный генератор; 6 – рабочая камера; 7 – сборник фракций семян; 8 – поворотные шторки с фиксирующим устройством; 9 – блок аспирации; 10 – циклон

Рисунок 1.6 – Горизонтальный воздушный сепаратор САД-20

Аэродинамический сепаратор АСМ-5, представленный на рисунке 1.7, производится в России в Белгороде в ООО «Золотая Нива». Сепарируемый материал подается в бункер, затем в воздушный поток, в котором распределяется по весу.



- а) внешний вид, б) схема работы сепаратора: 1 – панель управления;
 2 – поток воздуха; 3 – отработанный воздух; 4 – камни, тяжелый мусор;
 5 – калиброванные семена, посадочный материал; 6 – товарное зерно;
 7 – фуражное зерно

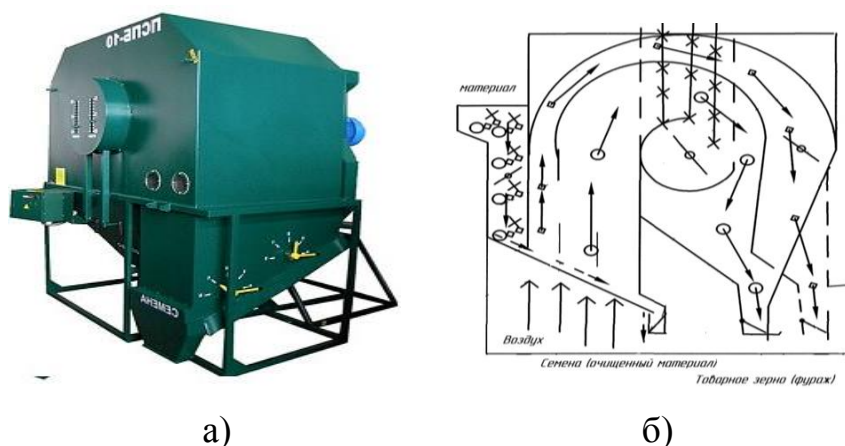
Рисунок 1.7 – Горизонтальный воздушный сепаратор АСМ-5

Сепараторы АСМ оснащены частотным преобразователем, который позволяет запускать электродвигатель очень плавно, без скачков напряжения. На валу электродвигателя закреплены крыльчатки вентилятора, они подают струю воздуха через дефлекторы в камеру очистки. Решетка дефлектора установлена таким образом, что в камере очистки воздушный поток имеет одинаковое разрежение.

Основным минусом данных сепараторов является то, что в процессе сепарации семена могут изменять площадь, на которую действует воздушный поток, что негативно сказывается на качестве сепарации.

Вертикальный сепаратор модели ПСПБ-10 российского производства (Республика Татарстан), представленный на рисунке 1.8, предназначен для заключительного этапа очистки семян широкого спектра сельскохозяйственных культур, включая зерновые, колосовые, зернобобовые, крупяные, а также подсолнечник, кукурузу, рапс и сорго. Конструкция агрегата предусматривает возможность его передвижения, а для оптимизации процесса сепарации он оснащен специальными поворотными барьерами. Эти барьеры, установленные на

наклонной поверхности сепарирования, способствуют эффективному распределению и расслоению обрабатываемого материала. В результате работы сепаратор производит разделение семян на три четко выраженные фракции по массе, причем наиболее тяжелая из них (третья фракция) отбирается в качестве высококачественного посевного материала.



а) внешний вид; б) схема работы сепаратора

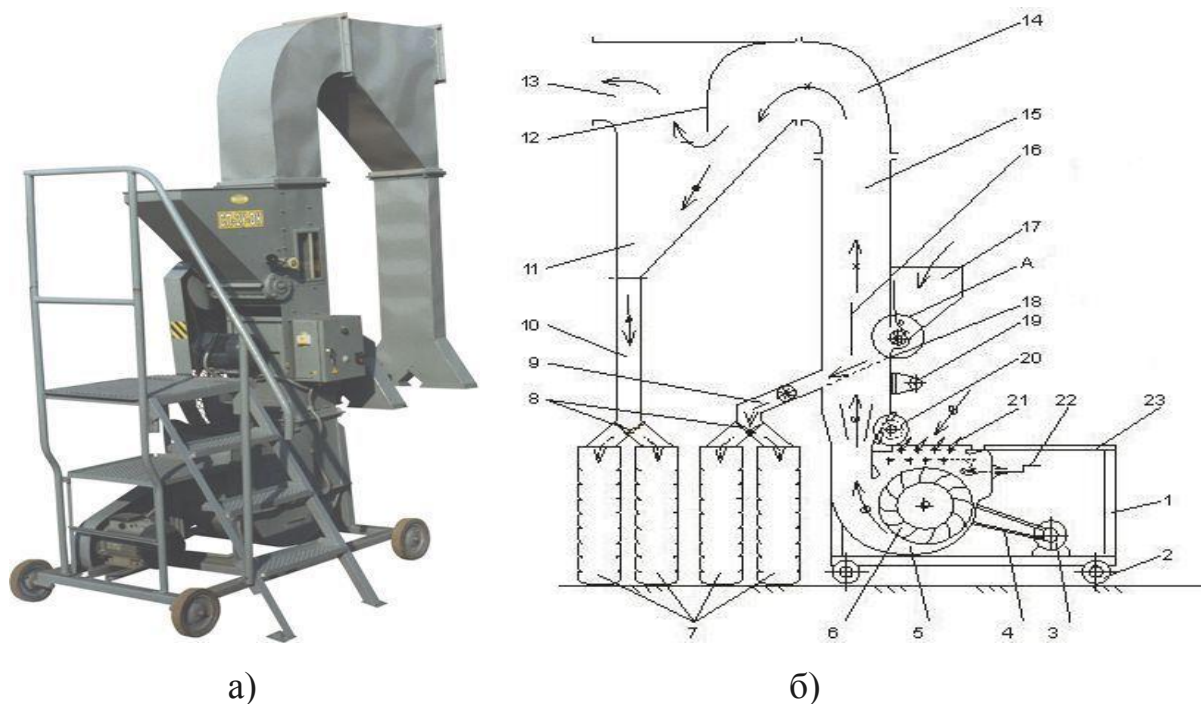
Рисунок 1.8 – Вертикальный сепаратор ПСПБ-10

При работе сепарируемый материал, как и в случае горизонтальных аэродинамических сепараторов, движется хаотично в воздушном потоке, что негативно сказывается на качестве разделения из-за изменения площади миделевого сечения материала в зависимости от его расположения, что может приводить к нестабильности определения скорости витания.

При накоплении на поверхности сетки материала слоем больше 20 мм, сетка плохо продувается. Ограничена возможность интенсификации сепаратора, увеличение производительности производится за счет увеличения размера конструкции.

Пневмосепаратор СП-2У-ОК (рисунок 1.9), производится в России в ГУ Зональном НИИСХ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого. Применяется для очистки семян злаковых и бобовых культур, а также семян других трав и овощей в конечной операции процесса очистки.

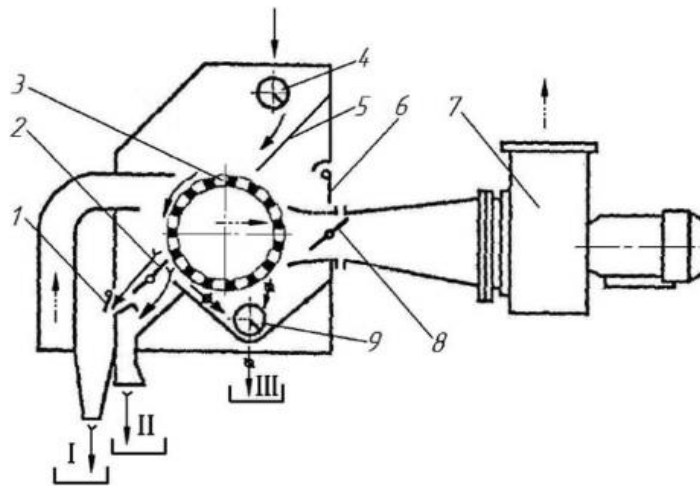
Скорость подачи материала в сепаратор регулируется путем перемещения заслонки вибратора приемного бункера. Скорость воздушного потока в пневмосепарирующем канале изменяют регулировкой жалюзи дроссельного устройства диаметрального вентилятора, а также изменением частоты вращения вентилятора.



- а) внешний вид; б) схема: 1 – основание; 2 – колесо; 3 – электродвигатель привода вентилятора; 4 – ремень; 5 – диаметральный вентилятор; 6 – колесо диаметрального вентилятора; 7 – мешки; 8 – переключатели потока материала; 9 – патрубок вывода очищенного материала со шлюзовым затвором; 10 – патрубок вывода легких примесей; 11 – осадочная камера; 12 – отражательная перегородка; 13 – окно выхода отработанного воздушного потока; 14 – колено; 15 – пневмосепарирующий канал; 16 – разделительная перегородка; 17 – бункер-питатель с заслонкой-вибратором и питающим валиком; 18 – сменная опорная сетка; 19 – электродвигатель привода шлюзового затвора и питающего валика; 20 – контрпривод шлюзового затвора и питающего валика; 21 – жалюзи поворотные; 22 – рукоятка тяги открытия жалюзи; 23 – площадка обслуживания

Рисунок 1.9 – Пневмосепаратор СП-2У-ОК

Центробежно-пневматический сепаратор ЗАВ-40-02.000, представленный на рисунке 1.10, производился в СССР для зерноочистительного комплекса. Сепаратор используется для вторичной очистки семенного материала. Сепарация производится под действием центробежной силы, от вращения барабана и от аэродинамической силы, притягивающей семенной материал к барабану. Чистоту очищенного материала регулируют положением делителя, скоростью воздушного потока и подачи материала [34].



- 1 – заслонка; 2 – делитель; 3 – сетчатый барабан; 4 – подающее устройство;
 5 – скатная доска; 6 – заслонка стабилизатора; 7 – вентилятор;
 8 – регулировочная заслонка; 9 – шнек отходов

Рисунок 1.10 – Центробежно-пневматический сепаратор ЗАВ-40-02.000

Преимуществом данного сепаратора является то, что семена на барабане ориентируются относительно воздушного потока, что положительно влияет на качество сепарации. Также подобная конструкция имеет возможные пути для интенсификации сепарации. Недостатком установки является то, что воздушный поток проходит через всю площадь сетчатого барабана, что увеличивает аэродинамическое сопротивление. К тому же для барабана свойственно нестабильное движение семян по сетчатой поверхности. Классификация перечисленных пневматических сепараторов представлена на рисунке 1.11.

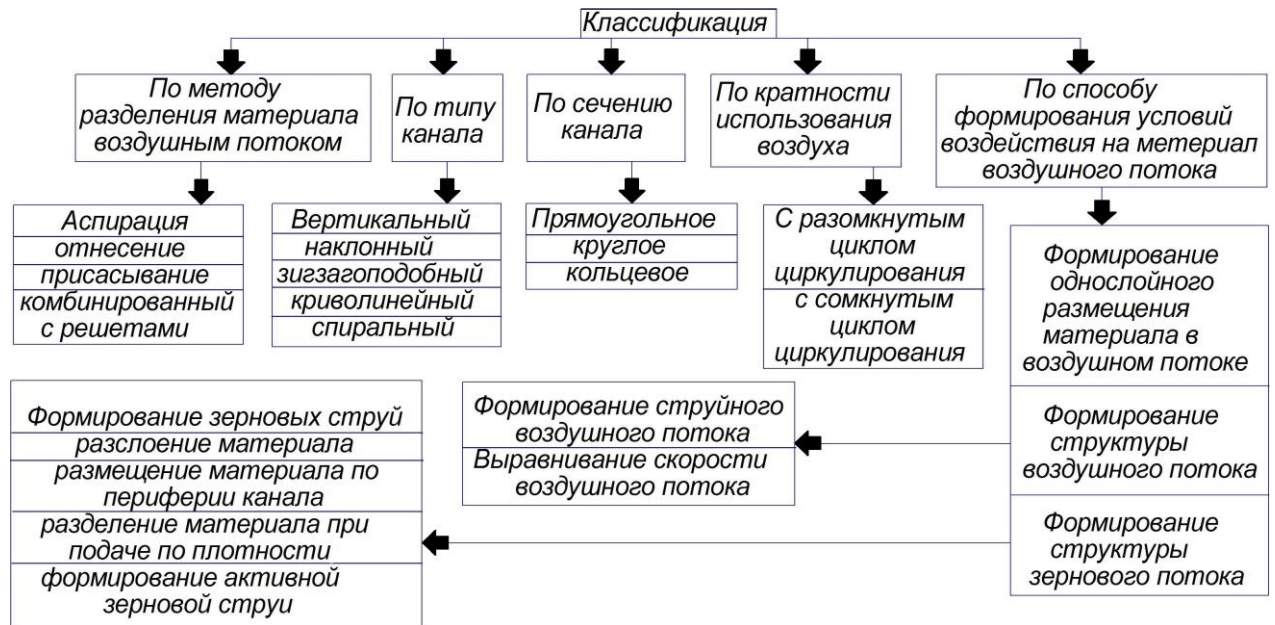
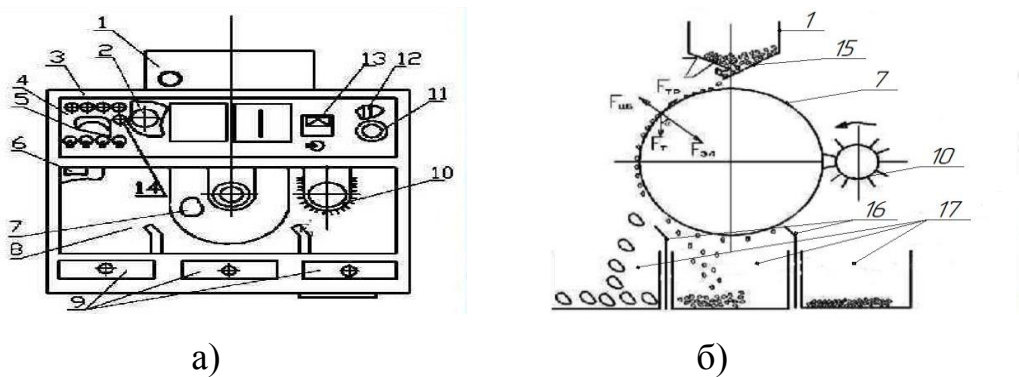


Рисунок 1.11 – Классификация пневматических сепараторов

Диэлектрический сепаратор СДЛ-1, представленный на рисунке 1.12, производится в России «Кропоткинским заводом МиССП» в Краснодарском крае. Так же используется для разделения зерновых культур по разнице в их электропроводности.



- а) схема устройства; б) схема работы: 1 – бункер; 2 – электродвигатель;
 3 – корпус; 4 – панель управления; 5 – мотор-редуктор; 6 – конечный выключатель; 7 – барабан; 8 – защитные стекла; 9 – кассеты; 10 – щетка;
 11 – автотрансформатор; 12 – высоковольтный трансформатор; 13 – вольтметр;
 14 – кнопка реверсирования загрузочного валика; 15 – загрузочный валик;
 16 – перегородки; 17 – приемные устройства

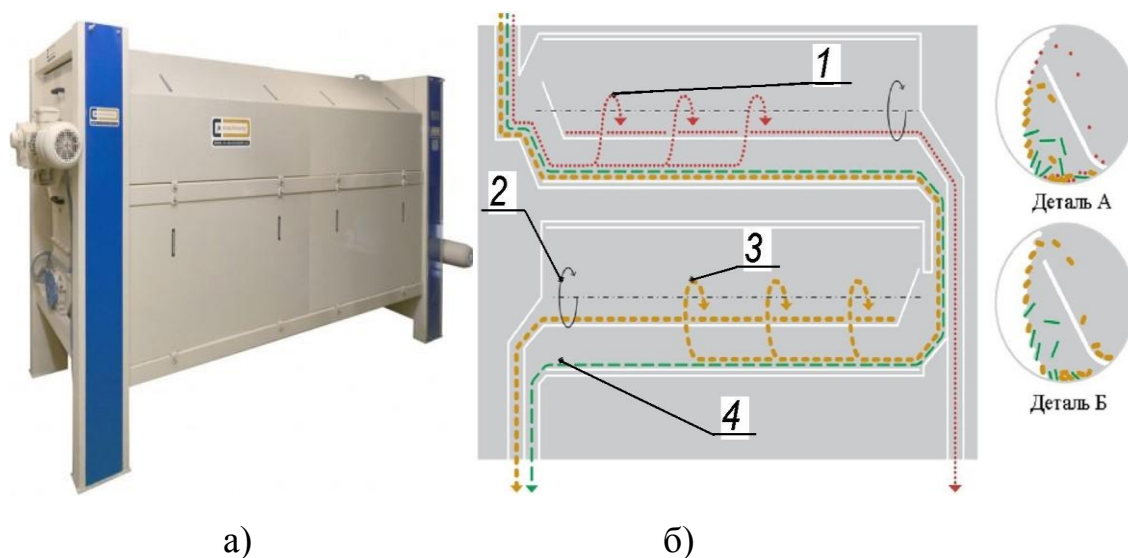
Рисунок 1.12 – Диэлектрический сепаратор СДЛ-1

Данные сепараторы прошли государственные испытания и серийно выпускались [122, с. 9]. К недостаткам такого типа сепараторов относится опасность поражения электрическим током. Так же на качество электрической сепарации влияет влажность сепарируемого материала. Однако главным минусом в сепарации подобными устройствами семян является низкая производительность, по этой причине применение диэлектрических сепараторов для данной цели изучено недостаточно хорошо. Классификация диэлектрических сепараторов представлена на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 – Классификация диэлектрических сепараторов

Цилиндрические триеры JCT, представленные на рисунке 1.14, производятся на заводе JK Machinery в Праге, Чехии. Используются для удаления примесей и нечистот, которые отличаются по форме (длине) от главного потока материала.



а) внешний вид; б) схема работы устройства: 1 – короткие примеси; 2 – движение рабочего органа; 3 – главный продукт; 4 – длинные примеси

Рисунок 1.14 – Цилиндрический триер JTC 415 RL

К достоинствам цилиндрических триеров относится модульная конструкция, позволяющая менять местами рабочие органы и соединять под новые требования, к примеру, для увеличения производительности. Приемные лотки регулируются удобно под конкретные требования сортировки. Триеры просты и недороги в обслуживании и потребляют не много электроэнергии.

К недостаткам таких цилиндрических триеров можно отнести то, что увеличение производительности чаще всего достигается только путем увеличения габаритов рабочих органов. Ячеистое полотно быстро изнашивается, приемные лотки необходимо часто перенастраивать в зависимости от влажности сепарируемого материала.

Сравнительная многокритериальная оценка рассмотренных машин для очистки и сепарации проводится на основе их заявленных параметров с использованием установленной методики и формул [23, 130, с. 33], посчитана на основе параметров выбранной техники в таблице 1.1.

Удельные показатели материалоемкости M_y , кг·ч/т находили по известной формуле:

$$M_y = \frac{M}{Q}, \quad (1.1)$$

где M – вес сепаратора, кг;

Q – производительность сепаратора, т/ч.

Удельная энергоемкость $\mathcal{E}_y$, кВт·ч/т находится по известной формуле:

$$\mathcal{E}_y = \frac{N}{Q}, \quad (1.2)$$

где N – потребляемая мощность сепаратора, кВт.

Коэффициент сложности настройки находится по формуле:

$$K_p = n, \quad (1.3)$$

где n – количество регулируемых параметров, необходимых для получения качественного разделения.

Таблица 1.1 – Техническая характеристика представленных сепараторов

Тип конструкции	Пневматические						Триер	Электро-сепаратор
Поступление разделяющего агента	Нагнетание воздуха	Всасывание воздуха	Нагнетание воздуха	Нагнетание воздуха	Нагнетание воздуха	Нагнетание воздуха	отсутствует	Электрический разряд
Марка	ПСС-1	ЗАВ-40-02.000	ПСПБ-10	СП-2У-ОК	САД-20	АСМ-5	ЛТС-415 RL	СДЛ-1
Q , т/ч	1	20	10	2	10	3	1,5	0,01
N , кВт	3,75	6,6	24	2,75	7,8	0,6	1,5	0,25
m , кг	500	450	1096	251	828	135	750	50

Одним из критериев в удобстве эксплуатации является количество необходимых регулировок машины для очистки и сортировки, и для достижения рациональных показателей производительности, и качества разделения сепарируемого материала. Рассмотрим приведенные модели сепараторов с точки

зрения сложности регулировки (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Основные регулируемые параметры сравниваемых сепараторов

Марка сепаратора	Регулируемые параметры												
	Скорость воздушного потока, м/с	Подача материала, кг/с	Приемники фракций	Пылеуловитель, ротаметр, об/мин.	Установка в ПСК сменной сетки	Углы наклонов поворотных барьеров в ПСК, град	Поперечный угол наклона деки, град	Продольный угол наклона деки, град	Частота колебаний деки, кол/мин	Амплитуда колебаний деки, мм	Частота вращения барабана, об/мин	Электрическое поле	Всего параметров, п
САД-20	+	+	+	+									4
СП-2У-ОК	+	+			+								3
ПСПБ-10	+	+			+	+							4
ПСС-1	+	+	+		+		+	+	+	+			8
ЗАВ-40-02.000	+	+	+								+		4
СДЛ-1		+	+								+	+	4
АСМ-5	+	+	+	+									4
JTC-415 RL		+	+					+			+		4

Полученные значения параметров сепараторов введены в сравнительную таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Эксплуатационная характеристика представленных сепараторов

Марка	ПСС-1	ЗАВ-40-02.000	ПСП Б-10	СП-2У-ОК	САД-20	АСМ-5	JTC-415 RL	СДЛ-1
$\mathcal{E}_y$	3,75	0,33	2,4	1,38	0,78	0,2	1	25
M_y	500	22,5	109,6	125,5	82,8	45	500	5000
K_p	8	4	4	3	4	4	4	4
$\mathcal{E}_y^{норм}$	18,75	1,65	12	6,9	3,9	1	5	125
$K_p^{норм}$	2,67	1,33	1,33	1	1,33	1,33	1,33	1,33
$M_y^{норм}$	22,22	1	4,87	5,58	3,68	2	22,22	222,22

Марка	ПСС-1	ЗАВ-40-02.000	ПСП Б-10	СП-2У-ОК	САД-20	АСМ-5	ЖТС-415 RL	СДЛ-1
$S_n, \text{мм}^2$	227,77	2,24	35,02	22,08	10,58	2,59	63,78	12227,98
μ_0	175,21	1,72	26,94	16,98	8,18	1,99	49,06	9406,14

По полученным нормированным параметрам рассмотренных сепараторов получена многокритериальная оценочная модель (рисунок 1.15).

Сепаратор СДЛ-1 не отображаем в виду того, что его показатели энергоемкости и материалоемкости многократно превышают значения аналогов.

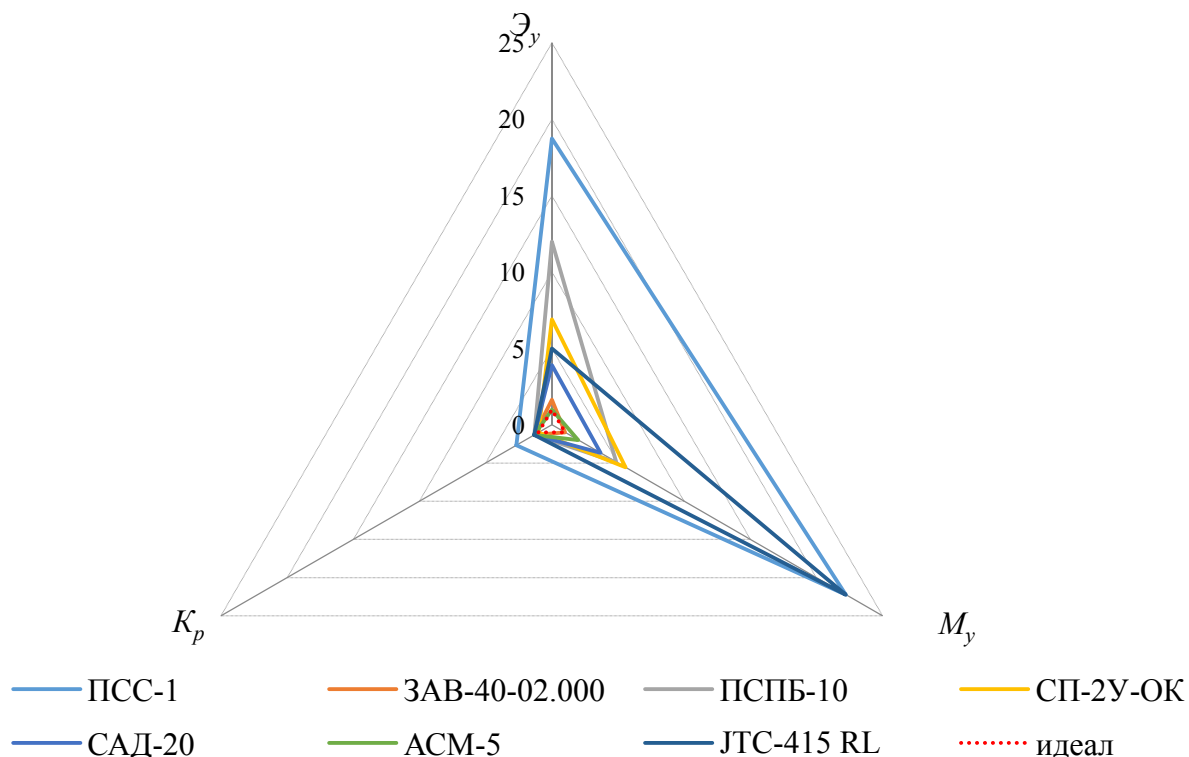


Рисунок 1.15 – Многокритериальная оценочная модель рассматриваемых сепараторов

Пользуясь методом определения расстояния к цели на осях 1, 2, 3, отложим значение данных критериев и, соединив точки, получим треугольники, определим и сравним их площади с построенным треугольником идеального варианта. Оцениваемый метод находится по формуле:

$$\mu_o = \frac{S_n}{S_o} \geq 1, \quad (1.4)$$

где S_n, S_o – площадь n -го и оптимального многоугольника, м^2 .

Сведем данные показатели к одинаковым числовым значениям, пользуясь правилом нормирования критериев, когда определенный критерий улучшается уменьшением: $M_y^{\text{норм}}, \mathcal{E}_y^{\text{норм}}$:

$$u_{in}^{\text{норм}} = \frac{u_{in}}{u_{ionm}}, \quad (1.5)$$

где u_{ionm} – критерий оптимального варианта.

По результатам многокритериального анализа рассмотренных сепараторов наиболее приближенную оценку к идеалу получил пневмоцентробежный сепаратор ЗАВ-40-02.000 ($\mu = 1,72$). Это показывает актуальность разработки пневматического сепаратора с цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью.

1.3 Анализ исследований ученых в области сепарирования

При разработке и внедрении новых машин невозможно обойтись без трудов ученых, чьи достижения близки по направлению к текущему проекту. Академик Горячкин В.П., являясь основоположником науки сельскохозяйственной техники, разработал принципы взаимодействия частиц с воздушным потоком, объяснив механизмы разделения зерновых смесей по аэродинамическим свойствам. Его достижения стали фундаментом теории для дальнейших исследований воздушной сепарации.

Значительный теоретический вклад своими научными работами в изучение вопроса воздушной сепарации внесли: П.М. Заика [48], Б.И. Котов [63], Л.М. Тищенко [127], В.П. Ермак [42, 43], А.А. Ильченко [49], С.С. Ямпиров [141, 142], Нелюбов А.И. [85], Ветров Е.Ф., Любимов А.М., Матвеев А.С. [81], Кожуховский И.Е. [57], Н.Г. Гармаш [25], Н.П. Сычугов [120], А.И. Бурков [12],

Н.Н. Петренко [104], Петренко Д.И. [103], В.Ф. Веденьев [21], Васильковский А.М. [20], Н. В. Пашинова [102], Дринча В.М. [39], И.Ш. Тавтилов [121], Герасименко С. А. [26], Жигжитов А.О. [46], Хамуев В.Г. [133], Конышев Н.Л. [59], Рощин О.П. [109], Гусев С.И. [35], Исупов В.И. [53], Глушков А.Л. [27], Сайтов В.Е. [110], Булдаков Д.С. [11], Шабалин А.М. [135], Корнеев С.В. [60], Андреев В.Л. [3], Скоробогатых В.Н. [114] и др.

Анализируя разные виды машин воздушной сепарации семян, проблемой сепараторов, которые не ориентируют семена в воздушном потоке, является изменение значения площади миделевого сечения семян, что исключается при сепарации машинами с рабочей поверхностью, ориентирующей семена в воздушном потоке.

Основной вклад в развитие машин и теории сепарации семян в электрическом поле диэлектрическими сепараторами разработали ученые: Тарушкин В.И. [122, 123], Ниязкулов В.Г., Бурлаков Р.Х., Хайретдинов В.С., Будзко И.И. [9], В.В. Леонов [76], Б.И. Шихсаидов [137], Шмигель В.В. [139], Угловский А.С. [129], Стерхова Т.Н. [117], Ниязов А.М. [87], Качеишвили С.В. [55], Арнольд А. Э. [4], Козлов А.П. [58], Лубников С.И. [78], Кривов С.А. [64], Шихов Н.В. [136], Осинцев Е.Г. [90] и др. Стоит также уделить внимание фундаментальным исследованиям зарубежных учёных, например, Harmond J. E. [149, 150, с. 32], где подробно изучено влияние влажности семян на сепарацию, напряжение поля и параметры оборудования. Описаны принципы работы сепараторов, траектории движения семян в электростатическом поле, результаты тестов всхожести. Исследователи Abdel-Salam M. [143], Basiry M. [146], Wang J. [157], существенно дополнили знания о влиянии геометрию поля и электростатических факторов на диэлектрическую сепарацию.

Рассмотрим движение материала внутри вращающегося цилиндра по Василенко П.М. [18, с. 219], он учитывал центробежную силу, трения и тяжести, после чего получил дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} mr\psi'' &= fN - mg \sin \psi; \\ N &= mr\psi'^2 + mg \cos \psi, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где mg – сила тяжести;

$mr\psi'^2$ – центробежная сила;

ψ – угловое перемещение частицы в абсолютном движении;

fN – сила трения.

Вычитание нормальной реакции N рассматривается в момент отрыва материала от поверхности, когда центробежная сила и сила трения становятся равными силе тяжести.

Исключая из уравнения нормальную реакцию N , он получил условие отрыва материала от внутренней поверхности цилиндра при $N = 0$, при этом угол отрыва φ [18, с. 220] находится из уравнения:

$$r\psi'' = f(g \cos \psi + r\psi'^2) - g \sin \psi \quad (1.2)$$

или

$$\frac{d\psi'^2}{d\psi} - 2f\psi'^2 = -\frac{2g}{r} \cdot \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\cos \varphi}, \quad (1.3)$$

где φ – угол трения.

Данные уравнения описывают процесс перемещения тела по внутренней поверхности цилиндра (рисунок 1.16), но без учета сил прижатия к поверхности, которые используются в сепарации.

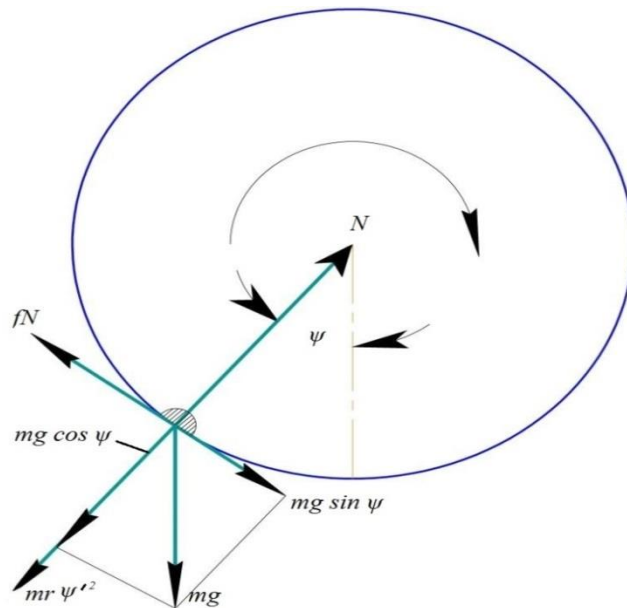


Рисунок 1.16 – Схема сил действующих на семя во вращающейся цилиндрической поверхности

После преобразований он получил уравнение:

$$\cos \varphi \cdot \cos \psi + 2 \cos \varepsilon \cos(\psi - \varphi - \varepsilon) = 2e^{2f\psi} \cos \varepsilon \cos(\varphi + \varepsilon). \quad (1.4)$$

Решение этого трансцендентного уравнения и дает значение угла отрыва материала от поверхности цилиндра. В то время наиболее удобно было воспользоваться графическим методом решения такого уравнения [93].

Пересечение данных графиков функций дает угол отрыва материала от поверхности цилиндра $\psi = \psi_1$ на рисунке 1.17.

$$y_1 = \cos \varphi \cdot \cos \psi + 2 \cos \varepsilon \cos(\psi - \varphi - \varepsilon) \quad (1.6)$$

и

$$y_2 = e^{2f\psi} \cos \varepsilon \cos(\varphi + \varepsilon). \quad (1.7)$$

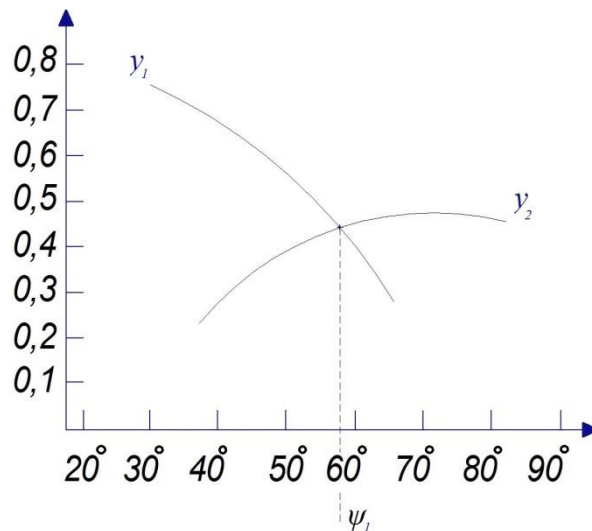


Рисунок 1.17 – Графики функции для нахождения угла отрыва

Очевидно, что значение угла отрыва будет отличаться при разном коэффициенте трения f . При любом изменении коэффициента трения в условии эксперимента необходимо построение нового графика.

Так как сила сопротивления воздуха пропорциональна квадрату скорости, то ее можно представить в виде:

$$f(v) = kv^2 = kr^2\psi'^2. \quad (1.8)$$

Тогда дифференциальные уравнения движения материала по внутренней поверхности цилиндра будут решаться с учетом внешней среды и будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} mr\psi'' &= fN - mg \sin \psi - kr^2\psi'^2; \\ N &= mr\psi'^2 + mg \cos \psi. \end{aligned} \quad (1.9)$$

В рассмотренных уравнениях предполагается, что цилиндр расположен горизонтально и материал движется в плоскости, перпендикулярной к оси вращения. Однако в некоторых конструкциях сепараторов цилиндр может быть расположен под углом относительно горизонта (рисунок 1.18).

В таком случае значение геометрических параметров положения семени в точке А выражается в функции от угла наклона цилиндра α и угла поворота β .

Угол α для данного цилиндра постоянный и параметры положения семени будут функциями одного только угла β .

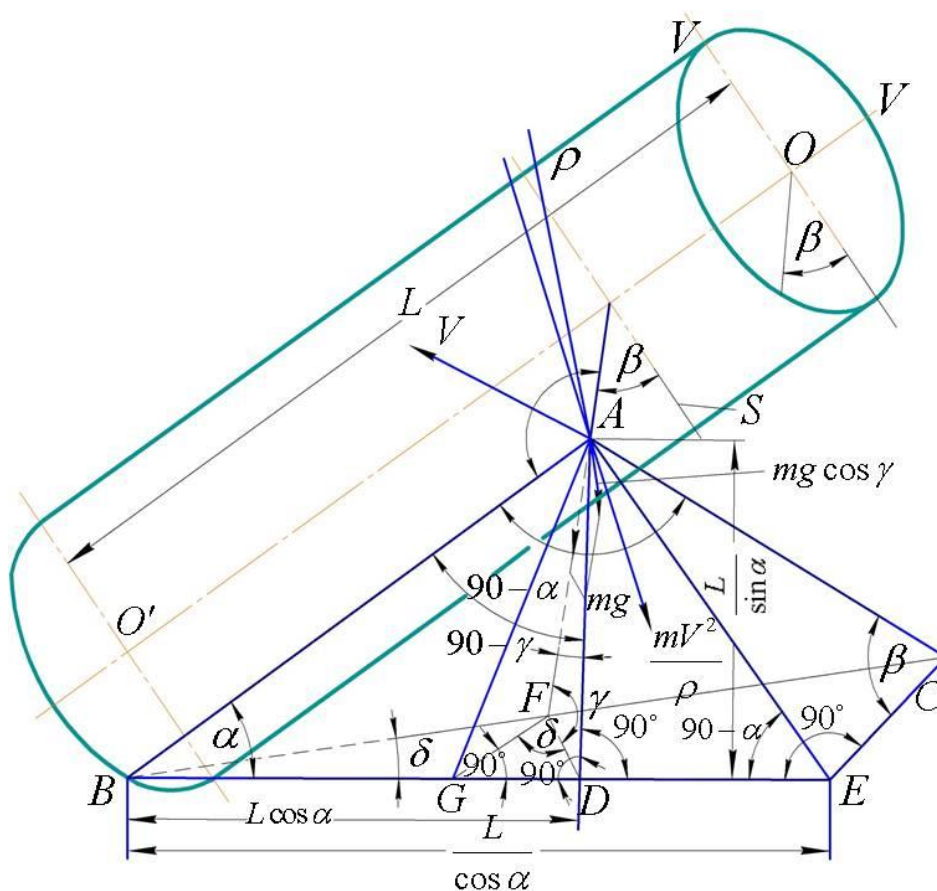


Рисунок 1.18 – Силы, действующие на семя в наклонном вращающемся цилиндре

Тогда центробежную силу он выразил так:

$$m \frac{v^2}{\rho}, \quad (1.11)$$

где ρ – радиус кривизны траектории движения;

v – скорость движения частицы по траектории.

Величина нормальной реакции поверхности цилиндра определяется как алгебраическая сумма составляющих силы тяжести семени:

$$mg \cos \gamma \quad (1.12)$$

и центробежной силы:

$$m \frac{v^2}{\rho} (n, \lambda), \quad (1.13)$$

где (n, λ) – угол между направлением нормали к поверхности (орт n) и нормали к траектории (орт λ).

На семя действует сила трения fN , где f – коэффициент трения.

В таком случае уравнение движения частицы в наклонном цилиндре имеет следующий вид:

$$N = mg \cos \gamma + m \frac{v^2}{\rho} (n, \lambda) = 0. \quad (1.13)$$

Приведенная математическая модель П.М. Василенко не учитывает пневматического воздействия на семя, которое происходит в пневматических сепараторах. А.А. Ильченко ранее дополнил его модель движения частицы по внешней поверхности цилиндра аэродинамической силой и силой вакуумного присасывания [49] и получил теоретические зависимости угла отрыва с учетом этих сил.

$$\begin{cases} mr\ddot{\varphi} = mg \cdot \sin \varphi + fN - mk_n V_c^2; \\ N = mg \cdot \cos \varphi + \Delta p s + mk_n V_{\text{с.н.}}^2 - mr\dot{\varphi}^2. \end{cases} \quad (1.14)$$

где Δp – вакуумное разряжение внутри рабочего органа, Н/м²;

s – площадь присасывающих отверстий для одного семени, м²;

k_n – коэффициент парусности;

V_{ϵ} – скорость потока воздуха на поверхности рабочего органа, м/с.

Исключив из уравнения нормальную реакцию N , сделав преобразования и понизив порядок, он получил значения угловой скорости семени в момент отрыва от поверхности:

$$(\varphi')^2 = \frac{1}{4f^2 + 1} (\cos \varphi - 2f \sin \varphi) + \frac{1}{1 - 4f^2} (\sin \varphi + 2f \cos \varphi) + \frac{D}{f} + \left(\frac{D}{f} - \frac{2f}{1 - 4f^2} - \frac{1}{4f^2 + 1} \right) e^{-2f\varphi}. \quad (1.15)$$

Подставив φ'^2 в уравнение (1.15), получил зависимость для определения угла отрыва семени от рабочей поверхности:

$$mg \cdot \cos \varphi + \Delta p s + m k_n V_{\epsilon, n}^2 - m r \left(\frac{1}{4f^2 + 1} (\cos \varphi - 2f \sin \varphi) + \frac{1}{1 - 4f^2} (\sin \varphi + 2f \cos \varphi) - \frac{D}{f} - \left(\frac{D}{f} + \frac{2f}{1 - 4f^2} + \frac{1}{4f^2 + 1} \right) e^{-2f\varphi} \right) = 0. \quad (1.16)$$

В своей работе Ильченко А.А. подробно обосновал движение частицы по внешней поверхности цилиндрической опорой поверхности, однако движение частицы внутри наклонного цилиндра с учетом действий этих сил теоретически изучено не было.

Физико-механические свойства семян тыквы и различных сепарирующих поверхностей исследовал Пастухов А.Г. и др. [94] (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Коэффициенты трения семян тыквы сорта «Волжская серая» для разных поверхностей [94]

Результаты определения коэффициентов трения семян тыквы		
Материал поверхности	Среднее значение статического коэффициента трения, f_c	Среднее значение динамического коэффициента трения, f_d
Сталь	0,473	0,331
Перфорированное стальное решето	0,418	0,293
Резина	0,481	0,337

В указанной работе подробно определены коэффициенты трения семян тыквы сорта «Волжская серая» для следующих поверхностей: сталь, перфорированная сталь (диаметр отверстий 4 мм) и резина.

1.4 Обоснование улучшения способа разделения семян тыквы по массе

При анализе современного состояния очистки и сортировки семян было выявлено, что наиболее перспективными конструкциями, являются пневмоцентробежные сепараторы, поскольку они имеют наименьшую энергоемкость и материалоемкость. Признаками разделения в таких машинах являются аэродинамические свойства и масса, за счет разного угла отрыва от опорной наружной цилиндрической поверхности. Аэродинамические сепараторы с горизонтальным воздушным потоком показывают большую эффективность, однако из-за хаотичного движения семян в воздушном потоке изменяется их миделевое сечение, что в случае плоских семян бахчевых создает большую погрешность в разделении семян. Семена, имеющие хорошие показатели массы, могут быть отнесены к фракции легких семян и, наоборот, легкие семена могут попасть в тяжелую фракцию.

Способность семени сопротивляться воздушному потоку выражается коэффициентом парусности k_n [17, с. 15], он определяется по формуле:

$$k_n = \frac{k_0 \cdot F_{м.с} \cdot \rho_v}{2m}, \quad (1.11)$$

где k_0 – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$F_{м.с}$ – площадь миделевого сечения семени, м^2 ;

m – масса семени, кг;

ρ_v – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Из-за изменения миделевого сечения семени, определение коэффициента парусности в вертикальном воздушном потоке затруднительно. По этой причине данный показатель считают, учитывая скорость витания, если аэродинамическая

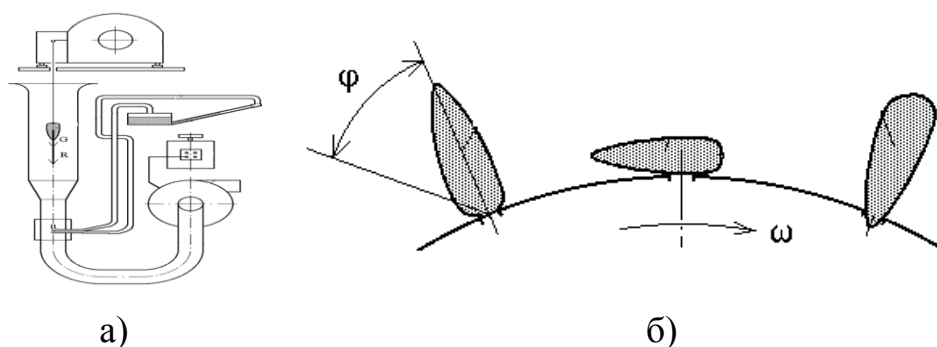
сила воздушного потока равна силе тяжести $R = G$ [17], а скорость воздуха равна скорости витания семян $V = V_{vit}$:

$$k_n = \frac{g}{V_{vit}^2}, \quad (1.12)$$

где V_{vit} – скорость витания семян, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

На базе Луганского государственного аграрного университета проведены исследования [140, с. 135], результаты которых представлены на рисунке 1.19, аэродинамических свойств семян подсолнечника «Американский S-гибрид», где семена ориентировали в воздушном потоке в разных положениях. Исследователи получили коэффициенты парусности семян подсолнечника в положении плашмя – 0,210 м⁻¹, ребром – 0,112 м⁻¹, торцом – 0,023 м⁻¹. Если мы используем формулу, учитывающую зависимость коэффициента парусности от скорости витания, то для одного и того же семени получим расчетные значения скорости витания в положении: плашмя – 6,8 м/с, ребром – 9,35 м/с, торцом – 20,64 м/с, при этом средняя скорость витания семян подсолнечника составляет примерно 7,3–8,4 м/с.



а) определение коэффициента парусности; б) положение семени на присоске
высевающего аппарата

Рисунок 1.19 – Изучение аэродинамических свойств семян подсолнечника

Аналогичные исследования (рисунок 1.20), проведены и с семенами тыквы сорта «Волжская серая» [51 с. 43], где получены коэффициенты парусности семян в положении плашмя – 0,09 м⁻¹, ребром – 0,015 м⁻¹, торцом – 0,021 м⁻¹. Расчетные

значения скоростей витания семени тыквы при положении: плашмя – 10,47 м/с, ребром – 25,6 м/с, торцом – 21,45 м/с, при этом полученная скорость витания данного семени при измерении на пневматическом классификаторе составила 12,5 м/с.



а)



б)



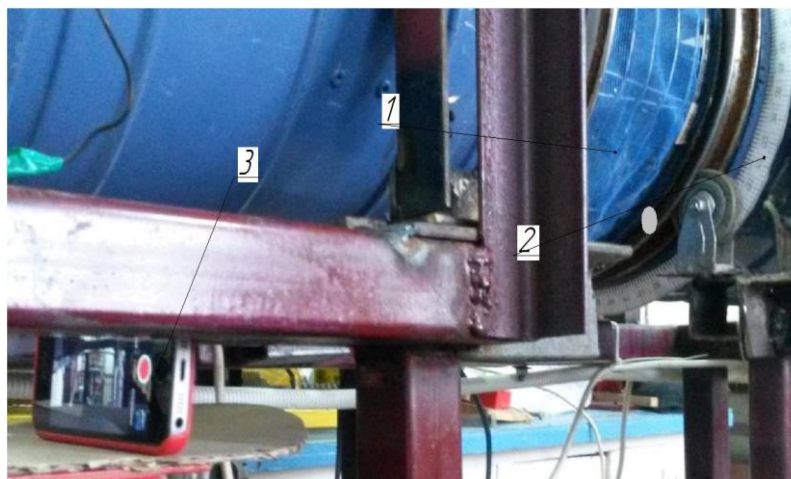
в)

а) плашмя; б) торцом; в) ребром

Рисунок 1.20 – Положение семени в воздушном канале

Предположительной причиной нестабильного положения семян в воздушном потоке является их форма и вариации центра тяжести в разных семенах, который оказывает свое влияние на положение семени. Следовательно, нарушается качество разделения семян. По результатам прошлых исследований [65] для достижения высокого качества сепарации рекомендуется ориентирование семян в положении плашмя относительно воздушного потока, когда площадь миделевого сечения семян является максимальной.

Ранее одним из наших исследований было разделение семян тыквы с близкими геометрическими параметрами, но разной массой. Сначала семена разделили на парусном классификаторе К-293 Petkus с вертикальным воздушным потоком. Затем семена разделялись в горизонтальном воздушном потоке, имитируя работу аэродинамических сепараторов. Также мы разделили семена разной массы на экспериментальном аэродинамическом сепараторе с цилиндрической опорной поверхностью, на который установили градусную шкалу и при помощи замедленной съемки определяли угол отрыва семян разной массы от сетчатой поверхности (рисунок 1.21).



1 – барабан; 2 – градусная шкала; 3 – камера

Рисунок 1.21 – Измерение угла отрыва семени

При разделении семян в вертикальном и горизонтальном воздушном потоке семена двигались хаотично, из-за этого при разных повторениях опыта на них воздействовал воздушный поток с разной силой. В случае с разделением семян рабочей цилиндрической поверхностью, семена не изменяли миделевого сечения.

Качественным сравнительным показателем разделений семян разными способами являлся коэффициент вариации, который высчитывался при обработке экспериментов, он отображал стабильность процесса разделения семян (рисунок 1.22).

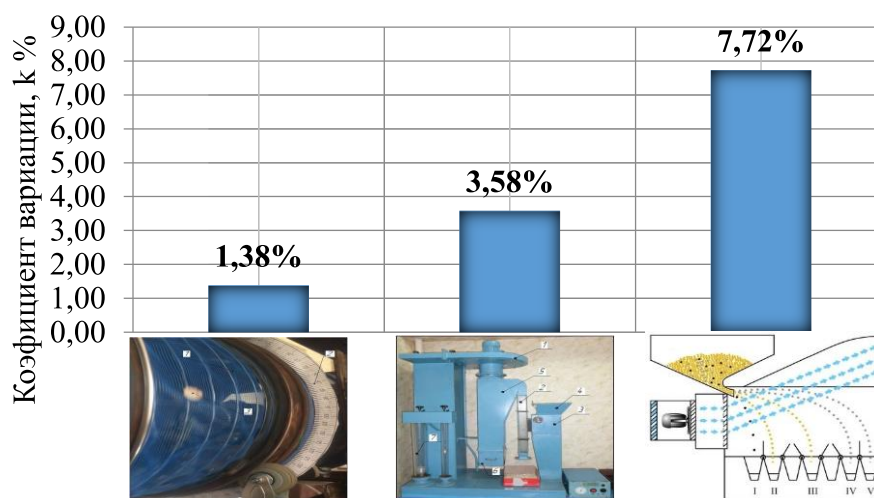


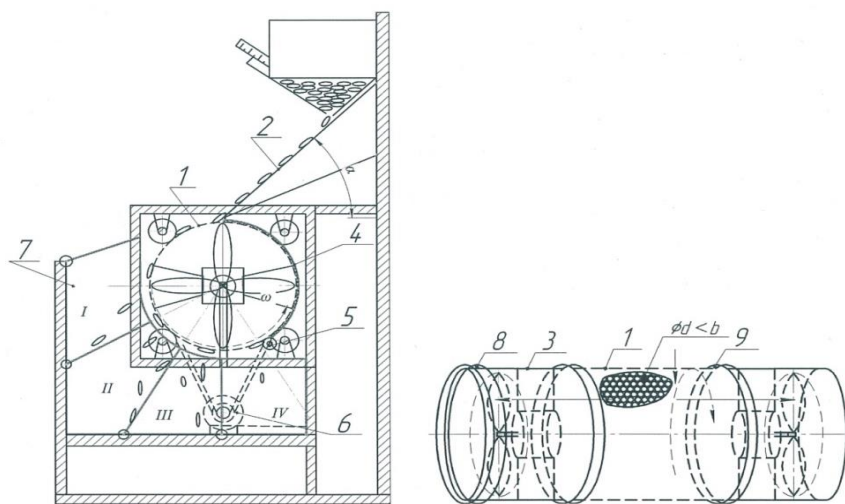
Рисунок 1.22 – Средний коэффициент вариации экспериментов по разделению семян разными способами

Согласно результатам экспериментов, коэффициент вариации при разделении семян в вертикальном воздушном потоке изменялся от 2,44% до 5,59%, при разделении в горизонтальном воздушном потоке изменялся от 2,99% до 10,19% и при разделении в экспериментальном аэродинамическом сепараторе с цилиндрической опорной поверхностью он изменялся до 3,33%.

Исходя из выше приведенных исследований, сделаем вывод, что разработка машин для сепарации, в процессе работы которых плоские семена будут ориентированы относительно воздушного потока, является одним из актуальных способов для повышения качества сепарации семян бахчевых культур.

1.5 Преимущества и недостатки прототипов сепаратора

Работы по интенсификации конструкции сепараторов типа ЗАВ-40-02.000 велись разными учеными. Ильченко А.А. предложил конструкцию [100], где из барабана воздух высасывается двумя осевыми вентиляторами с двух сторон (рисунок 1.23).



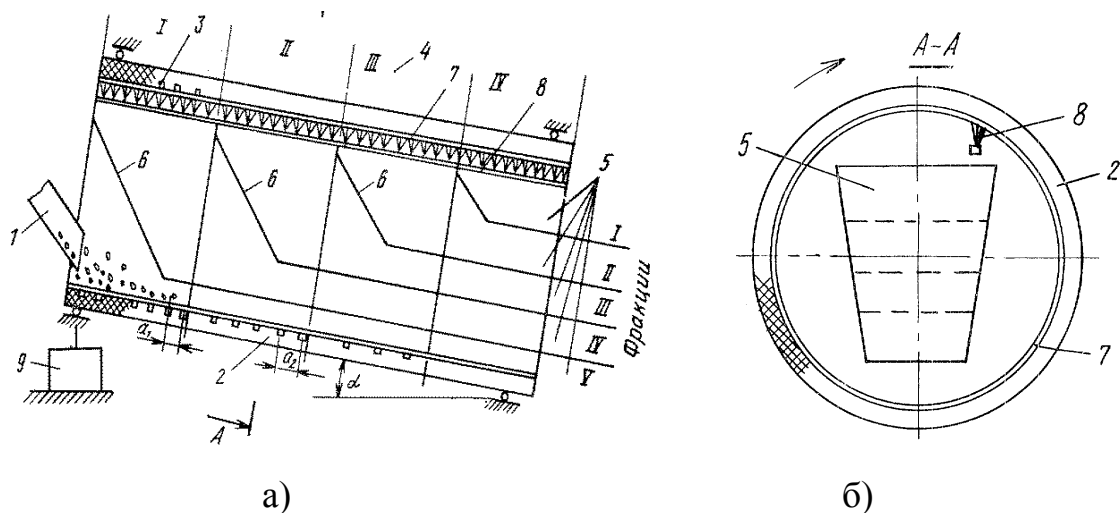
- 1 – сепарирующая поверхность; 2 – скатный лоток; 3 – камера с вентиляторами;
 4 – приспособление для закрытия не рабочей части сепарирующей поверхности;
 5 – очистная щетка; 6 – привод сепарирующей поверхности; 7 – приемники
 разделенного материала; 8 – паз под ремень; 9 – паз под роликоподшипники

Рисунок 1.23 – Конструктивно-технологическая схема аэродинамического сепаратора

Данное техническое решение позволило уменьшить энергоемкость конструкции благодаря тому, что воздушный поток больше не проходит через всю сетчатую поверхность в отличие от аналога. Создано также программное обеспечение, которое дает возможность настраивать угол делительной перегородки с целью достижения нужной массы тысячи семян при их разделении на фракции.

Перспективу разработки модернизации сепараторов с цилиндрической опорной поверхностью подтвердили испытания данного сепаратора на базе КФХ «АЙДАР-ОВОЩ», после чего сепаратор был рекомендован к внедрению в сельское хозяйство департаментом агропромышленного развития Украины. Для повышения качества работы данного сепаратора необходима проработка подачи семян на барабан с решетом, что бы минимизировать риск проскальзывания семян мимо отверстия или через них.

Рассмотрен патент Богоявленского В.М. [6] на диэлектрический сепаратор (рисунок 1.24), представляющий из себя цилиндр, имеющий возможность регулировки угла наклона, с диэлектрической внутренней рабочей поверхностью.



- а) поперечный разрез; б) продольный разрез: 1 – питатель; 2 – рабочий орган;
 3 – пазы; 4 – секции; 5 – приемник продуктов разделения; 6 – перегородки;
 7 – диэлектрическое покрытие; 8 – очищающая щетка; 9 – устройство изменения
 угла наклона

Рисунок 1.24 – Схема диэлектрического сепаратора

При работе сепаратора семена через питатель подавались внутрь барабана на диэлектрическую рабочую поверхность, которая поделена на зоны с разной силой прижатия. При вращении барабана семена, прижимаясь к поверхности, поднимались вверх и, отрываясь, распределялись по приемным лоткам, делясь на фракции по массе.

Данному сепаратору присущи все типичные недостатки диэлектрических сепараторов: чувствительность к влаге материала, риск поражения электрическим током и малая производительность.

Важным достоинством данных конструкций сепараторов является ориентация семян на рабочей поверхности. Анализируя преимущества и недостатки рассмотренных конструкций, делаем предположение, используя в подобной конструкции вместо диэлектрической силы воздушный поток, можно достичь значительного улучшения производительности, а также избавиться от других недостатков диэлектрических сепараторов семян.

1.6 Анализ сепарирующих поверхностей применительно к разрабатываемому сепаратору

Выбор рациональной сепарирующей поверхности представляет собой сложную научно-техническую задачу, обусловленную совокупным влиянием множества факторов. К ним относятся тип решет, их геометрическая форма, размер и конфигурация отверстий и другие параметры. Одной из ключевых характеристик решет является коэффициент живого сечения [7] – отношение суммарной площади отверстий к общей площади поверхности решета.

Широкое применение для очистки посевного материала получили штампованные пробивные решета, представленные на рисунке 1.25. Основным недостатком таких решет является малое живое сечение из-за наличия широких перемычек, по этой причине данные решета имеют низкую удельную производительность. Также поверхность имеет высокий риск проскальзывания по ней семян, если она будет иметь форму цилиндра.

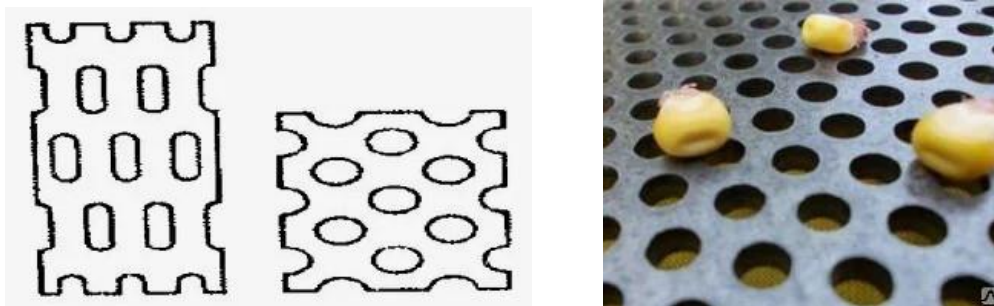
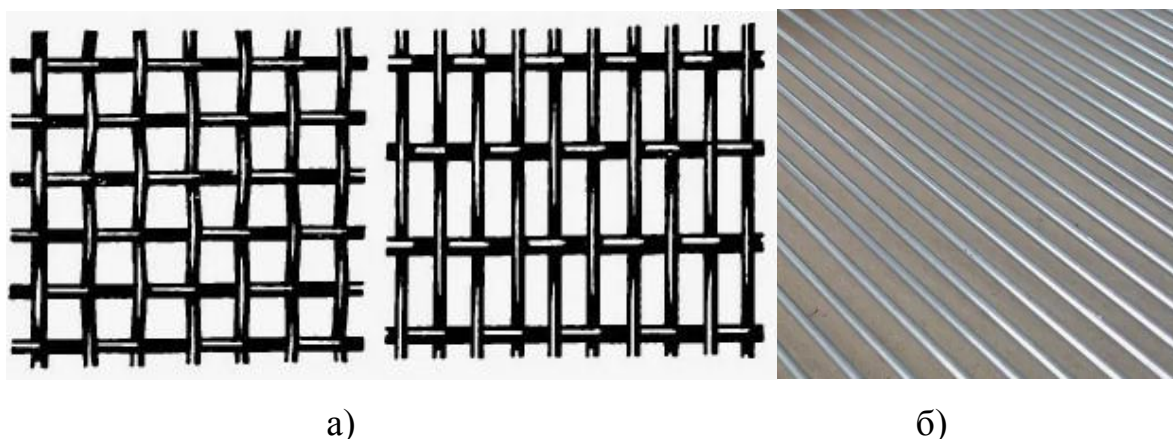


Рисунок 1.25 – Внешний вид штампованного пробивного решета

Проволочные сварные решета, представленные на рисунке 1.26, имеют значительно больший коэффициент живого сечения, если сравнивать их с пробивными. Отличием струнных решет от проволочно-сварных является способность образовать длинную щель любой ширины с возможностью ее изменения. Такие поверхности просты в изготовлении и хорошо подходят для просеивания материала, направляя его вдоль щели. Однако использование подобных поверхностей для ориентирования относительно воздушного потока на сепараторе выглядит не рациональным. Даже при подборе ширины просвета между прутками, исключая проваливание сепарирующих семян, их ориентирование на поверхностях с округлым профилем (прутках или перемычках) остаётся нестабильным. Это приводит к вариации миделевого сечения семян при воздействии воздушного потока и, как следствие, к снижению качества сепарации.



а) проволочные сварные решета; б) струнное решето

Рисунок 1.26 – Внешний вид проволочно-сварных и струнных решет

Сетчатая поверхность (тканевые сита) имеет большое живое сечение и используется чаще всего в мукомольной и крупяной промышленности, там, где необходимы маленькие отверстия. Поверхность эффективно использовалась на пневмоцентробежном сепараторе для создания опорной цилиндрической поверхности и ориентирования семян относительно воздушного потока. Поэтому сетчатую поверхность, изображенную на рисунке 1.27, для использования в новом сепараторе можно рассматривать как одну из перспективных.

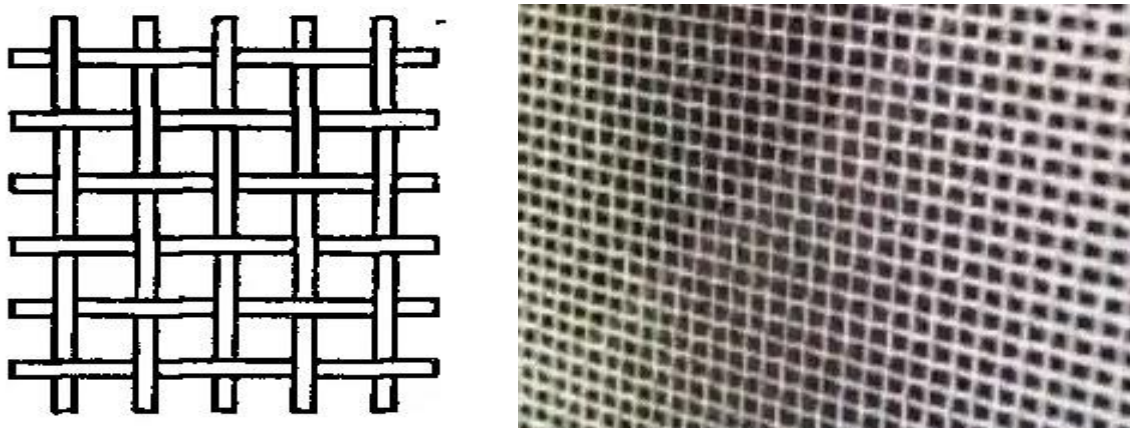


Рисунок 1.27 – Внешний вид сетчатой поверхности (тканевого сита)

Ячеистая поверхность, представленная на рисунке 1.28, используется на зерноочистительных машинах триерного типа. Эффективность работы ячеистых поверхностей зависит от количества ячеек на определенной площади поверхности, а также от порядка расположения ячеек. Известны патенты триерных блоков с аспирационной системой в виде отсасывающего вентилятора и магистрального воздуховода [99]. В таком триере ячейки имеют центральное сквозное отверстие. Достоинством данной поверхности является очень большой коэффициент трения, что исключает риск проскальзывания семени.

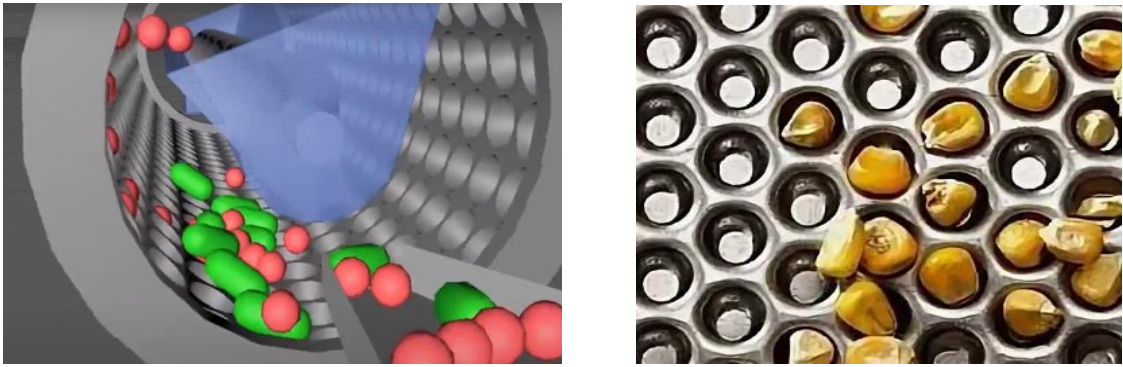


Рисунок 1.28 – Внешний вид ячеистой поверхности цилиндрического триера

При анализе процесса ориентирования семян на опорной поверхности относительно воздушного потока установлено, что в случае присасывания семени к поверхности на него действуют аэродинамическая сила и сила вакуумного присасывания. Аэродинамическая сила F_a зависит от коэффициента парусности и скорости потока воздуха на поверхности рабочего органа. В то же время, на силу вакуумного присасывания $F_{в.с}$ влияют показатели вакуумного разрежения внутри рабочего органа и площадь присасывающих отверстий для одного семени. Одним из рациональных решений для ориентирования семян является создание опорной поверхности, работающей по принципу присоски (рисунок 1.29). Присоски находили различное применение в сельском хозяйстве, например для роторного подборщика яблок [8]. Известно, что грузоподъемность присосок зависит от площади присосочной поверхности: чем больше площадь захвата, тем больше массу она может удерживать. Следовательно, предлагаемая поверхность будет иметь наибольшую эффективность при удержании плоских семян, в особенности крупных семян тыквы. При подборе резины для изготовления сепарирующей поверхности необходимо учитывать её механические свойства: материал должен обладать достаточной прочностью и одновременно высокой эластичностью, обеспечивая плотное прилегание к поверхности семени. Отсутствие последнего условия исключает формирование вакуумного присасывания, что делает невозможным реализацию эффекта удержания семени на поверхности [2].

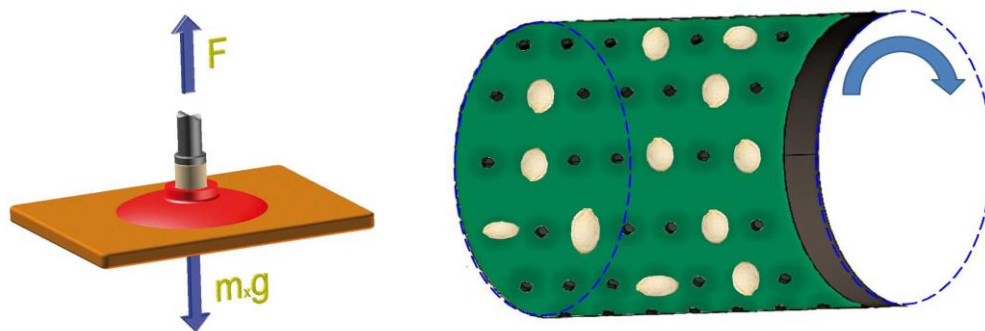


Рисунок 1.29 – Принцип работы присоски в резиновом решетке

1.7 Выводы по главе

На основании анализа машин для сепарации семян тыквенных культур, трудов ученых в этой области, сделаны следующие выводы:

- сепарация является одним из основных способов повышения эффективности возделывания семян культур, одним из важнейших признаков качества семени является масса тысячи семян, которая напрямую влияет на энергию прорастания и урожайность;
- проанализированы достоинства и недостатки существующих машин для очистки и сортировки посевного материала, проведена многокритериальная оценка, показавшая перспективность разработки пневматического сепаратора с цилиндрической рабочей поверхностью;
- проанализированы труды ученых в области сепарирования, в частности сепарация внешней рабочей поверхностью цилиндрического рабочего органа, однако воздушная сепарация внутренней рабочей поверхностью достаточно изучена не была;
- рассмотрены эксперименты, подтверждающие, что изменение миделевого сечения семени в процессе сепарации негативно влияет на качество разделения;
- выявлены существенные недостатки прототипов, от которых должен быть избавлен новый сепаратор;
- проанализированы существующие поверхности, используемые при сепарации, выбраны наиболее перспективные поверхности для пневматического сепаратора.

ГЛАВА 2

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

Теоретические исследования включают в себя модель функционирования предлагаемой конструкции пневматического сепаратора, прототипом которого стал диэлектрический сепаратор, математическое моделирование работы пневматического сепаратора. Обоснования параметров рабочих органов конструкции, опираясь на математические и программные расчеты рациональных параметров, а также определение основных показателей работы сепаратора на основе вышесказанного.

2.1 Модель функционирования пневматического сепаратора

При работе рассмотренного диэлектрического сепаратора Тарушкина В.И. установлено: условия отрыва определяются тем, что каждое семя имеет свою потенциальную (электрическую) энергию W_n и кинетическую (механическую) энергию W_k . Потенциальная энергия прижимает семена к диэлектрической поверхности, а кинетическая способствует их отрыву.

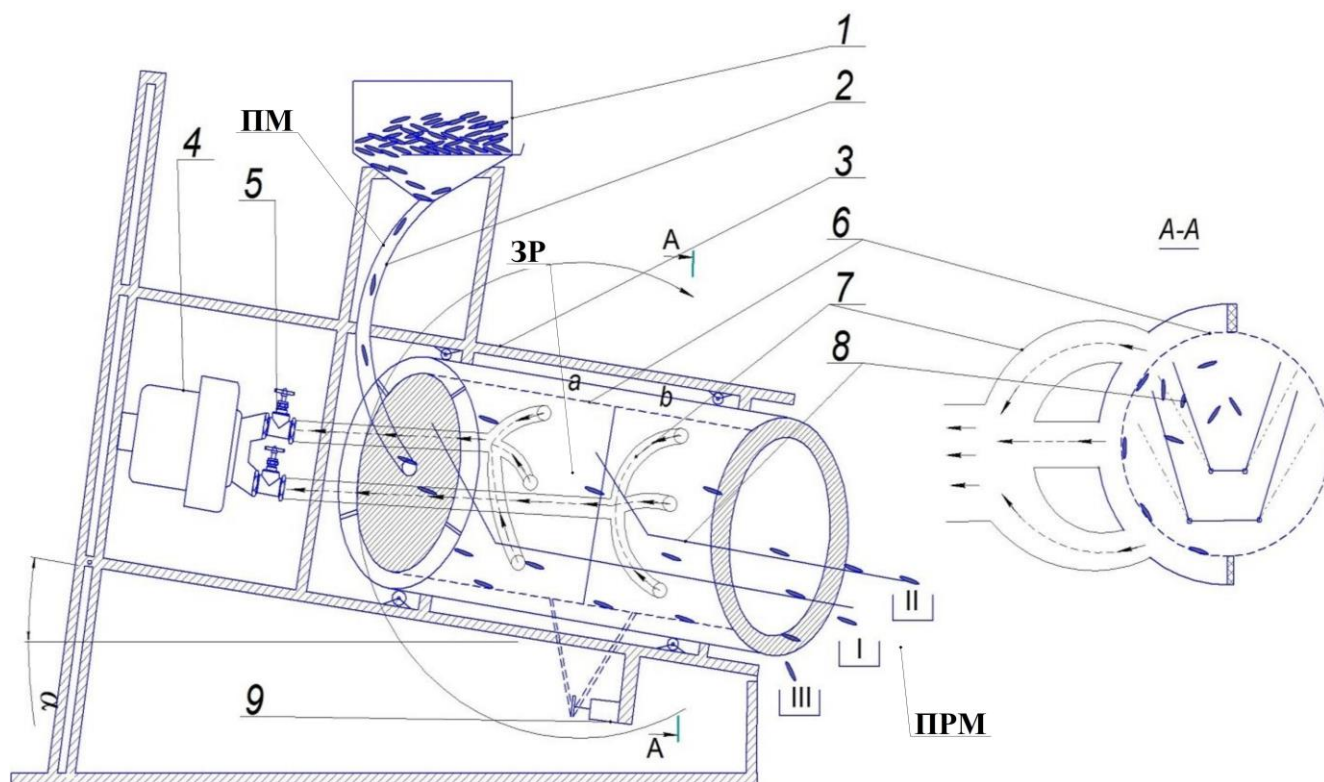
Как уже было сказано, система сортировки семян при помощи диэлектрической силы имеет ряд недостатков. Предположим, если использовать в подобной конструкции вместо диэлектрической силы, силу вакуумного присасывания $F_{в.с}$ для удержания семян на рабочей поверхности, то это позволит избавиться не только от основных недостатков сепараторов такого типа, но и добиться более качественной сепарации, и получить улучшенную энергоэффективность конструкции, структурная схема которой представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурная схема предлагаемого способа сепарации

Основными определяемыми конструктивными параметрами сепаратора для разделения семян по массе являются параметры цилиндрической сепарирующей поверхности (тип поверхности, коэффициент трения f , коэффициент живого сечения $k_{ж.с.}$, диаметр D и длина L), угол наклона рабочей поверхности α , параметры бункера. Основными технологическим параметрами является частота вращения цилиндрической рабочей поверхности n_{ϕ} , сила вакуумного присасывания в отверстиях решета $F_{в.с.}$, скорость воздушного потока на отверстия сепарирующей поверхности $V_{в.}$, пропускная способность сепаратора $Q_{с.}$, энергоемкость сепарации $\mathcal{E}$. Зная параметры воздушной системы сепаратора, можно определить необходимую производительность вакуумного вентилятора для создания необходимой силы вакуумного присасывания в отверстиях перфорированной рабочей поверхности.

На основе анализа конструкции диэлектрического сепаратора нами была предложена конструктивно-технологическая схема пневматического сепаратора с перфорированной рабочей поверхностью (рисунок 2.2).



1 – бункер для семян; 2 – гофра для подачи семян; 3 – рама; 4 – вакуумный вентилятор; 5 – регулировочный вентиль; 6 – рабочая поверхность; 7 – воздушная гофра; 8 – приемный лоток; 9 – привод; а – зона первой воздушной камеры; б – зона второй воздушной камеры; I – фуражная фракция; II – товарная фракция; III – посевная фракция; ПМ – зона подачи материала; ЗР – зона разделения материала; ПРМ – зона приема материала

Рисунок 2.2 – Конструктивно-технологическая схема пневматического сепаратора

Сепаратор состоит из бункера для семян 1, гофры для подачи семян в барабан 2, рамы 3, позволяющей менять угол рабочего органа. В задней части расположен вакуумный вентилятор 4, создающий разрежение воздуха для присасывания семян путем высасывания воздуха из камер разрежения через воздушные гофры 7. Регулировочные вентили 5 позволяют подобрать необходимую силу присасывания на разных участках поверхности, сама рабочая поверхность 6 представляет собой цилиндрическое решето, которое ориентирует семена относительно силы вакуумного присасывания. Также внутри барабана

установлены приемные лотки 8 для деления семян на фракции, а вращение барабана обеспечивает ременной привод 9.

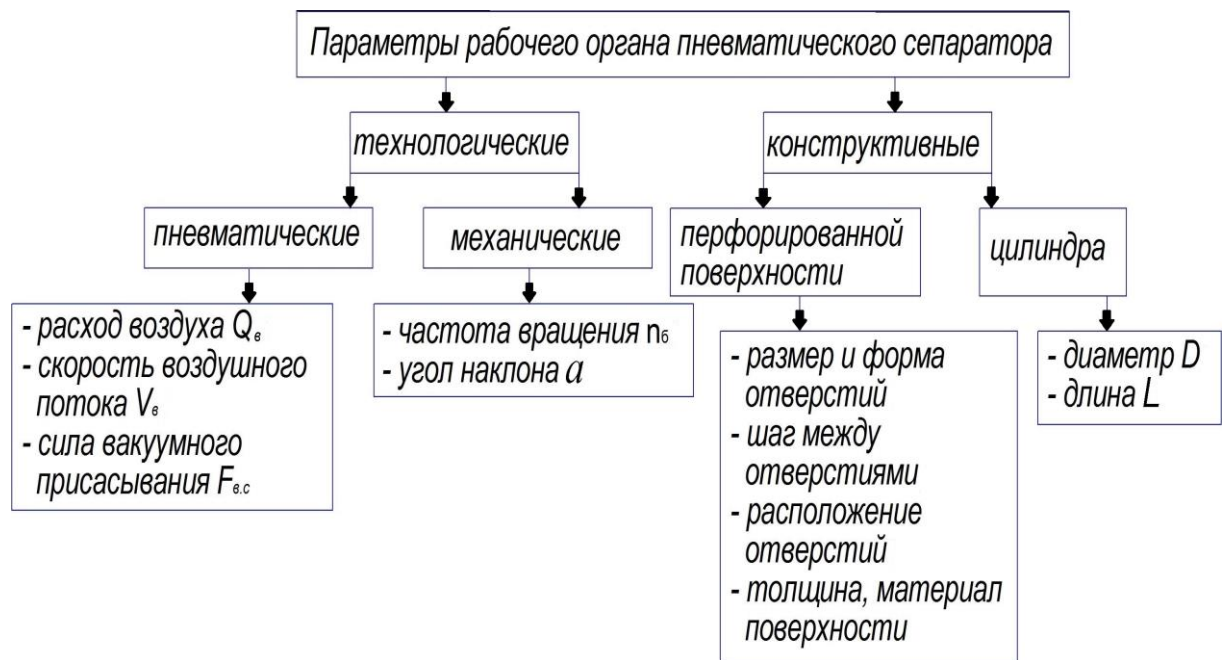


Рисунок 2.3 – Параметры рабочего органа пневматического сепаратора

Разработаем модель функционирования пневматического сепаратора. Его основные части: зона подачи материала ПМ, зона разделения ЗР, зона принятия разделенного материала ПРМ (рис. 2.5).

Начальные условия работы предложенной конструктивной схемы: уровень подачи материала g_n (кг/час) и толщина материала при поступлении в рабочий орган через питатель h_m (м).

На показатели зоны подачи материала ПМ влияют следующие факторы: положение открытия заслонки бункера семян; толщина материала h_m (м); механико-технологические свойства $f(t)$: начальное значение массы тысячи семян, вариация семян по массе в исходном материале, вариация семян по коэффициенту парусности.

На показатели зоны разделения ЗР оказывают влияние следующие конструктивно-технологические параметры: частота вращения цилиндрической рабочей поверхности n_6 (мин⁻¹); угол наклона сепарирующей поверхности α ;

коэффициент живого сечения $k_{ж.с.}$; коэффициент трения между семенами и поверхностью f ; скорость воздушного потока в отверстиях перфорированной поверхности $V_{в.}$; коэффициент использования рабочей площади k_u [52].

На показатели зоны приема материала ПРМ влияют следующие факторы: размещение приемных лотков относительно угла отрыва семени. Общая затрата энергии $\mathcal{E}(t)$ на технологический процесс сепарации семян – это отношение суммы затраченной электроэнергии двигателем привода и затраты электроэнергии вакуумного двигателя для создания необходимой силы вакуумного присасывания на отверстиях рабочей поверхности к пропускной способности сепаратора. Модель функционирования пневматического сепаратора представлена на рисунке 2.4.

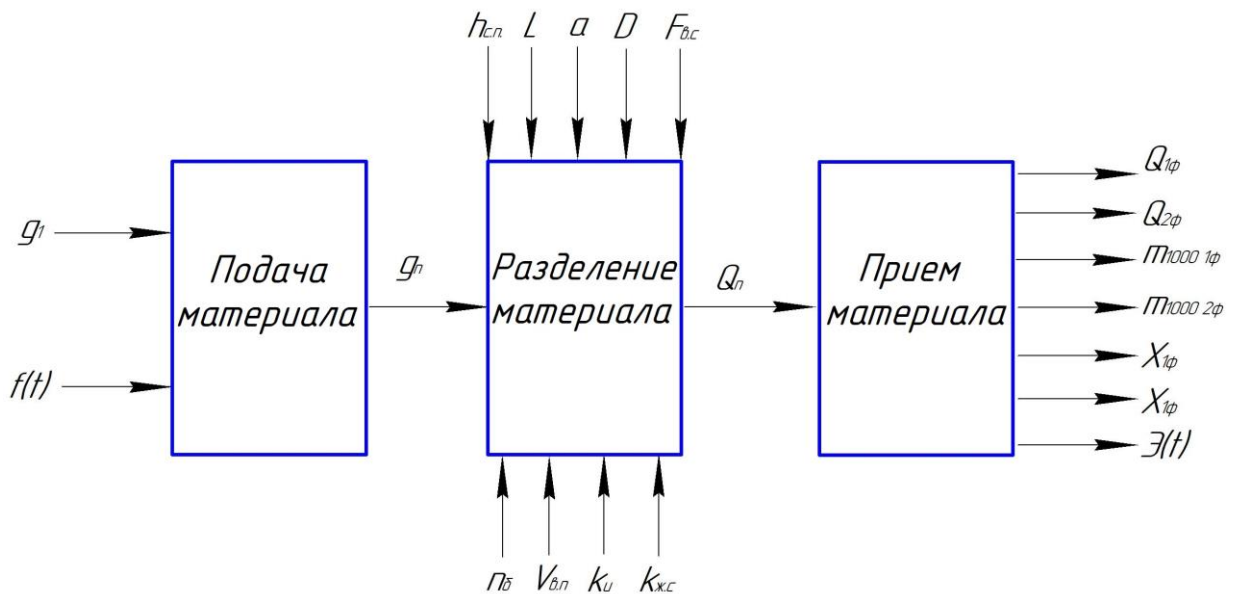


Рисунок 2.4 – Модель функционирования пневматического сепаратора

Функция взаимодействия между параметрами технологического процесса сепарации семян выражается уравнением:

$$f(g_n, f(t), h_{c.n}, n_{б}, k_{ж.с.}, k_u, V_{в.н}, F_{в.с.}, \alpha, \mathcal{E}(t), m_{1000}, X, Q_n, Q_{1ф}, Q_{2ф}) = 0. \quad (2.1)$$

Эффективность процесса сепарации семян можно оценить по следующим выходным параметрам: удельная энергоемкость $\mathcal{E}(t)$ кВт·ч/т; масса тысячи семян

m_{1000} кг; количество разделенного материала с определенной массой тысячи семян $Q_{1ф}$, $Q_{2ф}$ (%); производительность сепаратора Q_n кг/с и чистота фракций $x_{1ф}$, $x_{2ф}$.

Построена алгоритмическая модель, отражающая логику его функционирования, представленная на рисунке 2.5. Данная модель служит основой для понимания кинематики и управления процессом, а также может быть использована при разработке автоматизированных систем регулировки параметров сепарации.

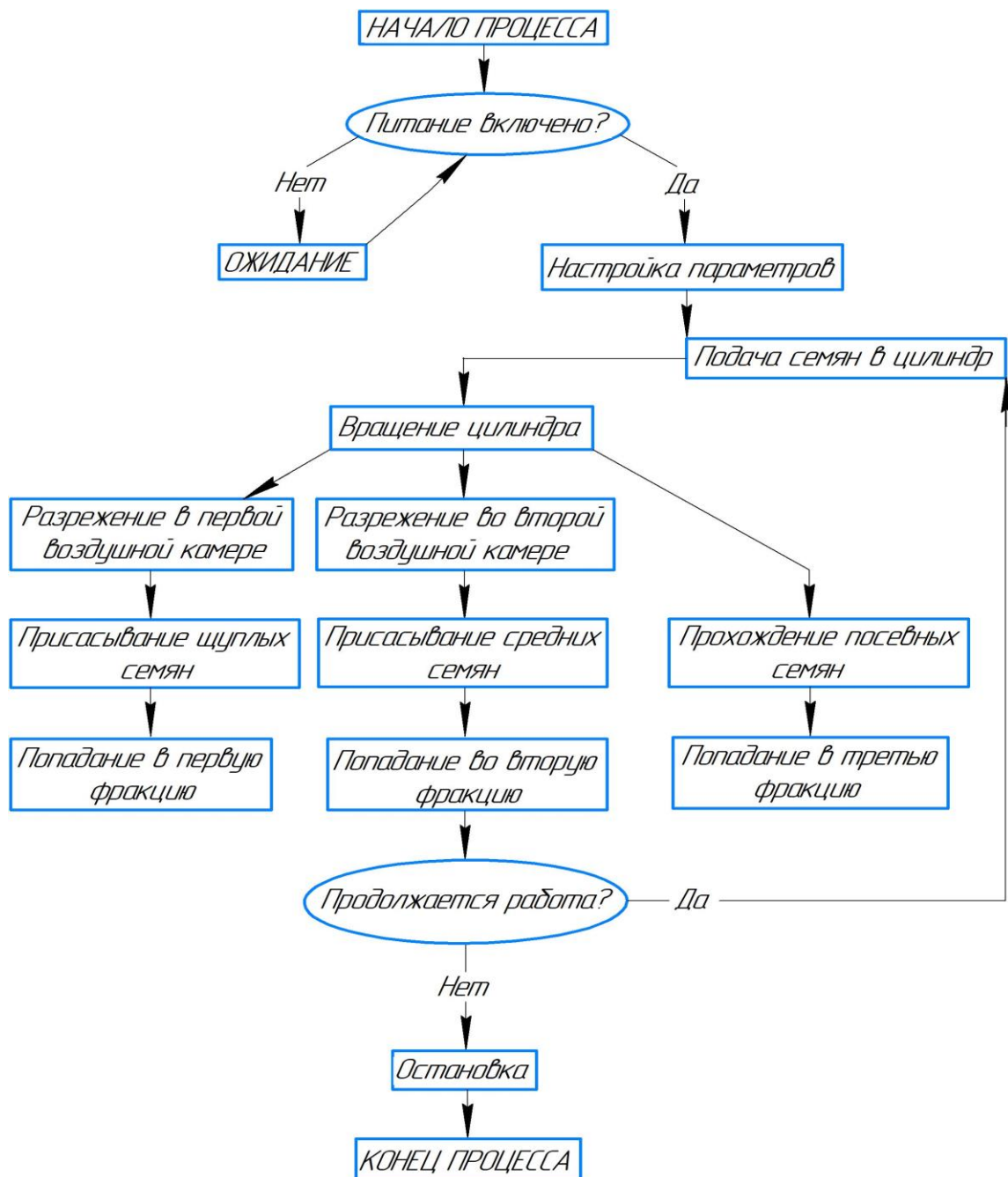


Рисунок 2.5 – Алгоритмическая модель работы пневматического сепаратора

2.2 Математическое моделирование работы пневматического сепаратора

Рассмотрим процесс сепарации семян исследуемым пневматическим сепаратором. Семена различные по плотности, но со схожими геометрическими параметрами подаются на вращающуюся цилиндрическую рабочую поверхность сепаратора, где укладываются слоем в одно семя $h_{с.н.}$, где на их удержание действует центробежная сила $F_{ц}$; сила трения $F_{тр}$. Отрыву семени способствует сила тяжести F_m . При включении вакуумного вентилятора к силам, удерживающим семя, добавляется сила вакуумного присасывания $F_{в.с}$ и аэродинамическая F_a . Если углового перемещения семени в абсолютном движении до отрыва достаточно для попадания в приемный лоток, то семя попадает в первую фракцию. Если этого не происходит, то семена, перемещаясь дальше по цилиндру, попадают в зону с большей силой вакуумного присасывания, где процесс повторяется с целью разделения на более тяжелые фракции.

Ранее процесс движения частицы внутри вращающегося цилиндра исследовал ученый Петр Мефодиевич Василенко [18, с. 219]. Опираясь на его опыт, необходимо провести теоретические исследования и получить аналитические зависимости [67].

При теоретическом исследовании сделаем следующие допущения:

- силой взаимодействия семян друг с другом на поверхности барабана во время сепарации пренебрегаем;
- разрежение воздушного потока во всех отверстиях рабочей поверхности на уровне одной камеры разрежения одинаково;
- движение каждого семени рассматривается в одной плоскости, в том числе и после отрыва от рабочего органа.

Рассмотрим движение семени внутри цилиндрического барабана пневматического сепаратора. Силы, которые действуют на семя от начала его пути до момента отрыва, показаны на рисунке 2.6.

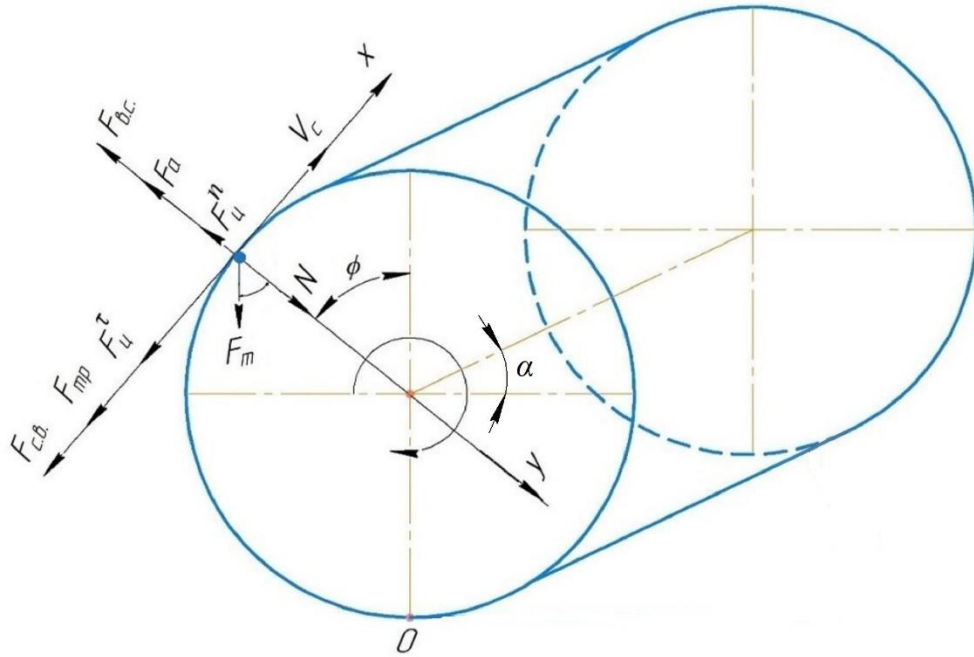


Рисунок 2.6 – Схема сил, действующих на семя при ее движении во внутренней цилиндрической сепарирующей поверхности разрабатываемого пневматического сепаратора

На материальное тело, находящееся во вращающемся цилиндре в процессе сортировки, действуют такие силы:

Сила тяжести – F_{mp} , Н:

$$F_m = mg, \quad (2.1)$$

где m – масса семени, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Сила трения – F_{mp} :

$$F_{mp} = fN, \quad (2.2)$$

где f – коэффициент трения по перфорированному полотну;

N – нормальное давление, которое оказывает семя на сепарирующую поверхность.

Центробежная сила инерции [75] – F_u , она делится на: F_u^n – нормальная составляющая и $F_u^{(\tau)}$ – тангенциальная составляющая,

$$F_y^{(\tau)} = m \frac{dV_c}{dt}, \quad (2.3)$$

где V_c – круговая скорость перемещения семени,

$$F_y^n = m r \omega^2 = m \frac{V_c^2}{r}, \quad (2.4)$$

где r – радиус цилиндра, м;

ω – угловая скорость цилиндра, c^{-1} .

Сила вакуумного присасывания [45] – $F_{с.с}$:

$$F_{с.с} = \Delta p \cdot s, \quad (2.5)$$

где Δp – вакуумметрическое давление внутри рабочего органа, Н/м²;

s – площадь присасывающего отверстия, м².

Сила сопротивления воздуха [22] $F_{с.в}$, которая направлена против движения семени:

$$F_{с.в} = m \cdot k_n \cdot V_c^2, \quad (2.6)$$

где k_n – коэффициент парусности, м⁻¹.

Аэродинамическая сила воздушного потока [80] F_a (Н):

$$F_a = m \cdot k_n \cdot V_s^2, \quad (2.7)$$

где V_s – скорость потока воздуха на поверхности рабочего органа, м/с.

Необходимо получить углы отрыва семени от рабочей поверхности в зависимости от соотношений сил, направленных на его удержание и отрыв от поверхности. Все семена оказывают нормальное давление N на сепарирующую поверхность. Спроектируем рассмотренные силы на касательную к внутренней рабочей поверхности и составим дифференциальное уравнение движения семени в проекциях на оси движимой системы координат XOY :

$m\ddot{a} = \Sigma \overline{F}$ или на координате оси XOY ;

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -F_{с.в.} - F_y^\tau - F_{mp} - F_m \cdot \sin \phi \cos \alpha \\ m\ddot{y} = -F_{с.с.} - F_a - F_y + F_m \cos \phi \cos \alpha + N \end{cases} \quad (2.8)$$

т.к. семя не движется по оси y , то $\ddot{y} = 0$.

Тогда из второго уравнения выразим:

$$N = F_{\text{в.с.}} + F_a + F_y - F_m \cos \phi \cos \alpha. \quad (2.9)$$

Подставим в первое и заменим $\ddot{x} = r\ddot{\phi}$, где $\ddot{\phi} = \dot{\omega} = \varepsilon$ – угловое ускорение.

Так как движение равномерное:

$$F_y^{(\tau)} = m \frac{dV_c}{dt} = ma_c = 0, \quad (2.10)$$

$$mr\ddot{\phi} = -mk_n V_c^2 - 0 - f \cdot N = mg \sin \phi \cos \alpha. \quad (2.11)$$

Подставим N :

$$mr\ddot{\phi} = -mk_n V_c^2 - f(\Delta p \cdot s + mk_n V_\varepsilon^2 + m \frac{V_c^2}{r} - mg \cos \phi \cos \alpha) - mg \sin \phi \cos \alpha, \quad (2.12)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{mr} (-mk_n V_c^2 - f \Delta p \cdot s - mk_n V_\varepsilon^2 - fm \frac{V_c^2}{r} + fmg \cos \phi \cos \alpha - mg \sin \phi \cos \alpha). \quad (2.13)$$

Учитываем, что $\frac{V_c^2}{r} = \dot{\phi}^2$ в формуле центробежная сила, получим:

$$\ddot{\phi} + f\dot{\phi}^2 = -\frac{k_n V_c^2}{r} - \frac{f \Delta p \cdot s}{mr} - \frac{k_n V_\varepsilon^2}{r} + \frac{fg \cos \phi \cos \alpha}{r} - \frac{g \sin \phi \cos \alpha}{r}. \quad (2.14)$$

Сделаем замену:

$$B = -\frac{k_n V_c^2}{r} - \frac{f \Delta p \cdot s}{mr} - \frac{k_n V_\varepsilon^2}{r}. \quad (2.15)$$

Тогда получим дифференциальное уравнение второго порядка с правой частью:

$$\ddot{\phi} + f\dot{\phi}^2 = \frac{fg \cos \phi \cos \alpha}{r} - \frac{g \sin \phi \cos \alpha}{r} + B. \quad (2.16)$$

Получили нелинейное обыкновенное ДУ 2-го порядка. Зная начальные условия, $\phi(0) = 0$, $\dot{\phi}(0) = 0$ имеем задачу Коши.

Для решения применим одношаговый метод Рунге-Кутты 4-го порядка [77]. Отметим, что накопленная ошибка вычислений имеет порядок $O(h^4)$.

Геометрически метод Рунге-Кутты для задачи Коши:

$$y' = f(x, y), \quad y_0 = y(x_0), \quad (2.17)$$

состоит в том, что на малом отрезке $[x; x+h]$ интегральная кривая $y = y(x)$ заменяется отрезком прямой, проходящим через точку $(x, y(x))$.

Пусть отрезок $[x_0; x_0 + a]$ разделён на n равных частей точками:

$$x_0, x_1, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n = x_0 + a \quad \text{и} \quad (x_{m+1} - x_m = h). \quad (2.18)$$

Определены приближённые значения $y_0, y_1, \dots, y_m$ решения дифференциального уравнения в соответствующих точках. Геометрическая интерпретация метода Рунге-Кутты [77] представлена на рисунке 2.7.

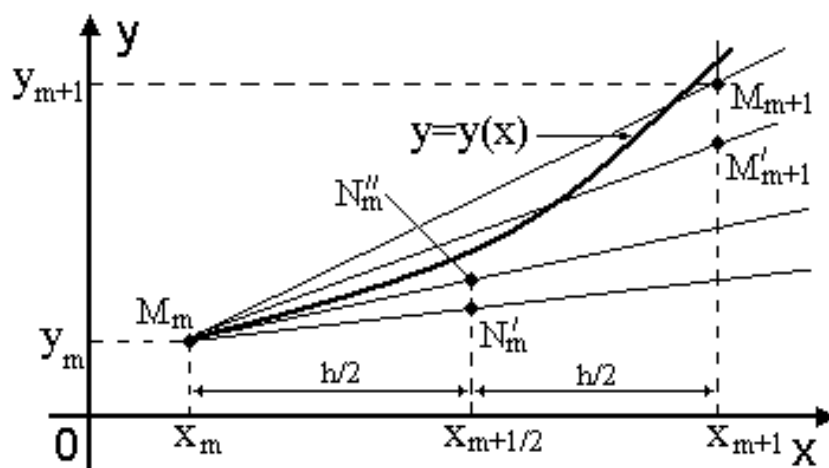


Рисунок 2.7 – Геометрическая интерпретация метода Рунге-Кутты

Рассмотрим отрезок $[x_m; x_{m+1}]$ и найдём по известному значению:

$$y_m = y(x_m) \quad (2.19)$$

Для нахождения значения y_{m+1} , определяем:

$$k_{1m} = f(x_m; y_m). \quad (2.20)$$

Угловым коэффициентом касательной к интегрированной кривой в точке $M(x_m, y_m)$ и точку пересечения прямых:

$$y - y_m = k_{1m}(x - x_m) \quad \text{и} \quad x = x_m + h/2, \quad (2.21)$$

т.е. точку

$$N'_k(x_m + h/2; y_m + (h/2)k_{1m}). \quad (2.22)$$

Находим угловой коэффициент касательной в точке N'_m :

$$k_{2m} = f(x_m + h/2; y_m + (h/2)k_{1m}). \quad (2.23)$$

Из точки M_m проводим прямую с угловым коэффициентом k_{2m} :

$$y - y_m = k_{2m}(x - x_m), \quad (2.24)$$

до пересечения с прямой

$$x = x_m + h/2. \quad (2.25)$$

В результате получаем точку:

$$N''_m(x_m + h/2; y_m + (h/2)k_{2m}). \quad (2.26)$$

Находим угловой коэффициент касательной в точке N''_m :

$$k_{3m} = f(x_m + h/2; y_m + (h/2)k_{2m}). \quad (2.27)$$

Из точки M_m проводим прямую с угловым коэффициентом k_{3m} :

$$y - y_m = k_{3m}(x - x_m), \quad (2.28)$$

до пересечения с прямой:

$$x = x_m + h \quad (2.29)$$

в результате получаем точку

$$M'_{m+1}(x_m + h; y_m + hk_{3m}). \quad (2.30)$$

Определяем угловой коэффициент касательной в точке M'_{m+1} :

$$k_{4m} = f(x_m + h; y_m + hk_{3m}) \quad (2.31)$$

Окончательно направление отрезка ломаной, представляющей приближенное решение задачи, полагаем равным:

$$k_m = \frac{1}{6}(k_{1m} + 2k_{2m} + 2k_{3m} + k_{4m}) \quad (2.32)$$

Проводим из точки M_m прямую

$$y - y_m = k_m(x - x_m) \quad (2.33)$$

до пересечения с прямой

$$x = x_m + h \quad (2.34)$$

в точке

$$M(x_{m+1}, y_{m+1}) = M_{m+1}, \quad (2.35)$$

где

$$y_{m+1} = y_m + h \cdot k_m. \quad (2.36)$$

Считаем приближенным значением решения в точке

$$x_{m+1} = x_m + h. \quad (2.37)$$

Локальная и глобальная (на всем отрезке интегрирования) погрешности метода характеризуются порядками h^5 и h^4 соответственно.

Заметим, что шаг расчета можно менять при переходе от одной точки к другой. Для контроля правильности выбора шага h рекомендуется вычислять дробь:

$$\theta = \left| \frac{k_{2m} - k_{3m}}{k_{1m} - k_{2m}} \right|, \quad (2.38)$$

которая не должна превышать нескольких сотых.

В противном случае шаг следует уменьшить. Грубую оценку погрешности можно получить с помощью двойного просчета по формуле:

$$|y_m^* - y(x_m)| \approx |y_m^* - y_m|/15, \quad (2.39)$$

где $y(x_m)$ - точное решение ДУ в точке x_m , а y_m^*, y_m - приближенные значения, полученные с шагом $h/2, h$ соответственно.

Решением задачи являются значения y_m^* .

Метод Рунге-Кутты для дифференциального уравнения второго порядка

$$y'' = f(x, y, y'), \quad (2.40)$$

с начальными условиями

$$y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y'_0 \quad (2.41)$$

Реализуется по следующей вычислительной схеме:

$$\begin{aligned} k_{1m} &= hf(x_m; y_m; y'_m), \\ k_{2m} &= hf\left(x_m + \frac{h}{2}; y_m + \frac{h}{2}y'_m + \frac{h}{8}k_{1m}; y'_m + \frac{k_{1m}}{2}\right); \\ k_{3m} &= hf\left(x_m + \frac{h}{2}; y_m + \frac{h}{2}y'_m + \frac{h}{8}k_{1m}; y'_m + \frac{k_{2m}}{2}\right); \\ k_{4m} &= hf\left(x_m + h; y_m + hy'_m + \frac{h}{2}k_{3m}; y'_m + k_{3m}\right); \\ y_{m+1} &= y_m + h\left(y'_m + \frac{1}{6}(k_{1m} + k_{2m} + k_{3m})\right); \\ y'_{m+1} &= y'_m + \frac{1}{6}(k_{1m} + 2k_{2m} + 2k_{3m} + k_{4m}), \end{aligned} \quad (2.42)$$

где h – шаг.

С целью проверки математической модели, подставим параметры сепарации из поисковых экспериментов, где диаметр отверстий будет равен 0,004 м и разрежение в них будет равно 280 Па. Линейная скорость вращения барабана будет 0,16 м/с, семя возьмем массой 0,0003 кг, угол наклона составит 4°. Радиус барабана составит 0,0625 м, изготовленного из алюминия с крупнозернистой абразивной обработкой, что дает коэффициент трения 0,61. Коэффициент парусности семян тыквы составляет 0,195.

Так получим решение обыкновенного дифференциального уравнения:

$$\ddot{y} + 0,61\dot{y}^2 = 95,648 \cos y - 156,8 \sin y - 123,09 \quad (2.43)$$

например, на отрезке $x \in [0; 50]$ при:

$$x_0 = 0, y_0 = 0, y'_0 = 0 \quad (2.44)$$

решение, полученное в математических пакетах MathCAD [40] или Python [124] с использованием классического метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности (где шаг определяется адаптивно в ходе вычислений), представляет собой

затухающие колебания. Начиная с $x = 50$, решение сходится к значению $y=0.401$ (рисунок 2.8), приблизительно, что соответствует углу 23° от верхней точки барабана.

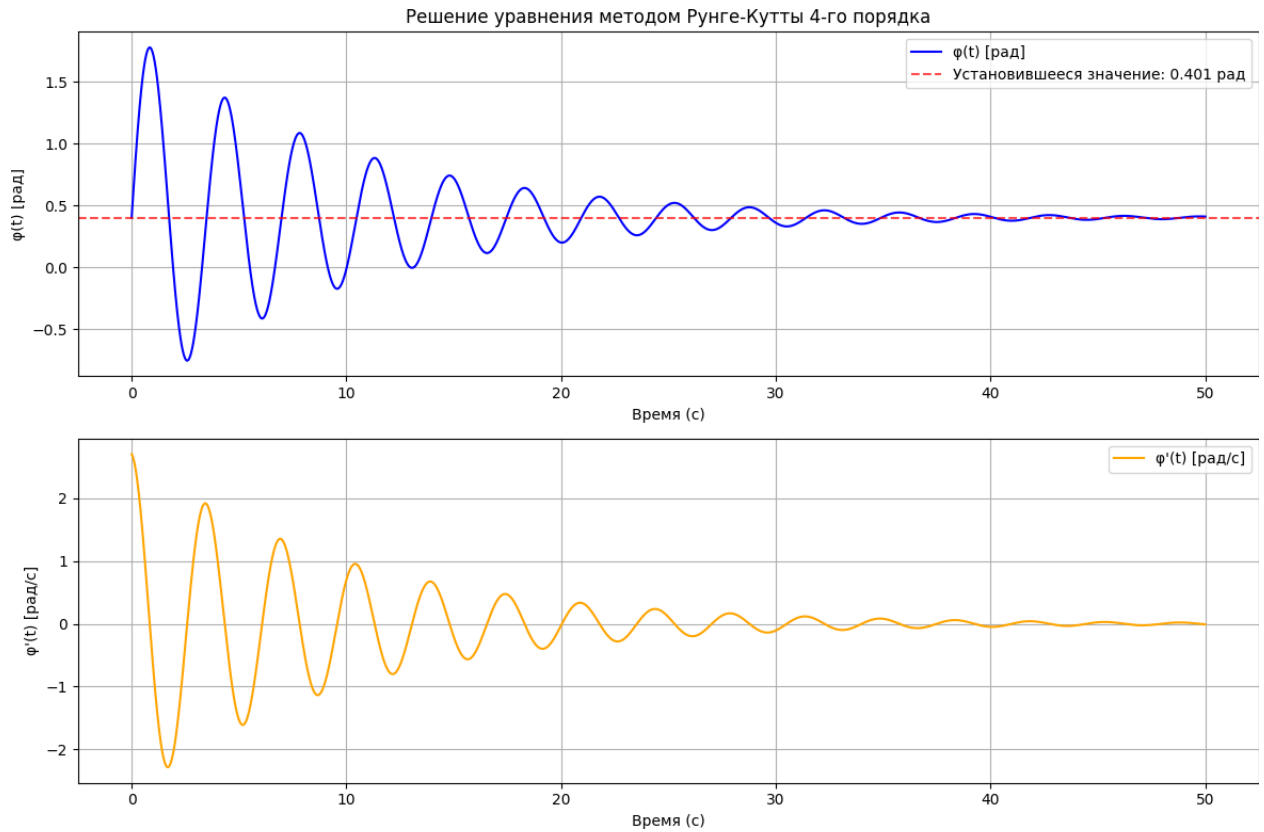


Рисунок 2.8 – График, моделирующий процесс, описанный уравнением

Программное обеспечение типа MathCAD, Python, MATLAB и т.д. помогают избежать ручных громоздких вычислений. Иначе при $h=0,1$ и $x_0=0, y_0=0, y'_0=0$ пришлось бы находить по формулам (2.42) значения y_1 .

Анализируя результаты расчётов, можно сделать вывод, что основное влияние на угол отрыва семени имеет разрежение в воздушных камерах сепаратора, частота вращения барабана на малых оборотах до 1 с^{-1} имеет минимальное влияние, что хорошо заметно на рисунке 2.9.

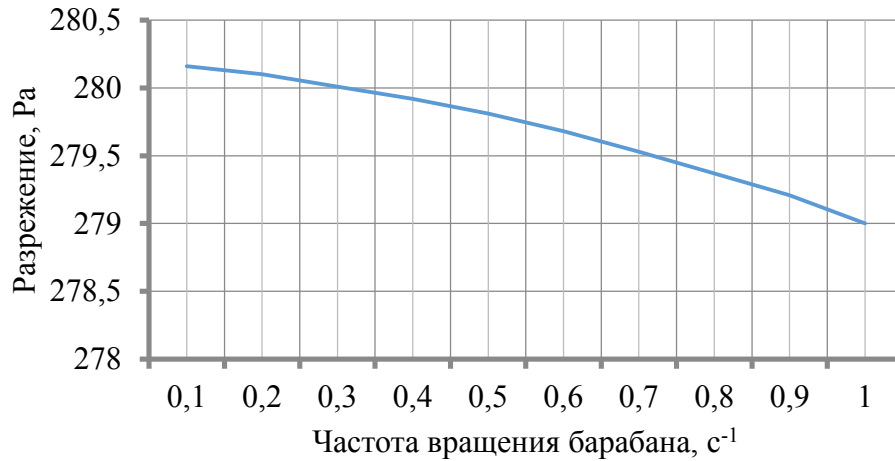


Рисунок 2.9 – Теоретическая зависимость разрежения в воздушной камере от частоты вращения цилиндрического барабана при условии отрыва семени с массой 0,3 г под углом 23 градусов от верхней точки

Расстояние приемного лотка от стенки барабана регулируемое, зная его и диаметр барабана сепаратора, путем элементарных геометрических вычислений узнаем угол отрыва семени от верхней точки, при котором оно попадает в приемный лоток (рисунок 2.10).

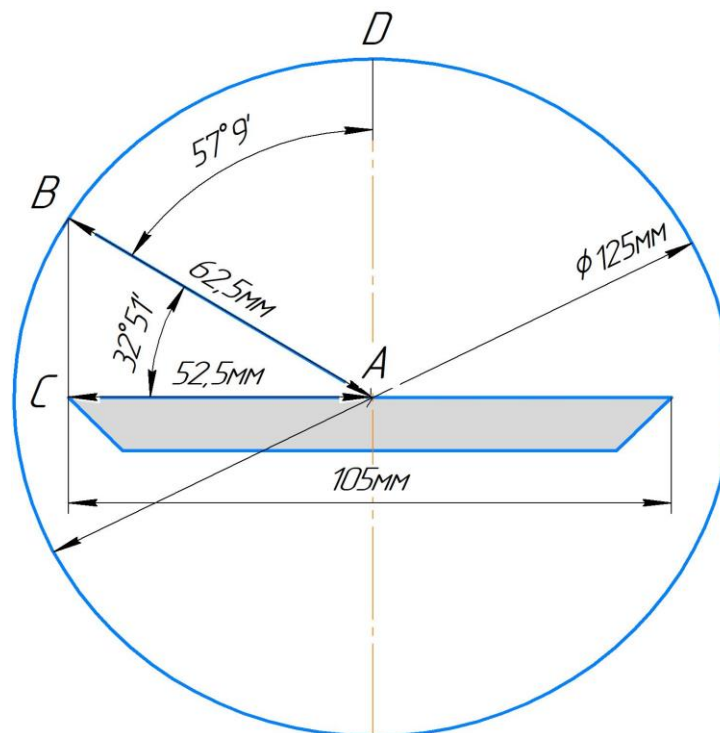


Рисунок 2.10 – Минимальный угол отрыва для попадания в лоток

В соответствии с геометрической схемой на рисунке 2.10, параметры треугольника ABC и углы определяются исходя из заданных конструктивных размеров:

- длина катета AC = 52,5 мм – расстояние от центра барабана до начала стенки приемного лотка;
- длина гипотенузы AB = 62,5 мм – радиус окружности, по которой движется семя при отрыве;
- угол отрыва BAC рассчитывается по теореме косинусов для прямоугольного треугольника:

$$\angle BAC = \arccos \frac{AC}{AB} = \arccos \frac{52,5}{62,6} = \arccos 0,84 = 32^\circ 51', \quad (2.45)$$

тогда минимальный угол отрыва от верхней точки барабана составляет:

$$\angle BAD = \angle CAD - \angle BAC = 90^\circ - 32^\circ 51' = 57^\circ 9'. \quad (2.46)$$

Путем геометрических вычислений выяснено, что необходимо задать такие условия воздействия на семя, при которых максимальный угол отрыва от верхней точки цилиндра будет составлять 57° и $9'$, для попадания семени в приемный лоток. Полученный угол отрыва 23° в результате решения уравнения (2.43) соответствует данному требованию. Основным влияющим фактором на угол отрыва семени является разрежение в отверстиях рабочей поверхности.

В соответствии с принятыми допущениями математической модели, для минимизации вероятности преждевременного отрыва семян необходимо обеспечить их отрыв с запасом по углу относительно начального положения, соответствующего попаданию в приёмный лоток. При этом следует избегать избыточного разрежения, которое может привести к попаданию в лоток более тяжёлых семян. Для обеспечения гибкости настройки процесса сепарации приёмные лотки должны быть регулируемы.

2.3 Моделирование работы камеры разрежения сепаратора

Одной из целей теоретических исследований является нахождение рациональных параметров рабочих органов сепаратора, которые обеспечат эффективность работы при проведении практических исследований сепаратора.

В современной инженерии важное место занимают программные определения рациональных параметров деталей и узлов при использовании метода конечных объемов [61]. Концепцией данного метода является аппроксимация непрерывной величины дискретной моделью на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Преимуществом данного метода перед аналитическим является большой диапазон сложнейших прикладных задач, не требующий множества допущений, которые уменьшают точность расчета. Также в данном методе доступна любая геометрия и граничные условия.

В данной работе проводятся исследования для получения рациональной формы камеры разрежения с учетом газодинамических характеристик изделия.

При моделировании исходной и разработанной камер разрежения использовали программу для общего параметрического моделирования потока SolidWorks Flow Simulation. После введения начальных и граничных условий (табл. 2.1) провели моделирование воздушных потоков и распределения разрежения в воздушных камерах. Участки воздушной камеры с перепадами давлений определяли при помощи цветовой гаммы и индикатора атмосферного давления. Чем ниже атмосферное давление, тем выше на данном участке разрежение. Путем вытяжения стенок воздушной камеры в местах перепадов разрежения в исходной воздушной камере создали условия для более равномерного распределения разрежения в разработанной камере. Начальные условия для моделирования процесса представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Начальные условия для моделирования процесса

Параметры	Значение
Термодинамические параметры: статическое давление, Па температура, К	101325 293,20
Вектора скорости в направлениях X, Y, Z, м/с	0
Параметры турбулентности: интенсивность, % масштаб длины, м	2,00 8,050e-04
Поверхность барабана	внутренняя
Система координат	глобальная
Базовая ось	X
Тип пограничного слоя	турбулентный

Результаты моделирования воздушных потоков и распределения разрежения в воздушных камерах представлены на рисунках 2.11 – 2.14.

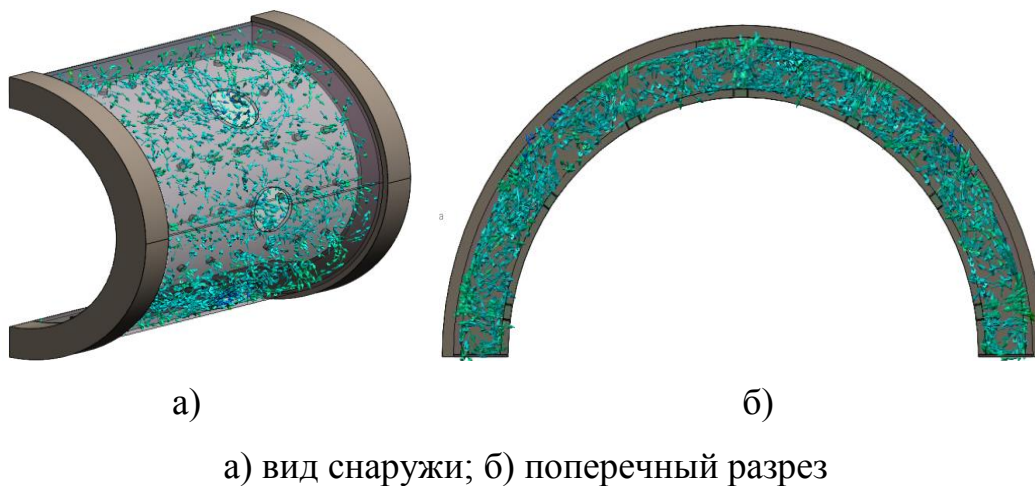


Рисунок 2.11 – Моделирование воздушного потока в исходной камере разрежения

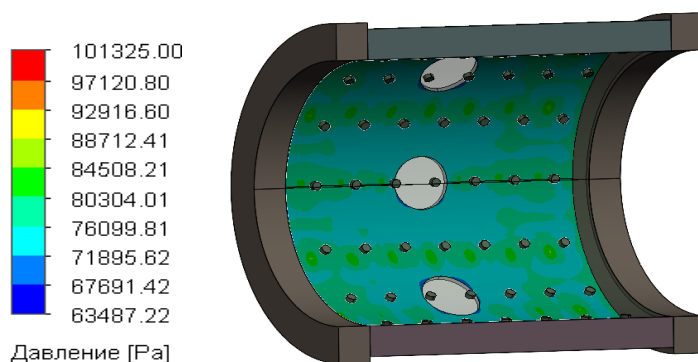
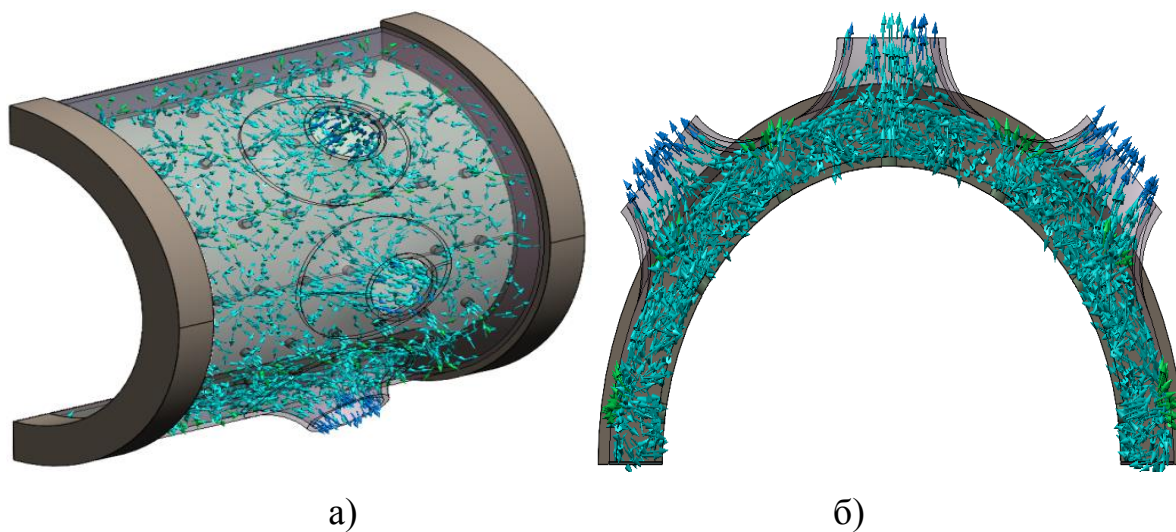


Рисунок 2.12 – Моделирование перепадов давления в исходной камере разрежения (вид изнутри)



а) вид снаружи; б) поперечный разрез
а) вид снаружи; б) поперечный разрез

Рисунок 2.13 – Моделирование воздушного потока в разработанной камере разрежения

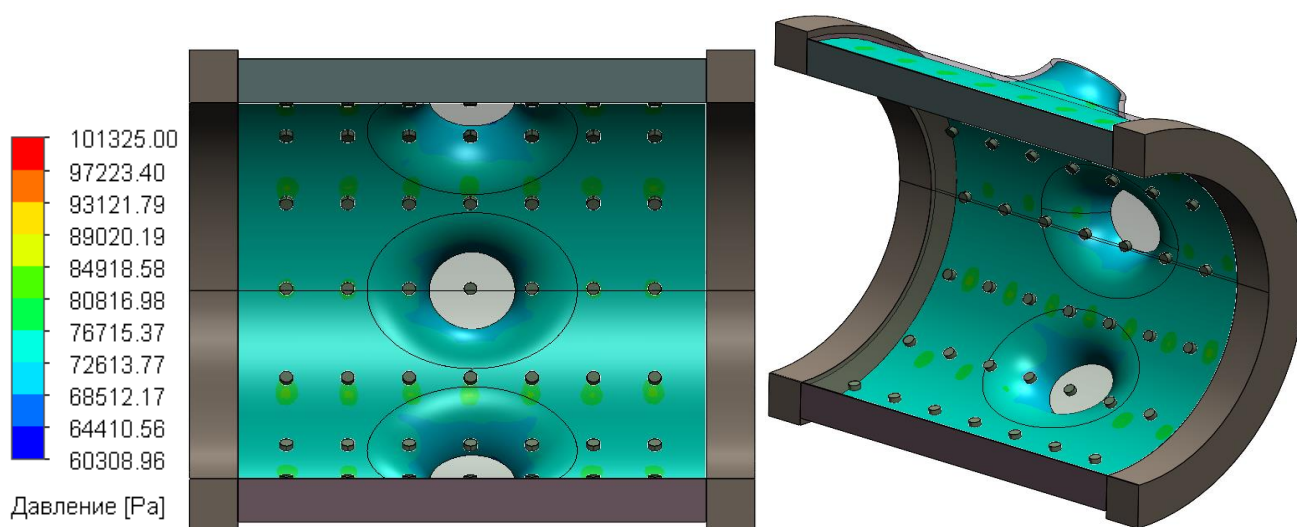
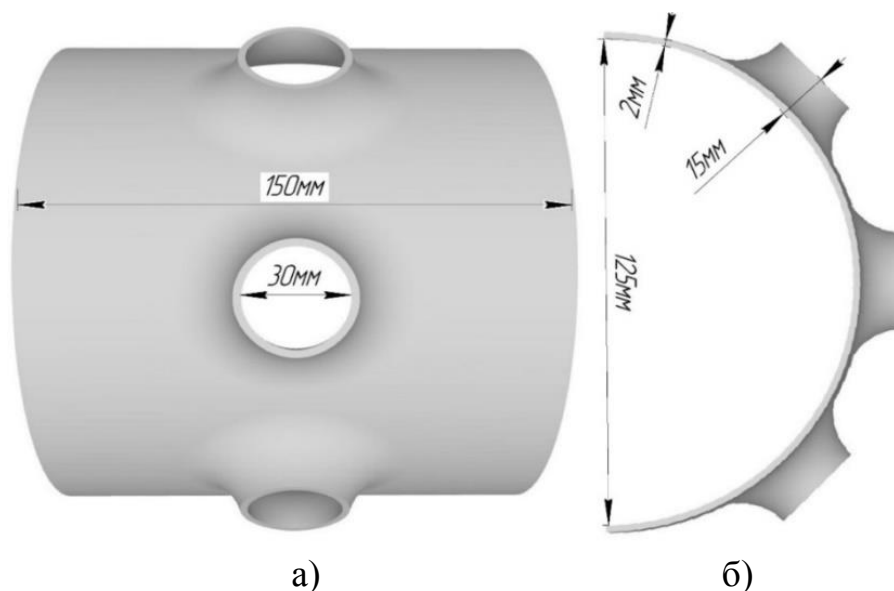


Рисунок 2.14 – Моделирование перепадов давления в разработанной камере разрежения (вид изнутри)

Геометрические параметры разработанной воздушной камеры представлены на рисунке 2.15.



а) вид снаружи; поперечный разрез

Рисунок 2.15 – Габаритная схема воздушной камеры

Результаты моделирования процесса сепарации с учетом заданных начальных и граничных условий по двум камерам представлены в таблице 2.2. Аэродинамический расчет подтвердил достоинства разработанной формы камеры.

Таблица 2.2 – Расчетные значения показателей исходной и разработанной камер разрежения

Показатель	Исходная камера		Разработанная камера	
	Минимальное значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Максимальное значение
Давление, Па	63487,22	101325,00	60308,96	101325,00
Плотность (текущая среда), кг/м ³	0,71	1,20	0,69	1,20
Скорость, м/с	0	230,424	0	237,239
по оси X	-91,678	223,652	-103,279	237,224
по оси Y	-217,079	216,390	-227,073	226,453
по оси Z	-136,611	147,555	-138,096	155,217
Температура, К	289,64	316,61	288,94	318,61
Температура (текущая среда), К	289,64	316,61	288,94	318,61
Завихренность, 1/с	67,36	244164,23	121,06	217622,12
Скорость во вращающейся системе координат, м/с	0	230,424	0	237,239
по оси X, м/с	-91,678	223,652	-103,279	237,224

Показатель	Исходная камера		Разработанная камера	
	Минимальное значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Максимальное значение
по оси Y, м/с	-217,079	216,390	-227,073	226,453
по оси Z, м/с	-136,611	147,555	-138,096	155,217
Число Маха	0	0,67	0	0,70
Касательное напряжение, Па	0	66,49	0	155,23
Относительное давление, Па	-37837,78	0	-41016,04	0
Индикатор неколлинеарности теплового потока	2,0008332e-06	1,0000000	4.6648228e-06	1,0000000
Индикатор теплового сопротивления	2,2146269e-08	1,0000000	1,4399799e-07	1,0000000
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	0	0	0	0
Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м ²	0	0	0	0
Поверхностная плотность теплового потока (конвекция), Вт/м ²	2,918e+07	7.173e+07	-2,644e+07	7.232e+07
Акустическая мощность, Вт/м ³	0	650,909	0	7258,110
Уровень акустической мощности, дБ	0	148,14	0	158,61

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

- наблюдается уменьшение разрежения в разработанной воздушной камере (за счет обтекаемой формы обеспечивается более равномерный поток на выходные патрубки);
- в разработанной камере создается значительно меньше воздушных завихрений, что положительно сказывается на равномерности разрежения;
- чем ближе отверстия цилиндра камеры расположены к выходным патрубкам, тем выше разрежение в исходной и предложенной камерах;
- разработанная камера разрежения более целесообразна к применению, поскольку выполняется требование более равномерного распределения разрежения по всей камере.

Наиболее подходящим методом для получения обтекаемой формы корпуса камеры разрежения является метод аддитивных технологий [91, 147].

2.4 Определение основных показателей работы сепаратора

Одним из важных условий для качественного разделения семян новым сепаратором является попадание каждого семени на присасывающие отверстия. Для этого важно, чтобы объем подачи семян на сепарирующую поверхность не превышал пропускную способность сепаратора при текущем режиме работы. В противном случае будет ухудшение качества разделения семян в следствии попадания некондиционных семян в тяжелую фракцию из-за того, что прошли через барабан не присосавшись к отверстию.

С учетом конструкции сепаратора, пропускная способность рассчитана по формуле [128 с. 17]:

$$Q = 10^2 \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot n \cdot \chi \cdot m \cdot k = 10^2 \cdot 3,14 \cdot 0,125 \cdot 0,3 \cdot 24 \cdot 250 \cdot 0,00035 \cdot 0,06 = 0,0247 \quad (2.47)$$

где D – диаметр цилиндра, м;

L – длина цилиндра, м;

n – частота вращения, с^{-1} ;

χ – присасывающих отверстий на 1 м^2 на рабочей поверхности, шт.;

m – средняя масса семени, выбираемая ячейкой, кг;

k – коэффициент использования рабочей поверхности.

Частота вращения сепарирующей поверхности оказывает прямое влияние на пропускную способность сепаратора (рисунок 2.16).

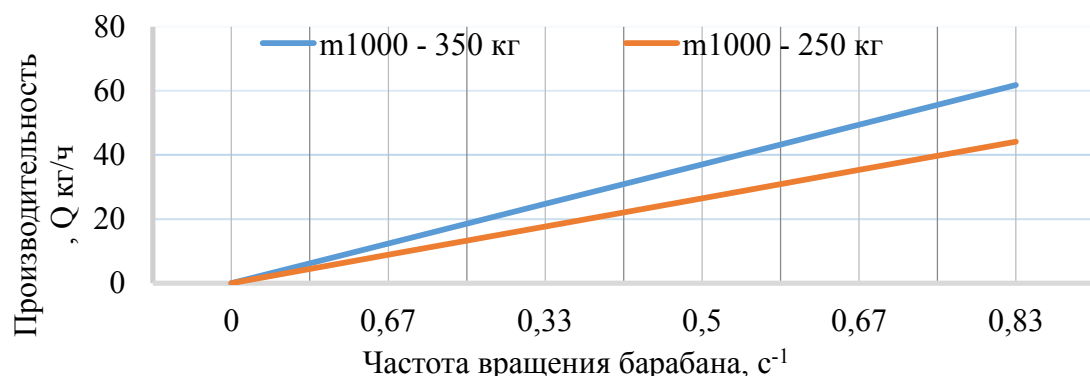


Рисунок 2.16 – Зависимость пропускной способности сепаратора от частоты вращения рабочего органа

Для расчета потребления электроэнергии лабораторного образца сепаратора необходимо определить параметры вентилятора, способного стабильно обеспечивать показатели разрежения, учитываемые в математической модели.

На разрежение в отверстиях сепарирующей поверхности влияет производительность вентилятора Q и сопротивление всей воздушной системы сепаратора. В случае с нашей конструкцией сепаратора крайне сложно точно рассчитать сопротивление воздушной системы, учитывая большое количество пневмотрубопроводов и других элементов сложной формы. Эффективнее рассчитывать рациональную производительность вентилятора для сепаратора, опираясь на выходные показатели разрежения любого экспериментального вентилятора, показатели давления которого численно превышают требуемое разрежение в отверстиях для работы сепаратора. В качестве экспериментального вентилятора взят вентилятор «Улитка» мощностью 750 ватт, давлением 1900 Па и производительностью 17 м^3 в минуту. Подключив его к рабочему органу сепараторов, получили разрежение в камерах 270 Па. Для того что бы иметь возможность полноценно настраивать сепаратор, нам необходим вентилятор с возможностью поддерживать стабильно разрежение в воздушных камерах не менее 300 Па при открытых заслонках.

Рассчитаем аэродинамическое сопротивление системы, $\text{Па}/(\text{м}^3/\text{мин})^2$ [54 с. 58] (R):

$$\Delta P_1 = R \cdot Q_1^2, \quad (2.48)$$

где ΔP_1 – разрежение при использовании текущего вентилятора, Па;

Q_1 – производительность текущего вентилятора, $\text{м}^3/\text{мин}$

$$R = \frac{\Delta P_1}{Q_1^2} = \frac{270}{17^2} = 0.934. \quad (2.49)$$

В качестве более подходящего вентилятора рассмотрим вентилятор радиальный ERA BURAN 260 4K M L мощностью 350 ватт, производительностью 21.67 м^3 в минуту и давлением 1100 Па.

Для получения теоретического разрежения на рабочей поверхности подставим производительность нового вентилятора:

$$\Delta P_2 = R \cdot Q_2^2 = 0.934 \cdot 21.67^2 = 438, \quad (2.50)$$

где Q_2 – производительность нового вентилятора, м³/мин.

Зависимость теоретического разрежения на рабочей поверхности сепаратора от производительности вентилятора можно представить графически (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 – Теоретическая зависимость разрежения на рабочей поверхности от производительности вентилятора

Поскольку вентилятор при работе на полную мощность создаёт разрежение, превышающее требуемое для сепаратора, при настройке устройства целесообразно использовать регулятор частоты вращения крыльчатки. Это позволит снизить энергопотребление и без того экономичного выбранного вентилятора по сравнению с первым. Расчёт мощности (кВт·ч) выполнен по формуле [111, с. 18]:

$$N_{\text{вент}} = \frac{Q_2 \cdot \Delta P_2}{\eta \cdot 3600} \cdot 0,001, \quad (2.51)$$

где η – КПД выбранного вентилятора.

В соответствии с ГОСТ 5976–73 [32 с. 6] $\eta = 0,6$, тогда

$$N_{\text{вент}} = \frac{1300 \cdot 438}{0,6 \cdot 3600} \cdot 0,001 = 0,276. \quad (2.52)$$

Помимо вентилятора сепаратора электроэнергию потребляет и привод. Удельные затраты мощности приводного двигателя от частоты вращения рабочей поверхности определим по формуле:

$$P_y = \frac{P_{\text{х.х.мак}}}{n_{\text{б.мак}}} = \frac{0,3}{50} = 0,006, \quad (2.53)$$

где P_y – удельный расход мощности двигателя Вт·мин/об;

$P_{\text{х.х.мак}}$ – мощность на холостой ход при максимальной частоте вращения рабочего органа, Вт;

$n_{\text{б.мак}}$ – максимальная теоретически обоснованная частота вращения рабочего органа, $n_{\text{б.мак}} = 50 \text{ мин}^{-1}$.

КПД передачи [116 с. 94] для конструкции исследуемого сепаратора определяется по формуле:

$$\eta_{\text{пер}} = \eta_m \cdot \eta_p \cdot \eta_{p.n} \cdot \eta_{n.n}^i, \quad (2.54)$$

где η_m – КПД муфты;

η_p – КПД редуктора;

$\eta_{p.n}$ – КПД ременной передачи;

$\eta_{n.n}^i$ – КПД пар роликовых подшипников (степень определяет количество пар подшипников).

Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивлений при вращении цилиндрического рабочего органа (кВт), определяется по формуле:

$$P_1 = \frac{P_y}{\eta_{\text{пер}}} n = \frac{0,006}{0,85} 24 = 0,1694, \quad (2.55)$$

где $\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи;

n – частота вращения рабочего органа, мин^{-1} .

Мощность, затрачиваемую на подъем семян в барабане сепаратора (Вт), рассчитаем по формуле:

$$P = K \cdot Q \cdot g \cdot R = 2 \cdot 0,0247 \cdot 9,81 \cdot 0,0625 = 0,0302 \quad (2.56)$$

где: K – коэффициент, учитывающий трение и эффективность процесса;

Q – производительность сепаратора, кг/с;

g – ускорение свободного падения;

R – радиус барабана, м.

Зададимся дополнительными параметрами при исследовании затрат мощности на привод барабана: $P_{x.x.мак} = 0,3$ кВт, $n_{б.мак} = 50$ мин⁻¹, $P_y = 0,006$ кВт·мин/об, $\eta_{пер} = 0,85$. Зависимость потребления электроэнергии электроприводом сепаратора от частоты вращения рабочего органа представим графически (рисунок 2.18).

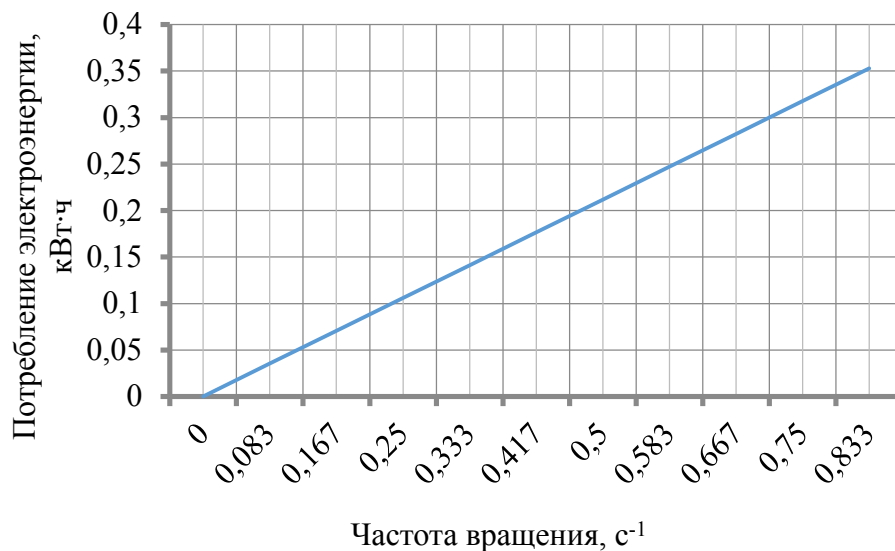


Рисунок 2.18 – Теоретическая зависимость потребления электроэнергии привода сепаратора от частоты вращения рабочего органа

2.5 Выводы по главе

1. Рассмотрена модель функционирования пневматического сепаратора (2.4), разработана и обоснована конструктивно-технологическая схема (2.2).

2. Составлена схема сил, действующих на семя в процессе сепарации новым пневматическим сепаратором, к которой разработана математическая модель, позволяющая определить угол отрыва в зависимости от заданных параметров.

Математическая модель показала, что при заданных параметрах работы сепаратора, угол отрыва семени массой 0,0003 кг составит 23° от верхней точки барабана, что соответствует условию попадания семени в приемный лоток.

3. Теоретически, методом программного аэродинамического моделирования определена эффективность текущей и предложенной камеры разрежения. Установлено, что предложенный вариант обеспечивает более равномерное разрежение на рабочей поверхности сепаратора.

4. Исходя из параметров сепаратора, рассчитана пропускная способность сепаратора, которая равна 24,7 кг/ч при расчётных параметрах.

5. Определены теоретические зависимости разрежения на рабочей поверхности сепаратора от производительности вентилятора и потребления электроэнергии привода от частоты вращения. Подобран рациональный вентилятор ERA BURAN 260 4K M L для использования в конструкции, для поддержания необходимого разрежения в воздушных камерах вентилятор будет затрачивать 0,276 кВт·ч, потребление электропривода на вращение барабана составит 0,176 кВт·ч при частоте вращения $0,41 \text{ с}^{-1}$.

ГЛАВА 3

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

3.1 Программа экспериментальных исследований

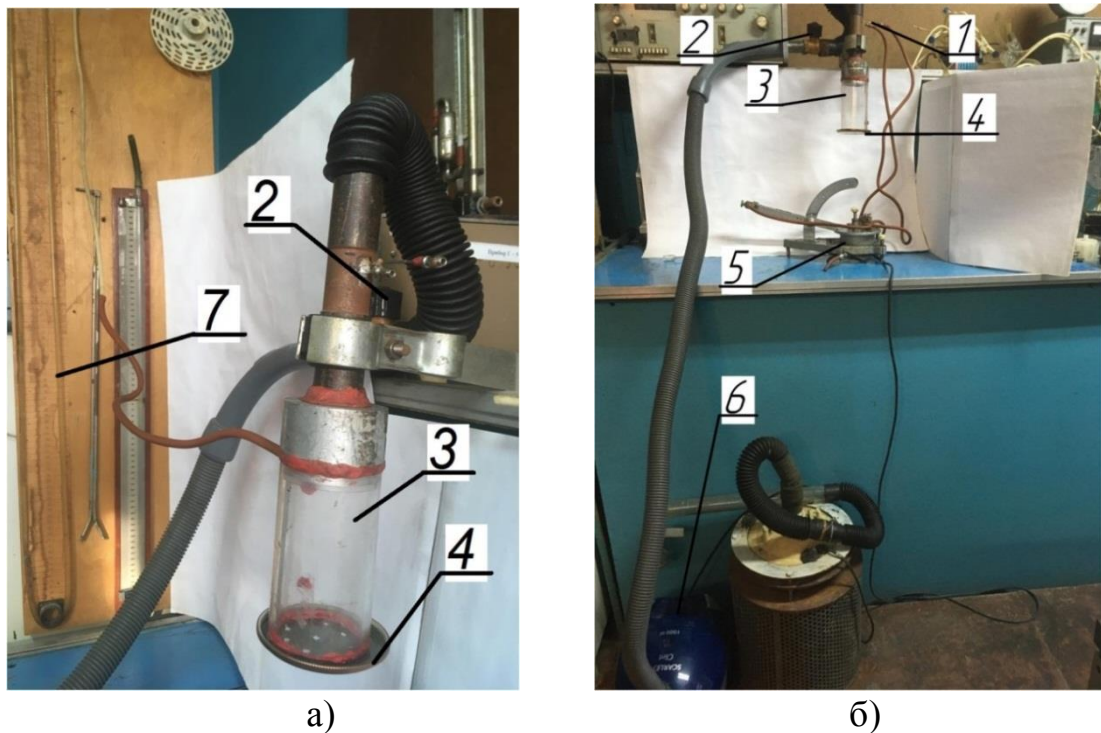
Целью проведения лабораторных исследований является подтверждение теоретических предпосылок из второго раздела, а также определение рациональных параметров и режимов работы рабочих органов пневматического сепаратора, а также их степень влияния на производительность и качество разделения семян. Планирование экспериментов проводилось с учетом рассмотренных методик [56, 73]. Измерительные приборы для лабораторных исследований представлены в приложении К.

Программа экспериментальных исследований состоит из следующих задач:

- провести исследования выбранных сепарирующих поверхностей на способность удерживания семян тыквы разной массы;
- экспериментально подтвердить результаты моделирования работы камеры разрежения, проанализировать перепады разрежения в разных частях воздушных камер двух видов;
- исследовать разделение семян тыквы с целью нахождения рациональных параметров работы сепаратора;
- выявить оптимальные параметры работы основных рабочих органов сепаратора многофакторным экспериментом;
- исследовать разделение семян тыквы на разных сепарирующих поверхностях с целью определения наиболее эффективного;
- исследовать разделение семян огурца на экспериментальной рабочей поверхности сепаратора;
- разработать и собрать лабораторную установку для исследования разделения семян.

3.2 Методика исследования сепарирующих поверхностей

Исследование различных типов рабочих поверхностей, применяемых при сепарации семян, с целью выбора наиболее рационального варианта проводится на подготовленном стенде. Исследуемая поверхность крепится к камере разрежения, откуда высасывается воздух пылесосом через регулировочный вентиль. Цель опыта: определить показатели скорости воздушного потока и разрежение в воздушной камере в момент отрыва семени с рабочей поверхности. Скорость воздушного потока определяется при помощи микроманометра и трубки Пито [37], а разрежение при помощи U-образного манометра (рисунок 3.1).



а) вид сбоку; б) вид спереди

1 – трубка Пито; 2 – регулировочный вентиль; 3 – камера разрежения;
4 – экспериментальная поверхность; 5 – микроманометр; 6 – пылесос;
7 – U - образный манометр

Рисунок 3.1 – Оборудование для определения эффективности сепарирующей поверхности

Среди исследуемых поверхностей сетчатая поверхность, ровное решето, решето с ячейками под семена, а также резиновое решето с ячейками (рисунок 3.2). Берутся четыре семени массой $0,57 \cdot 10^{-3}$ кг, $0,46 \cdot 10^{-3}$ кг, $0,35 \cdot 10^{-3}$ кг и $0,25 \cdot 10^{-3}$ кг. Эксперимент проводится с трехкратной повторностью и заносится в таблицу Microsoft Excel для обработки [115].



а)



б)



в)

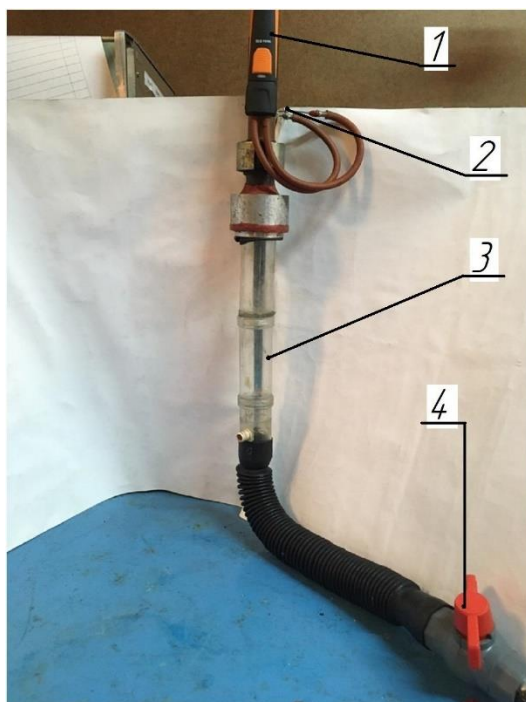


г)

а) сетчатая поверхность; б) решето; в) решето с ячейками по форме семени;
г) резиновое решето с ячейками по форме семени

Рисунок 3.2 – Исследуемые поверхности

Для исследования влияния на прижатие семени к поверхности аэродинамической силы проводится схожий эксперимент, где семя удерживает именно набегающий на него воздушный поток (рисунок 3.3).



а)



б)

а) оборудование для исследования; б) семя в состоянии витания:

1 – смарт-зонда Testo 510i; 2 – трубка Пито Прандтля; 3 – трубка с семенем;
4 – регулировочный вентиль

Рисунок 3.3 – Исследование аэродинамического воздействия на семя

Семена массой $0,24 \cdot 10^{-3}$ кг, $0,3 \cdot 10^{-3}$ кг, $0,37 \cdot 10^{-3}$ кг, $0,45 \cdot 10^{-3}$ кг и $0,5 \cdot 10^{-3}$ кг поочередно помещаются в прозрачную трубку, с двух сторон которой была сетчатая поверхность. Снизу на семя подается воздушный поток пылесосом через регулировочный вентиль, в результате чего оно прижимается к верхней сетке. Далее подача воздуха постепенно уменьшается до момента, когда семя оторвется и перейдет в состояние витания. Скорость воздушного потока в момент отрыва семени фиксируется при помощи смарт-зонда Testo 510i с трехкратной повторностью.

Определяется коэффициент внешнего трения семян тыквы по рабочим поверхностям. Для этого используется лабораторная установка типа «наклонная плоскость», изображенная на рисунке 3.4. Повторность опыта пятикратная с вычитыванием среднего показателя.



Рисунок 3.4 – Лабораторная установка «наклонная плоскость»

Определяется статический и динамический коэффициент трения [113 с. 109] по выбранным сепарирующим поверхностям

$$f_{cm} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.1)$$

где f_{cm} – статический коэффициент трения;

φ – угол начала скольжения о поверхность, град;

$$f_{\partial} = (0,6...0,7) \cdot f_{cm}, \quad (3.2)$$

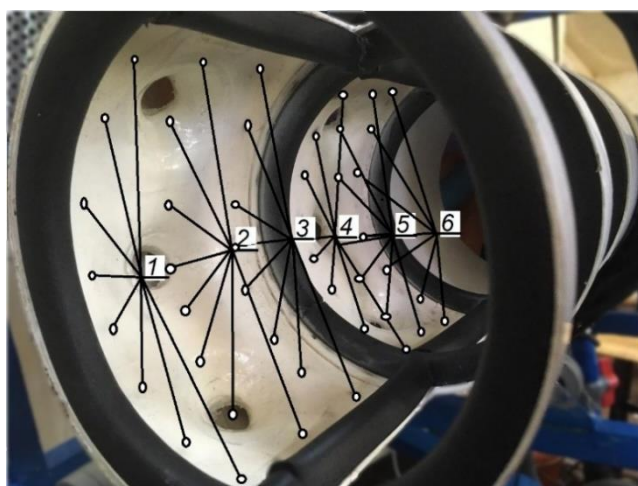
где f_{∂} – динамический коэффициент трения.

Помимо силы вакуумного присасывания, во время сепарации на семя действует аэродинамическая сила. Она формируется за счет набегающего воздушного потока к свободным отверстиям, которые находятся рядом с семенем. Если семя прилегает к отверстию не герметично, что характерно для металлических сепарирующих поверхностей, подсасывающийся воздух влияет на аэродинамическую силу. Для измерения скорости воздушного потока, воздействующего на семя, изготовлена модифицированная трубка Пито Прандтля, которая подключается к смарт-зонду Testo 510i. Ее достоинством является компактный наконечник с возможностью регулировки его угла за счет подтягивания трубки полного давления (рисунок 3.5). Перед применением изготовленная трубка Пито проходит тарирование со стандартной трубкой.



Рисунок 3.5 – Модернизированная трубка Пито Прандтля со смарт-зондом Testo 510i

Для точности опыта замеры делаются по центру и на боковых частях обеих камер разрежения. Показатели измеряются при присасывании семени к каждому из рабочих отверстий в этих участках камеры. В итоге получаются усредненные показатели скорости воздушного потока на шести участках рабочей поверхности (рисунок 3.6).



а)



б)

а) точки измерений; б) процесс замера

Рисунок 3.6 – Измерение скорости воздушного потока воздействующего на семя

Измерение скорости воздушного потока на рабочей поверхности необходимо для понимания степени влияния аэродинамической силы на сепарацию семян и для точного расчета математической модели процесса сепарации.

Очевидно, что при использовании ровного решета ключевую роль в процессе сепарации имеет сила вакуумного присасывания. Для понимания того, какая скорость воздушного потока на семя необходима для удерживания семени на поверхности, проводится дополнительный опыт с нагнетанием воздуха снизу на семя на собранном стенде для воздействия на него только аэродинамической силой.

Для исследования эффективности сепарации выбранных поверхностей, представленных на рисунках 3.7–3.10, где, а – вид изнутри; б – вид снаружи. Они были изготовлены и интегрируются в конструкцию сепаратора для исследования качества сепарации.



а)

б)

Рисунок 3.7 – Сепарирующая поверхность (ровное решето $d = 4$ мм, $t = 20$ мм)



а)

б)

Рисунок 3.8 – Сетчатая сепарирующая поверхность ($a = 1 \times 1$ мм)



а)

б)

Рисунок 3.9 – Сепарирующая поверхность (решето с ячейками $d = 4$ мм, $t = 20$ мм)



а)

б)

Рисунок 3.10 – Сепарирующая поверхность (резиновое решето с ячейками $d = 4$ мм, $t = 20$ мм)

3.3 Методика исследования работы воздушных камер пневматического сепаратора

Для обеспечения необходимой силы вакуумного присасывания были изготовлены камеры разрежения (рисунок 3.11), откуда высасывается воздух с трех точек для относительного выравнивания степени разрежения по всей площади рабочей поверхности.



а) вид изнутри; б) вид снаружи

Рисунок 3.11 – Исходные воздушные камеры разрезания с гофрами

Разрезание в каждой камере регулируется при помощи вентиля, через которые проходит воздушный поток от вакуумного двигателя. Резиновые перегородки способствуют плотному прилеганию к рабочей поверхности барабана сепаратора.

Согласно результатам поисковых экспериментов [66, 69, 72], исходная камера разрезания не способна обеспечить достаточно равномерного вакуумметрического давления в разных ее участках, что негативно сказывается на качестве сепарации.

В программе SolidWorks Flow Simulation была разработана новая форма воздушной камеры, моделирование ее работы показало значительно более равномерное разрезание на фоне исходной. Для подтверждения результатов программного аэродинамического расчета и повышения качества сепарации разработанные воздушные камеры были напечатаны на 3d принтере. Пластик был выбран типа PETG от производителя НИТ, по своим характеристикам отвечающий нашим требованиям по механической прочности и теплостойкости [105]. После сборки разработанная камера разрезания была собрана и установлена в конструкцию сепаратора (рисунок 3.12).



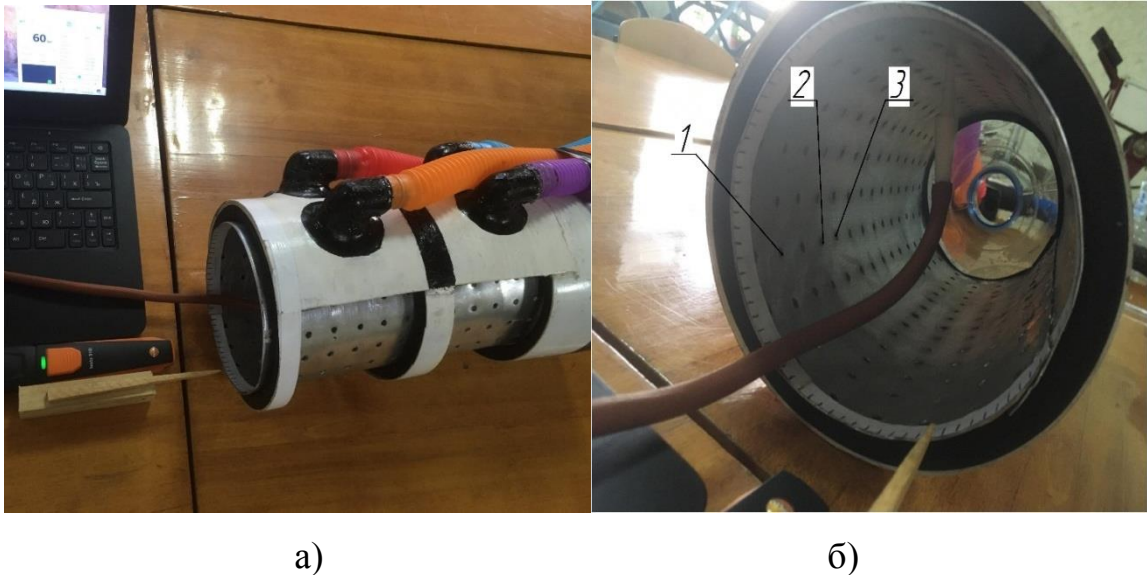
а)

б)

а) вид изнутри; б) вид снаружи

Рисунок 3.12 – Разработанные воздушные камеры разрежения с гофрами

Для проверки результатов программного аэродинамического расчета проводится опыт по измерению перепадов разрежения в двух видах камер разрежения при одинаковых условиях работы. Измерения проводятся на каждом из 5 рядов отверстий воздушной камеры. К одному из отверстий рабочей поверхности присоединяется трубка со смарт-зондом Testo 510i. Поверхность сепаратора вращается с линейной скоростью, $0,5 \text{ см/с}$, что равняется $0,08 \text{ с}^{-1}$. Прибор фиксирует вакуумметрическое давление с частотой один раз в секунду на протяжении прохождения всей рабочей зоны воздушной камеры. Эксперимент проходит с трехкратной повторностью, данные автоматически сохраняются в формате Microsoft Excel для дальнейшей обработки. Для контроля линейной скорости вращения на поверхность клеится мерная лента с пометками $0,005 \text{ м}$, и используется метроном, настроенный на 60 bpm (рисунок 3.13).



а) вид сверху; б) вид изнутри: 1, 2, 3 – траектории движения семени для измерений

Рисунок 3.13 – Исследование равномерности давлений в воздушных камерах пневматического сепаратора

3.4 Планирование однофакторных экспериментов по разделению семян для нахождения рациональных параметров сепаратора

Для определения рациональной частоты вращения барабана при сепарации проводится опыт (рисунок 3.14), в котором одни и те же семена разделяются на три фракции с трехкратной повторностью [62], с последующим постепенным повышением частоты вращения барабана от минимальной величины до потери качества разделения. При этом все остальные параметры работы сепаратора остаются неизменными. Отслеживается средняя масса каждой фракции семян, а также процентное содержание их среди всех семян. Эталонным результатом сепарации считается, когда средняя масса семян «Волжская серая» соответствует $0,3 \cdot 10^{-3}$ кг, значению для посевных семян в продаже для этого сорта, при этом в посевную фракцию попадает максимальный процент семян.

Для измерения частоты вращения барабана используется лазерный цифровой тахометр, который закреплен на раме сепаратора и направлен на

ведущую шестерню привода с отражающей поверхностью. Частота вращения барабана определяется по передаточному числу с шестерни на барабан по пропорциям их диаметра.



а)



б)

а) измерение частоты вращения барабана; б) процесс разделения семян

Рисунок 3.14 – Исследование сепарации семян при разной частоте вращения барабана

Для определения рационального вакуумметрического давления в воздушных камерах при сепарации проводится аналогичный опыт, в котором семена делятся с последующим повышением разрежения в камерах, которое регулируется при помощи вентиля, изображенных на рисунке 3.15, и измеряется цифровым микроманометром.



Рисунок 3.15 – Вентили для регулировки разрежения в воздушных камерах

Для определения рационального угла наклона рабочей поверхности сепаратора проводится так же однофакторный эксперимент, где угол наклона увеличивается после каждой трехкратной повторности сепарации семян. Угол увеличивается до полной потери эффективности сепарирования. Для определения угла наклона угломер электронный SKATA «Архимед» устанавливается непосредственно на раму лабораторной установки (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Измерение наклона рабочего органа сепаратора

Для определения рациональной производительности сепаратора проводится опыт, при котором берется емкость с семенами массой 0,1 кг и равномерно подаются в семяпровод сепаратора за разное кол-во времени. Время, за которое семена полностью подаются на рабочую поверхность, постепенно уменьшается до полной утери качества сепарации.

Производительность сепаратора определяется по формуле:

$$Q_{\text{кг/ч}} = \frac{m}{t}, \quad (3.3)$$

где m – масса сепарируемых семян, кг;

t – время подачи на рабочую поверхность, сек.

При проведении данной серии однофакторных экспериментов важным условием является использование одних и тех же семян, а также тщательное

перемешивание семян из различных фракций перед повторной подачей их в питатель.

3.5 Планирование многофакторного исследования разделения семян тыквы

По окончании серии однофакторных экспериментов берутся в учет найденные рациональные показатели факторов для сепарации семян бахчевых культур. Для исследования функциональной зависимости качества сепарации от нескольких параметров необходимо решить задачу оптимизации. Многофакторный эксперимент обеспечивает построение более точной математической модели исследуемого процесса и позволяет определить условия, наиболее близкие к оптимальным.

При подготовке к многофакторному эксперименту выбираются факторы в количестве трех, от которых зависит угол отрыва семени от барабана для попадания в приемный лоток сепаратора, влияющие на качество сепарации. Частота вращения барабана в с^{-1} , разрежение в воздушных камерах в Па и угол наклона барабана в градусах.

При планировании трехфакторного эксперимента рассмотрены соответственные методические материалы [5, 41, 86]. Выбранные параметры в эксперименте варьируются и принимаются в кодированном виде. Основным уровнем фактора принят как «0», а нижний и верхний как «-1» и «+1». Заданные натуральные значения факторов пересчитываются путем линейной интерполяции значений

$$x_i = \frac{X_i - x_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (3.4)$$

где x_i – значение i -го в натуральном виде;

ΔX_i – интервал варьирования фактора i .

В соответствии с методикой проведения эксперимента предполагается проведение десяти серий экспериментов, каждая из которых включает в себя три повторности.

Полученные результаты эксперимента обрабатываются при помощи компьютерных программ PlanExp B-D13 и Python [152].

После формирования математической модели осуществляется анализ значимости её коэффициентов и оценка адекватности. Для проверки значимости коэффициентов применяется критерий Стьюдента (t-критерий), вычисляемый с использованием формулы:

$$t_i = |b_i| / S\{b_i\}, \quad (3.5)$$

где b_i – i -й коэффициент математической модели;

$S\{b_i\}$ – среднеквадратическое отклонение в определении коэффициентов.

Среднеквадратическое отклонение при вычислении коэффициентов функции отклика рассчитывается с использованием следующей формулы:

$$S\{b_i\} = \sqrt{C_i} \cdot S_e^2, \quad (3.6)$$

где: C_i – величины, приведенные для плана B-D13 в таблице 3.1;

S_e^2 – дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах.

Таблица 3.1 – Величины C_i для плана B-D₁₃

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{22}	b_{23}	b_{33}
0,868	0,159	0,159	0,159	0,594	0,226	0,226	0,594	0,226	0,594

Для вычисления дисперсии воспроизводимости в сериях параллельных экспериментов применяется формула:

$$S_e^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{uj} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.7)$$

где N – количество опытов в плане;

m – количество параллельных измерений в каждом опыте;

y_{uj} – значение выходного параметра в u -ом опыте, j -ом параллельном замере;

$\bar{y}$ – среднее значение выходного параметра в u -ом опыте.

Для оценки статистической значимости результатов исследования рассчитывается t - критерий, который затем сопоставляется с табличным значением $t_{\text{табл}}$ для установленного уровня значимости, обычно равного 5%, и данного числа степеней свободы $N(m-1)$. Если значение t , полученное в результате расчетов, оказывается меньше табличного, коэффициент b_i считается статистически значимым.

Для проверки достоверности математической модели используется критерий Фишера (F - критерий). В этом случае дисперсия адекватности рассчитывается согласно формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-n} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (3.8)$$

где n_3 – количество значимых коэффициентов;

$\hat{y}_u$ – значение отклика, предсказанное по уравнению математической модели.

В свою очередь критерий Фишера вычисляется в виде отношения:

$$F = S_{ad}^2 / S_{\epsilon}^2 \quad (3.9)$$

Рассчитанное значение F -критерия сопоставляется с табличным значением для заданного уровня значимости, обычно равного 5%. При этом учитываются степени свободы, определяемые как $N(m-1)$ и $(N-n_3)$. Если полученное значение F меньше табличного, то уравнение математической модели признается адекватным.

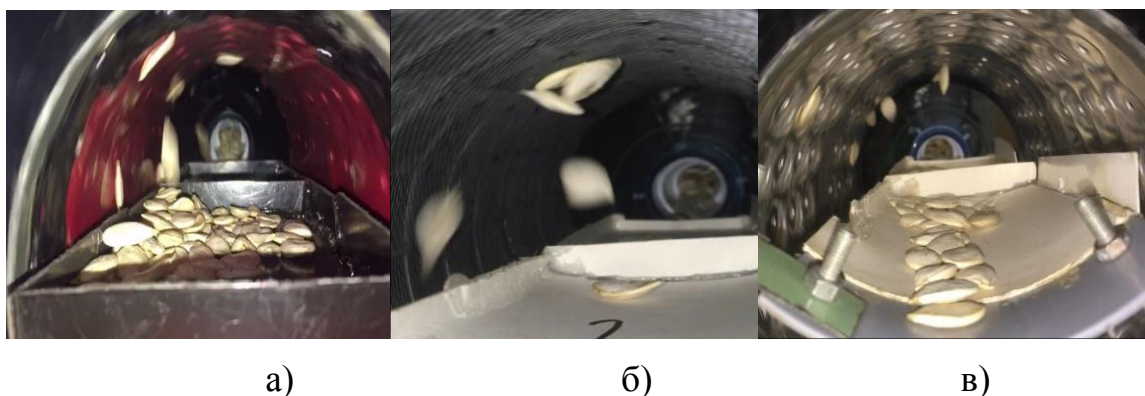
Завершение обработки данных запланированного эксперимента включает в себя этап выявления экстремума функции отклика. Для установления координат этого экстремума выполняется автоматизированный расчет первой производной по каждому из рассматриваемых факторов. Находящиеся в системе уравнений корни соответствуют координатам точки экстремума анализируемого регрессионного уравнения.

$$\begin{cases} \frac{dy(x_1 x_2)}{dx_1} = 0, \\ \frac{dy(x_1 x_2)}{dx_2} = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

3.6 Методика исследования разделения семян тыквы экспериментальными сепарирующими поверхностями

При разделении семян при помощи экспериментальных поверхностей важно не только оценить числовые показатели средней массы каждой фракции, но и отследить поведение семени при присасывании, движении и отрыве. Для эксперимента взяты семена, имеющие среднюю массу $0,32 \cdot 10^{-3}$ кг, они разделяются с трехкратной повторностью на резиновом решете с ячейками, металлическом решете с ячейками и сетчатой поверхности для сравнения с ровным решетом (рисунок 3.17).

Качественным показателем эффективности рабочей поверхности является разница в средней массе семян каждой фракции. Необходимо обращать внимание на коэффициент вариации при обработке опытов, т.к. этот показатель отображает стабильность работы каждой поверхности.

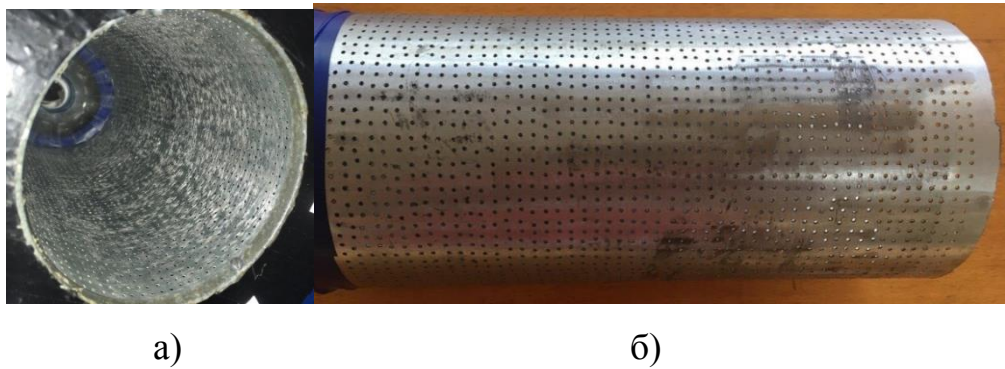


а) резиновое решето с ячейками; б) сетчатая поверхность; в) решето с ячейками

Рисунок 3.17 – Разделение семян экспериментальными поверхностями

3.7 Методика разделения семян огурца

Поскольку сепаратор планируется использовать для разделения семян не только тыквы, но и любых семян из разных семейств овощных культур, имеющих разную геометрическую форму, необходим подбор подходящей рабочей поверхности. Предполагалось использование сетчатой поверхности с мелкой площадью сечения клеток для сортировки семян малых размеров. Однако, в случае слабой эффективности ее использования, для этих целей было изготовлено дополнительное ровное решето с диаметром отверстий $d = 1,5$ мм и шагом $t = 5$ мм (рисунок 3.18).



а) вид изнутри; б) вид снаружи;

Рисунок 3.18 – Сепарирующая поверхность (мелкое ровное решето, $d = 1,5$ мм, $t = 5$ мм)

Для эксперимента взято 0,1 кг семян огурца сорта «Феникс плюс». Семена подаются на рабочую поверхность при разрежениях 120/160 Па, частоте вращения $0,417 \text{ об/с}^{-1}$, угле наклона $8,7^\circ$ и производительности $7,14 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$. Процесс сепарации семян огурца представлен на рисунке 3.19.

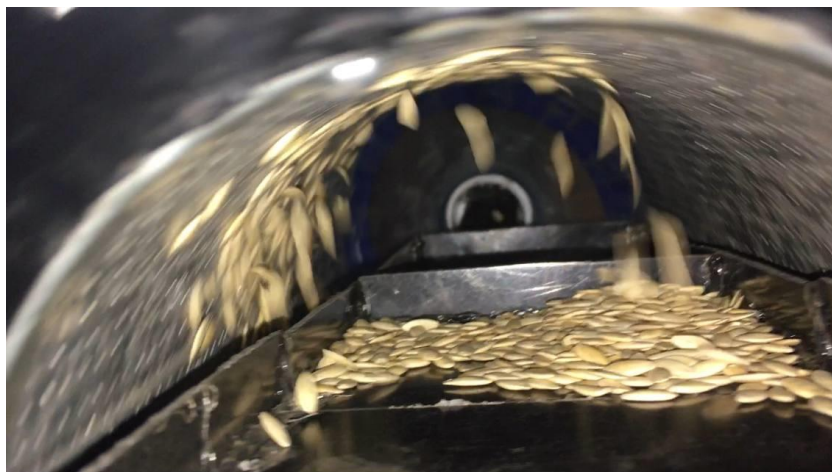


Рисунок 3.19 – Процесс разделения семян огурца

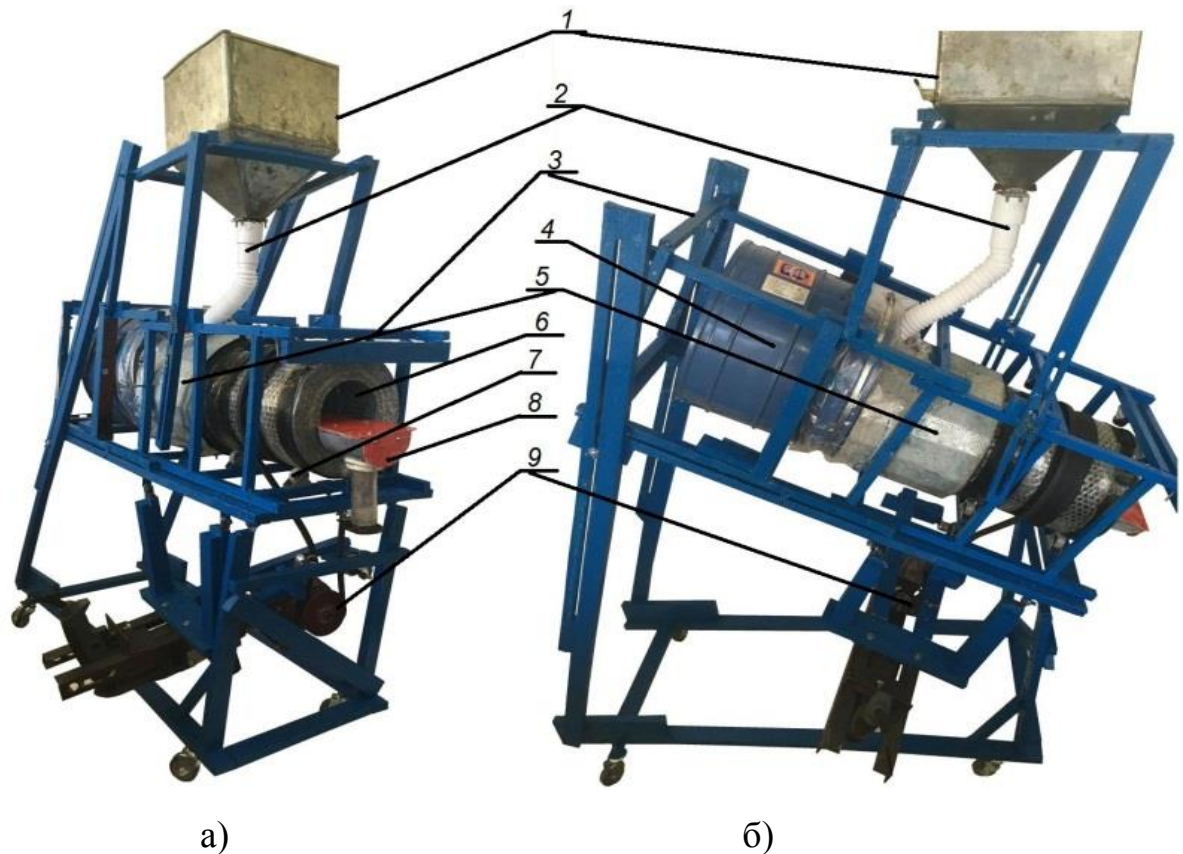
Эксперимент проводится с трехкратной повторностью и учитывает средний показатель m_{1000} семян каждой фракции, а также процентную долю от общей массы сепарируемых семян.

3.8 Экспериментальная установка

Изготовлена экспериментальная установка (рисунок 3.20), в которую входят устройства для подачи семян, сепарации, приема материала, разделенного на фракции.

Подающее устройство состоит из бункера и гофры для подачи семян на рабочий орган. Количество подачи семян регулируется при помощи заслонки на бункере.

Рабочий орган для сепарации представляет собой цилиндрический барабан, внутри которого находится цилиндрическая сепарирующая поверхность. Между ними установлены камеры разрежения, которые герметично прилегают к рабочей поверхности. Вакуумным мотором из них высасывается воздух через воздушные гофры, создавая необходимое разрежение. Разрежение в воздушных камерах регулируется при помощи вентиля, а также изменения скорости вращения крыльчатки вакуумного двигателя.

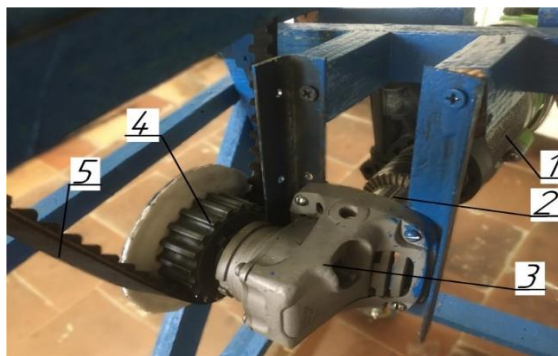


а) вид сбоку; б) вид спереди

1 – бункер; гофра для подачи семян; 3 – рама; 4 – камера с вентилятором;
 5 – воздушная гофра; 6 – перфорированная рабочая поверхность; 7 – ролик;
 8 – семяприемник тяжелой фракции; 9 – привод

Рисунок 3.20 – Лабораторный пневматический сепаратор с цилиндрической сепарирующей поверхностью

Вращение барабана сепаратора происходит при помощи привода, расположенного в нижней части конструкции (рисунок 3.21). Электрический двигатель переменного тока через редуктор передает вращение на шкив, от которого идет ременная передача на барабан сепаратора.



1 – электродвигатель; 2 – вал; 3 – редуктор; 4 – шестерня; 5 – ремень

Рисунок 3.21 – Общий вид привода пневматического сепаратора

Рама экспериментального пневматического сепаратора позволяет регулировать угол наклона рабочего органа сепаратора до 50 градусов для регулировки скорости скольжения семян по внутренней поверхности барабана и вместе с ней угол наклона бункера питателя. Технические характеристики основных узлов лабораторной установки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики лабораторного сепаратора

Наименование параметра	Значение	Единица измерения
Подающее устройство		
Объем бункера	0,01	м ³
Длина гофры подачи семян на барабан	1	м
Сепарирующая поверхность		
Длина рабочей перфорированной поверхности	290	мм
Диаметр рабочей перфорированной поверхности	125	мм
Диаметр отверстия перфорации, $d_{от}$	4	мм
Шаг установки отверстий, t	20	мм
Привод сепарирующего барабана		
Тип привода	ДЭУ-1150 «ЭлектроМаш»	—
Мощность электродвигателя	1,1	кВт
Номинальная частота вращения двигателя	25	с ⁻¹
Диаметр ведущей шестерни	100	мм
Диаметр барабана	300	мм
Передаточное число редуктора привода	3,5	—
Способ регулирования частоты вращения барабана	Плавное регулирование с помощью ЛАТРа	—

3.9 Выводы по главе

1. Разработана программа экспериментальных исследований, направленная на подтверждение теоретических положений второго раздела и определение рациональных параметров работы пневматического сепаратора. Программа включает семь последовательных задач, направленных на исследование сепарирующих поверхностей, верификацию конструкции камер разрежения, проведение одно- и многофакторных экспериментов по сепарации семян тыквы, а также дополнительные испытания на семенах огурца и разработку лабораторной установки.

2. Исследуются выбранные рабочие поверхности для сепаратора. Определяются силы вакуумного присасывания, необходимые для разрежения удержания семян разной массы на разных поверхностях. Определяется коэффициент трения этих поверхностей. Определяется необходимая скорость воздушного потока для удержания семени на поверхности. Проводятся замеры скорости набегающего воздушного потока на семя, расположенного на сепарирующей поверхности, при помощи доработанной трубки Пито Прандтля.

3. Для устранения недостатка исходной камеры разрежения по итогу программного моделирования воздушных потоков и разрежения была создана 3д модель новой усовершенствованной камеры разрежения и напечатана на 3д принтере. Для проверки преимуществ новой камеры на основе программного аэродинамического расчета проводится сравнительный эксперимент двух камер разрежения на предмет равномерности разрежения.

4. С целью определения рациональных рабочих параметров сепаратора проводятся однофакторные эксперименты с целью определения рациональной частоты вращения барабана, вакуумметрического давления в воздушных камерах, угла наклона барабана и производительности сепаратора. Каждый из параметров поочередно постепенно увеличивается до момента, когда сепаратор теряет свою эффективность, параллельно фиксируются на каждом этапе средняя масса каждой фракции и ее процентная доля массы от всех семян.

5. Для определения оптимальных рабочих параметров сепаратора проводится многофакторный эксперимент, учитывающий взаимодействие таких факторов, как: частота вращения рабочего органа, угол наклона и разрежение на рабочей поверхности, описана методика проведения.

6. Проводится эксперимент по сепарации тремя экспериментальными рабочими поверхностями для сравнения их эффективности с ровным решетом, которое было взято за основную сепарирующую поверхность.

7. Исследуется разделение семян огурца на новом сепараторе с использованием мелкого ровного решета.

8. Собрана лабораторная модель сепаратора, описаны технические параметры основных узлов и рабочих органов. Собраны три экспериментальные рабочие поверхности: резиновая поверхность, решето с ячейками и сетчатая поверхность.

ГЛАВА 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Общая характеристика экспериментальных исследований и полученных результатов

Экспериментальные исследования пневматического сепаратора проводились с целью подтверждения теоретических предпосылок, а также для нахождения рациональных параметров рабочих органов конструкции сепаратора. Исследовалось их влияние на качество разделения семян и производительность пневматического сепаратора.

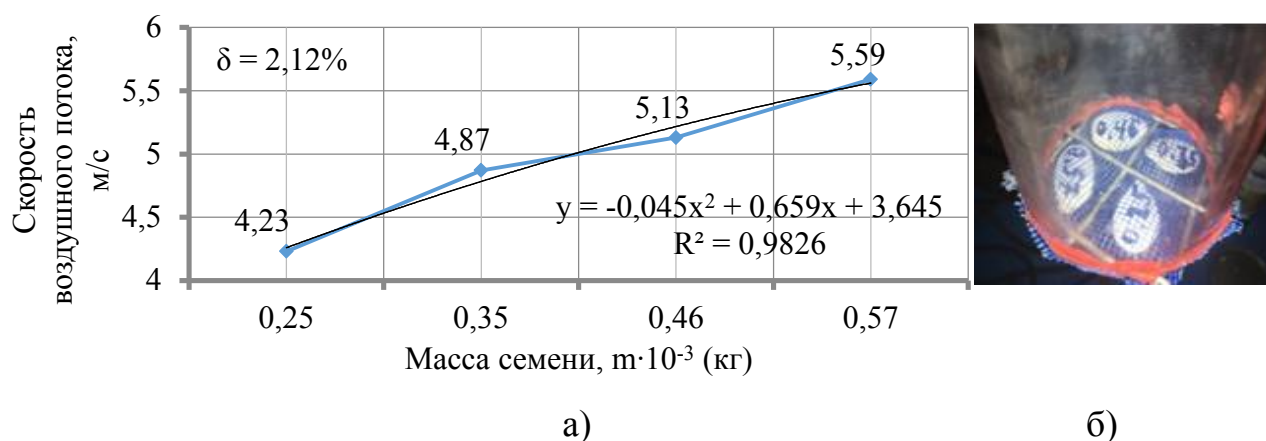
Лабораторные исследования проводились на разных режимах работы сепаратора, в процессе опытов изменялись параметры (частота вращения рабочей поверхности, сила вакуумного присасывания, уровень подачи сепарируемого материала из питателя, угол наклона рабочего органа сепаратора). Экспериментальные исследования проводились с использованием четырех разных выбранных рабочих поверхностей, сначала исследовалась их способность удержания семени, затем непосредственно в работе пневматического сепаратора.

Для исследований использовались семена тыквы кондиционной влажности 10% сорта «Волжская серая». Данный сорт тыквы наиболее распространен на территории Луганской Народной Республики. Использовались семена тыквы, не отвечающие требованиям как семена второй репродукции с нормой чистоты 96% и всхожестью 80%.

4.2 Результаты исследования рабочих поверхностей пневматического сепаратора

Была составлена графическая зависимость показателей скорости воздушного потока и степени разрежения в воздушной камере в момент отрыва семени с рабочей поверхности с учетом погрешностей опытов (Приложение А).

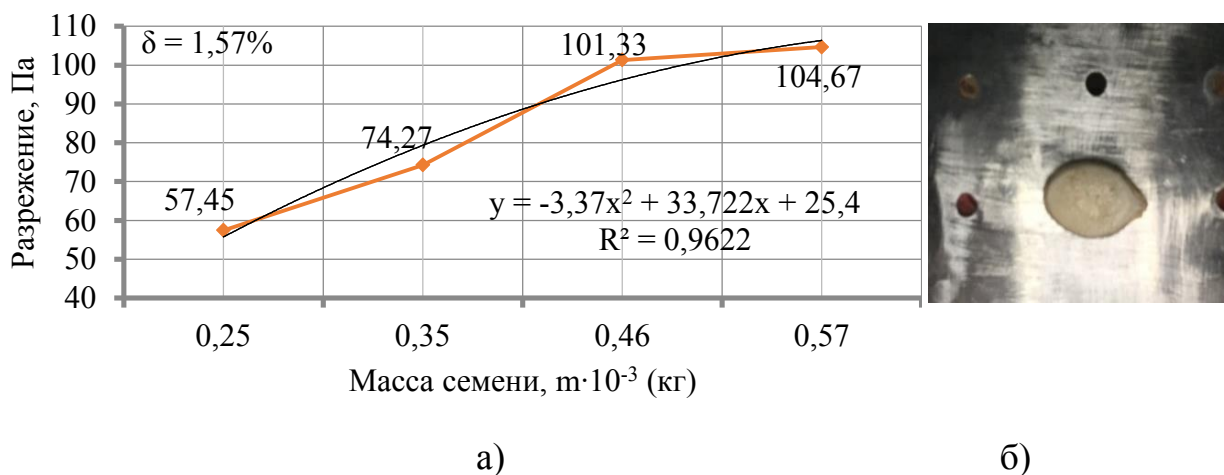
По результатам эксперимента на сетчатой поверхности скорость воздушного потока по мере изменения массы семени возрастала от 4,23 м/с до 5,59 м/с с учетом погрешности $\delta = 2,12\%$. Недостатком данной рабочей поверхности можно назвать большое живое сечение, что приводит к увеличению набегающего воздушного потока в барабан сепаратора (рисунок 4.1).



а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

Рисунок 4.1 – Зависимость скорости воздушного потока от массы семени при отрыве от сетчатой поверхности ($a = 1 \times 1$ мм)

По результатам исследований ровного решета, с учетом погрешности $\delta = 1,57\%$, разрежение изменялось от 57,45 Па до 104,67 Па (рисунок 4.2).

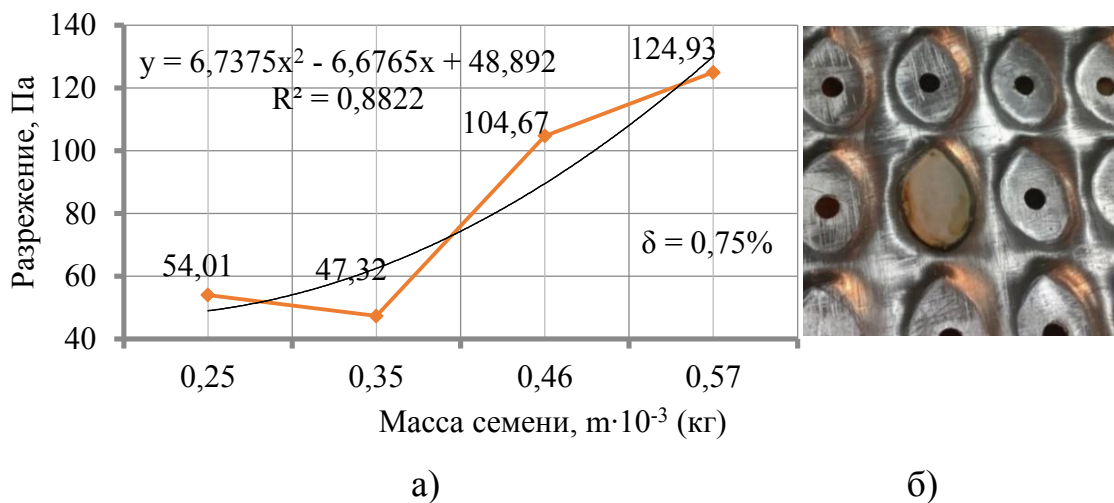


а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

Рисунок 4.2 – Зависимость разрежения от массы семени при отрыве от ровного решета ($d = 4$ мм, $t = 20$ мм)

Предположительным минусом такой поверхности можно назвать высокий риск проскальзывания семян по поверхности.

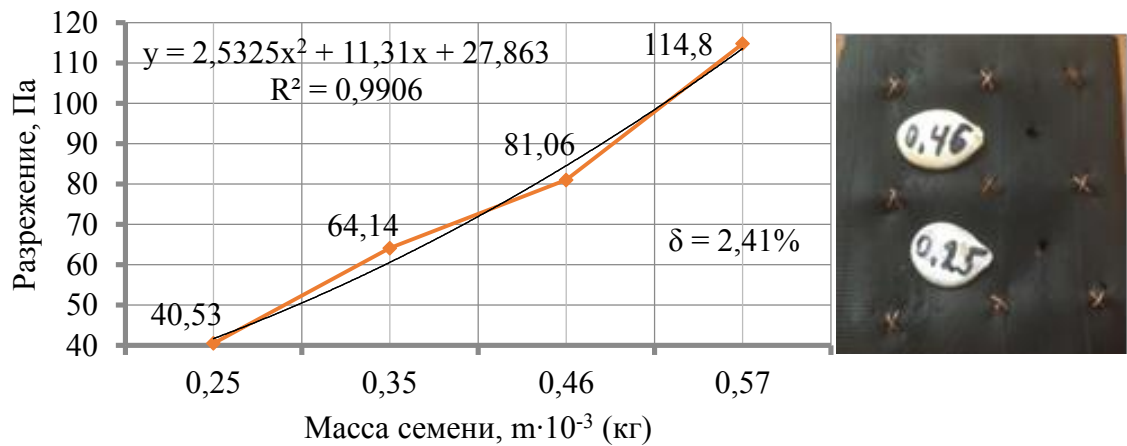
По результатам исследования решета с ячейками под семена, разрежение изменялось от 47,32 Па до 124,93 Па (рисунок 4.3) с учетом погрешности $\delta = 0,75\%$. Данная рабочая поверхность показала себя наименее эффективной, так как даже незначительная разница в форме и размера семени влияла на положение его в ячейке, поэтому показатель отрыва недостаточно зависел от массы семени.



а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

Рисунок 4.3 – Зависимость разрежения от массы семени при отрыве от решета с ячейками ($d = 4$ мм, $t = 20$ мм)

Наиболее рациональным оказалось резиновое решето с ячейками. Показатели разрежения изменялись от 40,53 Па до 114,8 Па, с учетом погрешности $\delta = 2,41\%$, что является наиболее качественным результатом, поскольку она возрастала наиболее стабильно относительно массы семени (рисунок 4.3), а показатели в разных повторях имели минимальный разброс. Исходя из показателей, данная поверхность лучше остальных удерживает семена, требуя при этом меньше силы вакуумного присасывания.



а)

б)

а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

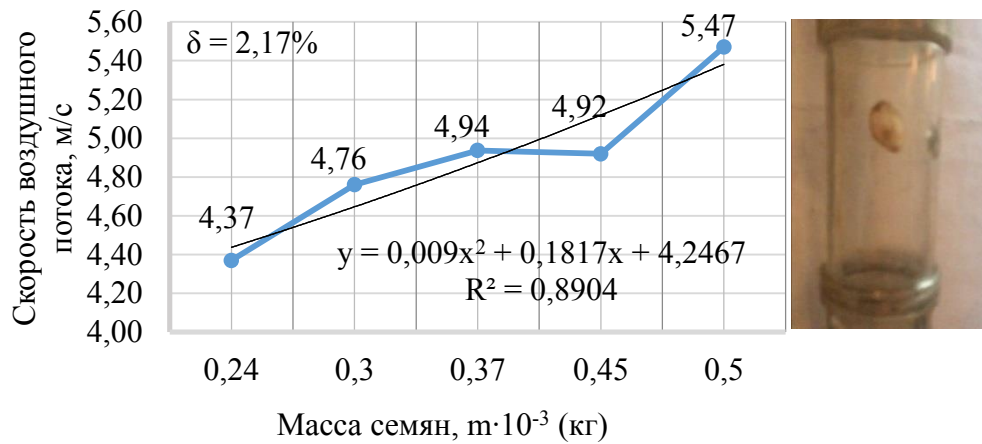
Рисунок 4.4 – Зависимость разрежения от массы семени при отрыве от резинового решета с ячейками ($d = 4$ мм, $t = 20$ мм)

При подборе резины для изготовления такой поверхности необходимо, чтобы материал обладал достаточной прочностью и высокой эластичностью: под действием разрежения он не только повторял форму ячеек, но и плотно прилегал к поверхности семени. Таким образом, предположительно происходит избавление от проблемы нестабильности ориентирования семян в ячейке, так как данная поверхность должна работать по принципу присоски. Благодаря большому коэффициенту трения уменьшается риск проскальзывания семян по поверхности. Обработка результатов эксперимента представлена в приложении А.

По результатам определения коэффициента трения на рабочих поверхностях для ровного решета он составил 0,61, для решета с ячейками 0,64, для резинового решета с ячейками 0,69 и 0,59 для сетчатой поверхности.

Проведен опыт по определению необходимой скорости набегающего воздушного потока на семена разной массы, достаточной для удержания их на рабочей поверхности.

По результатам эксперимента при увеличении массы семени с $0,24 \cdot 10^{-3}$ кг до $0,5 \cdot 10^{-3}$ кг, скорость набегающего воздушного потока, необходимая для удержания семени, возросла с 4,37 м/с до 5,47 м/с (рисунок 4.5) с учетом погрешности $\delta = 2,17\%$ (Приложение Б).



а)

б)

а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

Рисунок 4.5 – Зависимость скорости набегающего воздушного потока от массы семени при отрыве от сетчатой поверхности ($a = 1 \times 1$ мм)

Были проведены замеры скорости набегающего воздушного потока на семя, расположенное на сепарирующей поверхности. Опыт показал, что у первой воздушной камеры скорость воздушного потока составляет 1,66 м/с, в то время как на второй 2,03 м/с (рисунки 4.6 и 4.7). Связано это с тем, что во второй камере разрежения действует большее вакуумметрическое давление. Это происходит за счет того, что набегающий воздушный поток, по мере прохождения через барабан, распределяется по присасывающим отверстиям.

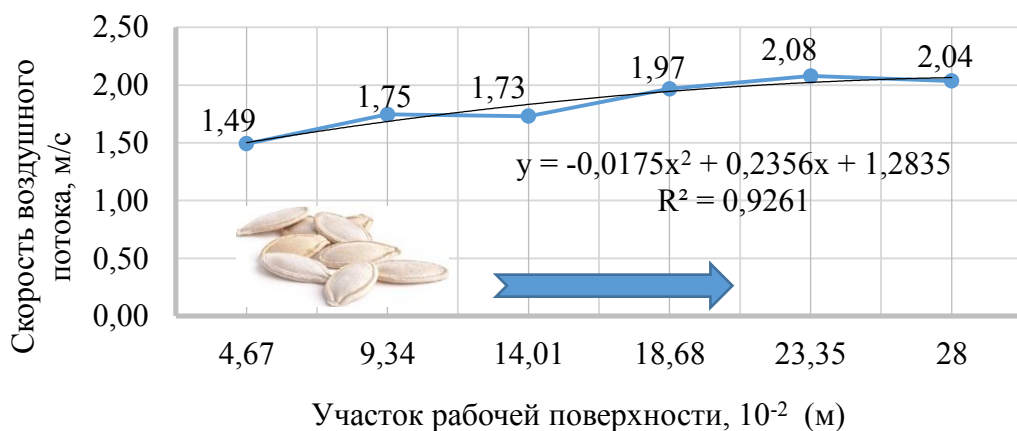


Рисунок 4.6 – Зависимость скорости воздушного потока воздуха на поверхности рабочего органа от местоположения

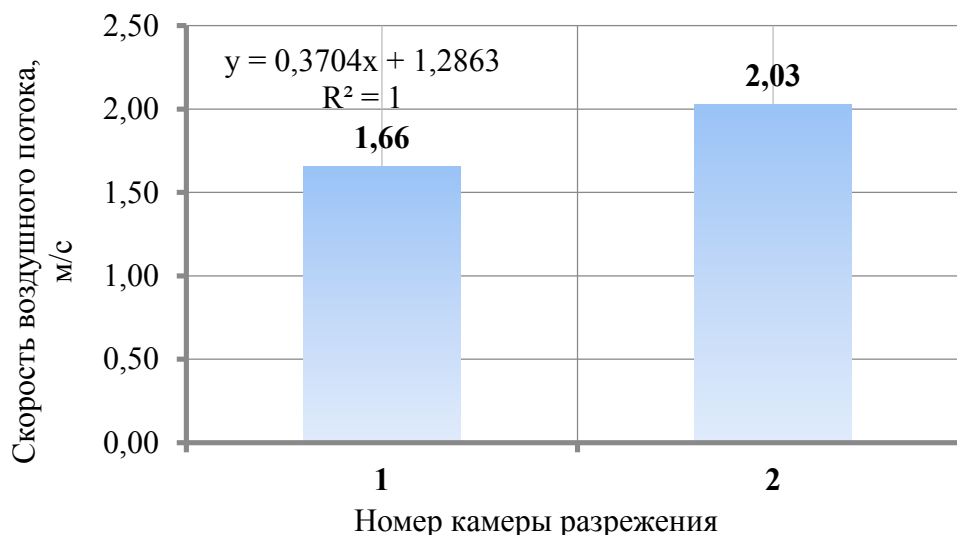


Рисунок 4.7 – Скорость воздушного потока на поверхности рабочего органа на двух камерах разрежения

4.3 Результаты исследования камеры разрежения пневматического сепаратора

По полученным результатам исследования перепадов давления по каждому из трех рядов отверстий исходной и разработанной камеры разрежения был проведен дисперсионный анализ измерений, показывающий точность опыта, с учетом трех повторений измерения. При усредненном результате измерений, дисперсионный анализ позволил вычислить отклонение границ давления по каждой траектории движения. Для получения полной картины перепадов давлений в обеих воздушных камерах были обработаны подобным образом результаты по трем траекториям движения для вычисления среднего показателя.

Получена зависимость вакуумметрического воздействия на семя по мере его углового перемещения по траектории вращения при исходной и разработанной камере разрежения. По результатам эксперимента (Приложение В) установлено, что при переходе на разработанную камеру, среднеквадратическое отклонение разрежения на рабочей поверхности уменьшилось в три раза, с 7,20 Па до 2,40 Па (рисунок 4.8).

Общая точность опыта, по результату дисперсионного анализа, составила 0,53%.

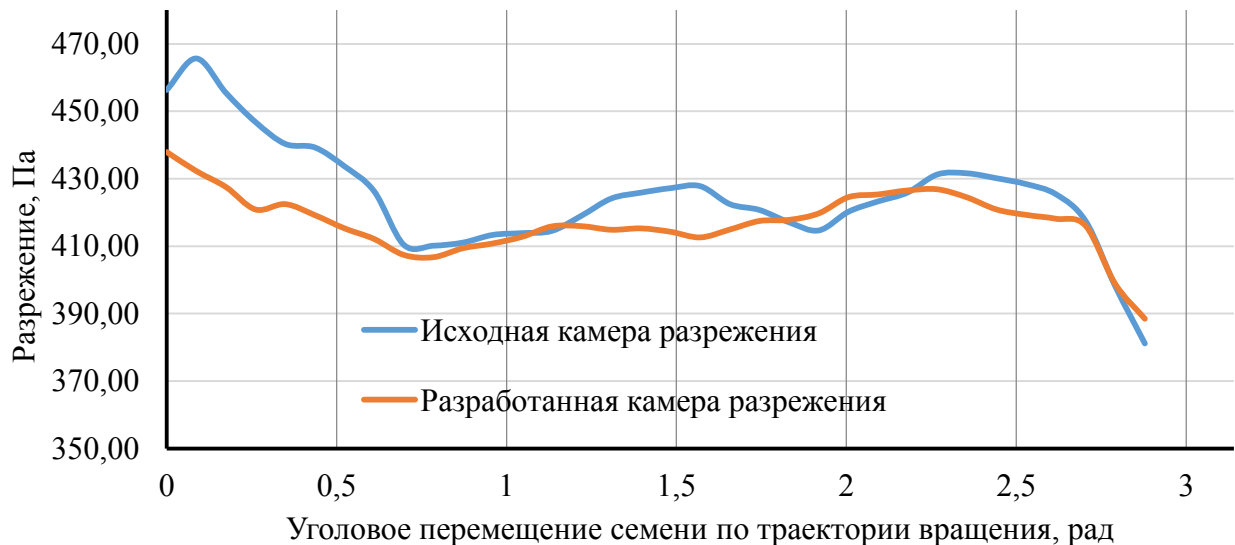


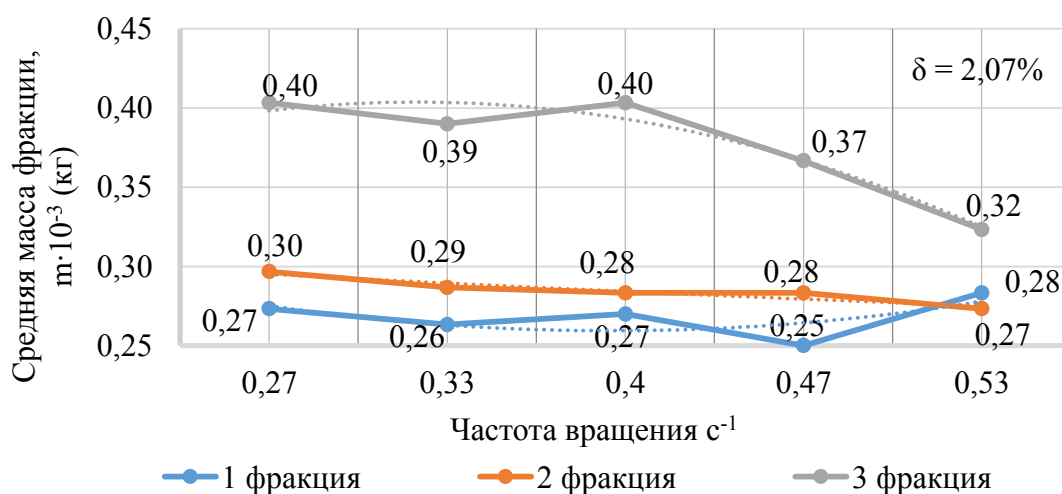
Рисунок 4.8 – Зависимость вакуумметрического воздействия на семя от его углового перемещения по траектории вращения

Достоинство камеры разрежения было экспериментально подтверждено [71], и она была интегрирована в конструкцию сепаратора. Разработанная воздушная камера, обеспечивающая более равномерное распределение разрежения, позволила повысить качество разделения семян. Неравномерность распределения давления в исходной формы приводила к локальному присасыванию тяжёлых кондиционных семян и их попаданию в лотки лёгкой фракции, либо, наоборот, к преждевременному отрыву недоразвитых семян в зонах с недостаточным разрежением.

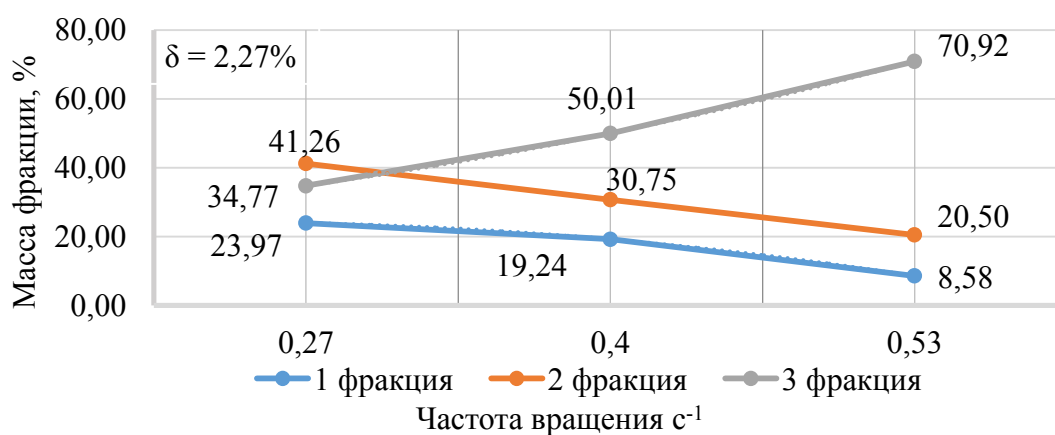
4.4 Результаты однофакторных экспериментов по разделению семян пневматическим сепаратором

По результатам разделения семян, с учетом погрешности $\delta = 2,17\%$, при увеличении частоты вращения барабана наблюдается значительное снижение средней массы третьей фракции семян после частоты вращения $0,40 \text{ с}^{-1}$.

Происходит это вследствие проскальзывания легких семян через присасывающие отверстия и попадание некоторых из них в тяжелую фракцию. Вместе с этим наблюдается повышение общей массы третьей фракции семян из-за понижения качества разделения. Поскольку производительность сепаратора зависит от частоты вращения барабана, наиболее рациональная скорость вращения барабана при данной рабочей поверхности составляет $0,40 \text{ с}^{-1}$ (рисунок 4.9).



а)



б)

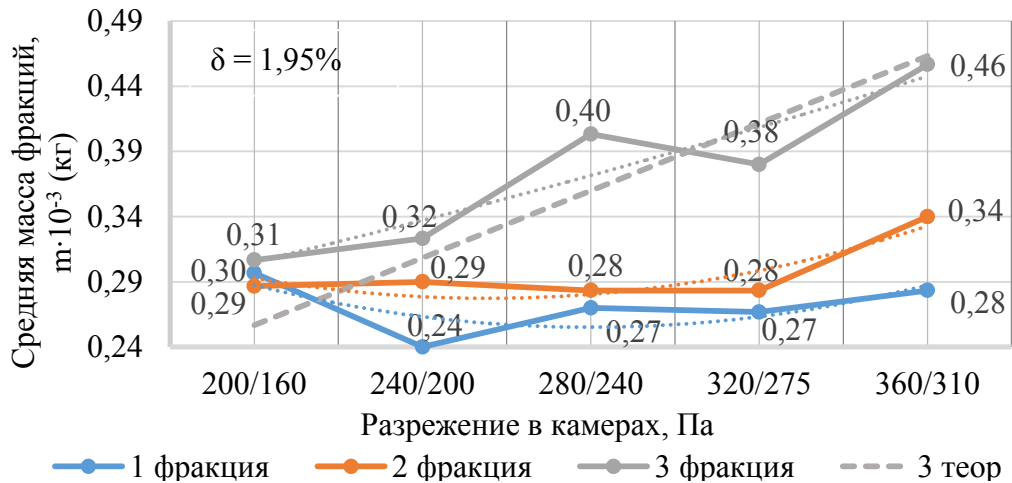
а) зависимость средней массы фракций от частоты вращения;

б) зависимость общей массы фракции от частоты вращения

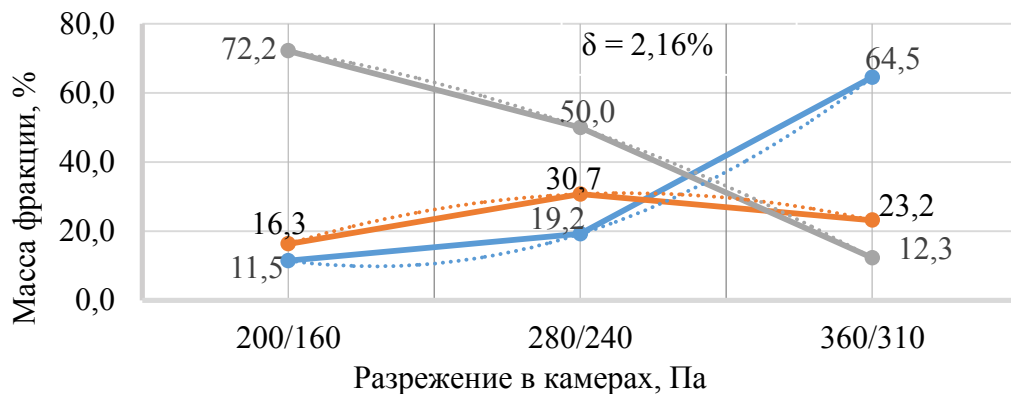
Рисунок 4.9 – Результаты сепарации при повышении частоты вращения барабана

По результатам разделения семян с увеличением разрежения в воздушных камерах, при погрешности $\delta = 2,05\%$, наблюдается значительное повышение

средней массы семян третьей фракции. Однако общее количество семян, попадающих в эту фракцию, одновременно уменьшается, поскольку при избыточном разрежении кондиционные семена массово присасываются к поверхности и попадают в приёмные лотки (рисунок 4.10)



а)



б)

а) зависимость средней массы фракций от разрежения;

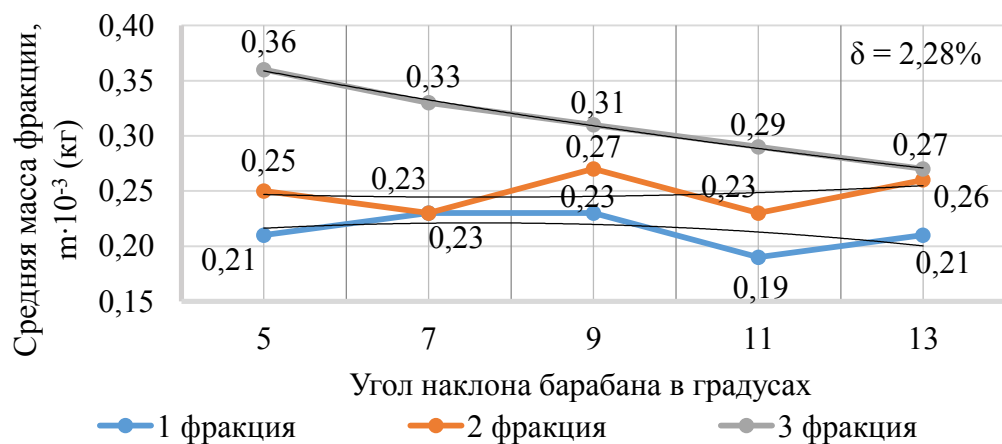
б) зависимость общей массы семян от разрежения

Рисунок 4.10 – Результаты сепарации при разном разрежении в камерах

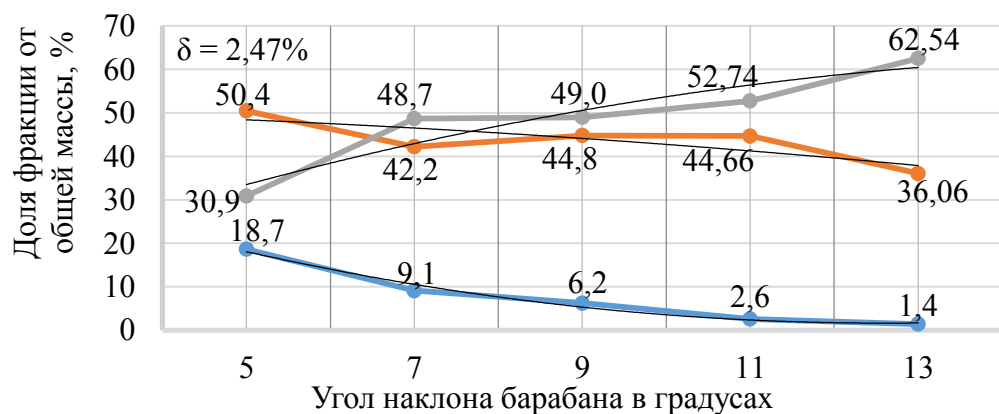
Наиболее подходящим разрежением были выбраны 280 Па во второй камере и 240 Па в первой. При данных параметрах 50% семян попадает в тяжелую фракцию, 30,70% в среднюю и 19,20% в легкую фракцию. Для построения теоретической зависимости средней массы семян третьей фракции уравнение

(2.16) было решено в обратной постановке. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными составило 9,07%.

По результатам разделения семян при увеличении угла наклона наблюдается уменьшение средней массы третьей фракции вследствие того, что некондиционные семена начинают проскакивать мимо отверстий, не присосавшись, и не попав в лотки (рисунок 4.11). Рациональными углами наклона для сепарации можно отметить от 7 до 9 градусов, при которых в третью фракцию попадает от 30,90% до 48,70% семян, с учетом погрешности опыта $\delta = 2,37\%$.



а)



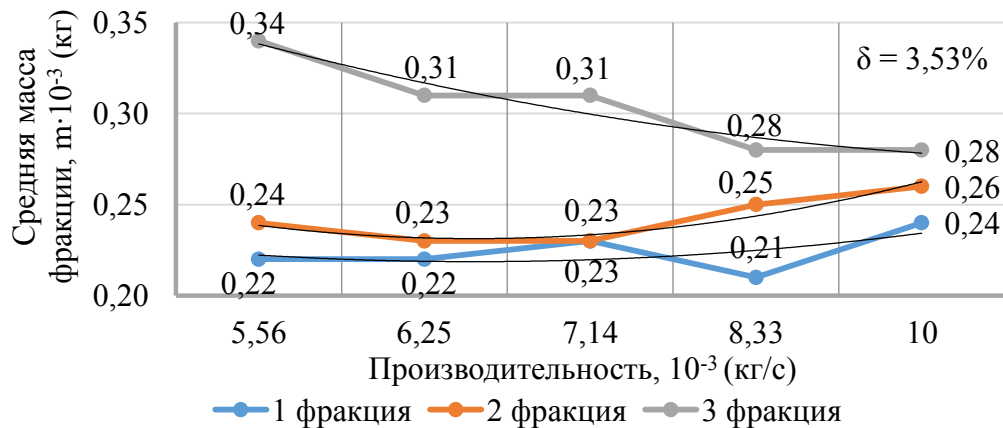
б)

а) зависимость средней массы фракций от угла наклона;

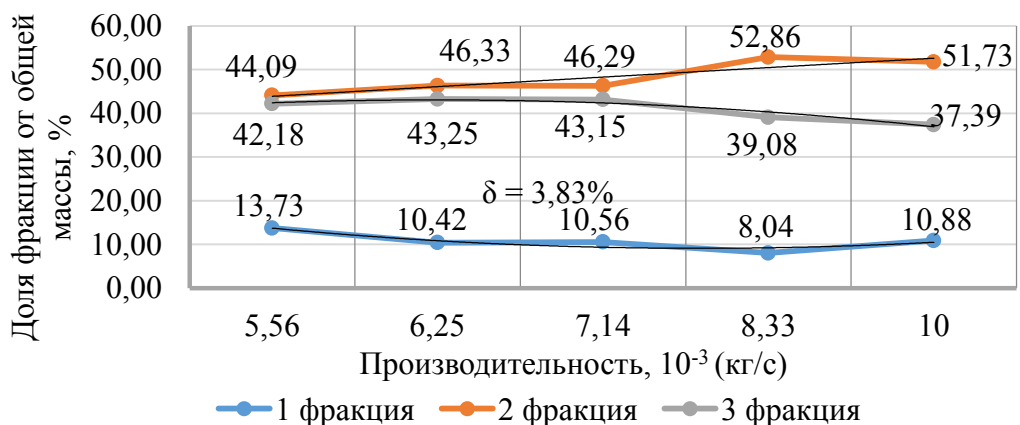
б) зависимость общей массы семян от угла наклона

Рисунок 4.11 – Результаты сепарации при разном угле наклона

Согласно результатам разделения семян, при разной производительности, с учетом погрешности опыта $\delta = 3,68\%$, по мере повышения уровня подачи семян наблюдается уменьшение средней массы третьей фракции на фоне повышения средней массы второй фракции и первой. Так же с повышением производительности количество семян, попадающих в третью фракцию, становится меньше. Причиной этому становится то, что при избыточном попадании семян на рабочую поверхность происходит массовое налипания семян на отверстия, что уменьшает живое сечение и увеличивает разрежение [36, с. 11], что в свою очередь приводит к попаданию кондиционных семян в легкие фракции (рисунок 4.12).



а)



б)

а) зависимость средней массы фракций от производительности;

б) зависимость общей массы семян от производительности

Рисунок 4.12 – Результаты сепарации при разной производительности

Исходя из проведенного эксперимента, можно сделать вывод, что максимальное качество разделения семян происходит при производительности до $7,14 \cdot 10^{-3}$ кг/с, после, эффективность работы сепаратора снижается.

4.5 Результаты проведения многофакторного эксперимента

Показателем качества разделения семян пневматическим сепаратором является масса тысячи семян m_{1000} попавших в третью посевную фракцию за промежуток времени $Q_{3ф}$ с учетом m_{1000} исходной навески 225 г. Факторы и интервалы их варьирования представлены в таблице 4.1. Для проведения многофакторного эксперимента выбраны три основных фактора:

- 1) x_1 – частота вращения барабана, c^{-1} ;
- 2) x_2 – разрежение в воздушной камере, Па;
- 3) x_3 – угол наклона барабана, градусы.

Таблица 4.1 – Список факторов и интервалы их варьирования

	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования	Наименование фактора
x_1 :	0,27	0,4	0,53	0,13	Частота вращения
x_2 :	200	280	360	80	Разрежение
x_3 :	4	8	12	4	Угол наклона

Матрица планирования эксперимента и функции отклика представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – План эксперимента и выходные параметры опытов

Номер опыта (u)	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр (Масса 1000 семян)		
	x ₁	x ₂	x ₃	Частота вращения, с ⁻¹	Разрежение, Па	Угол наклона, градусы	Y ₁	Y ₂	Y ₃
1	-1	-1	-1	0,27	200	4	267	269	266
2	+1	-1	-1	0,53	200	4	251	253	249
3	-1	+1	-1	0,27	360	4	297	307	305
4	-1	-1	+1	0,27	200	12	259	261	259
5	-1	0,19	0,19	0,27	295,2	8,76	283	287	285
6	0,19	-1	0,19	0,4247	200	8,76	252	252	252
7	0,19	0,19	-1	0,4247	295,2	4	288	288	288
8	-0,29	+1	+1	0,3623	360	12	268	265	265
9	+1	-0,29	+1	0,53	256,8	12	253	251	252
10	+1	+1	-0,29	0,53	360	6,84	277	287	274

Примечание: Y₁, Y₂, Y₃ – результаты трёх повторных измерений массы 1000 семян в i-м опыте.

Коэффициенты уравнения математической модели представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Коэффициенты уравнения математической модели

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₂	b ₂₃	b ₃₃
276,072	-8,882	12,597	-11,314	0,111	0,793	-1,523	-8,584	-5,978	-1,424

Оценка значимости коэффициентов модели и проверка ее адекватности представлены в таблицах 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4 – Оценка значимости коэффициентов модели (критерий Стьюдента)

	b0	b1	b2	b3	b11	b12	b13	b22	b23	b33
t-критерий	98,7 74	7,425	10,53	9,458	0,048	0,556	1,068	3,713	4,192	0,616
Значимость	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0

Поскольку квадратичный коэффициент $b_{11} x_1^2$ имеет t-критерий 0,048, он был исключен из модели как статистически незначимый.

Уравнение математической модели в кодированных переменных имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y = & (276,072) + (-8,882) \cdot x_1 + (12,597) \cdot x_2 + (-11,314) \cdot x_3 + \\
 & + (-8,584) \cdot x_2^2 + (-1,424) \cdot x_3^2 + (0,793) \cdot x_1 \cdot x_2 + \\
 & + (-1,523) \cdot x_1 \cdot x_3 + (-5,978) \cdot x_2 \cdot x_3
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Таблица 4.5 – Проверка адекватности математической модели (критерий Фишера)

Дисперсия адекватности ($s^2_{ад}$)	16,81
Число степеней свободы ($f_{ад}$)	5
F-расчетное	1,79
F-табличное ($\alpha=0.05$, $f_{ад}$, f_e)	2,71

Согласно критерию Фишера, полученное уравнение отвечает требованиям адекватности. Данная модель может быть эффективно использована для решения нашей задачи.

Для повышения точности и научной обоснованности результатов был применён метод глобальной оптимизации, основанный на решении системы уравнений, полученных путём приравнивания частных производных функции отклика к нулю:

$$\frac{dy}{dx_1} = 0; \quad \frac{dy}{dx_2} = 0; \quad \frac{dy}{dx_3} = 0. \quad (4.2)$$

Вычислим частные производные:

$$\begin{aligned}
\frac{dy}{dx_1} &= -8,882 + 0,793x_2 - 1,523x_3 = 0; \\
\frac{dy}{dx_2} &= 12,597 - 2 \cdot 8,584x_2 + 0,793x_1 - 5,978x_3 = 0; \\
\frac{dy}{dx_3} &= -11,314 - 2 \cdot 1,424x_3 - 1,523x_1 - 5,978x_2 = 0.
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Приведём систему к стандартному виду:

$$\begin{cases} 0,793x_2 - 1,523x_3 = 8,882 \\ 0,793x_1 - 17,168x_2 - 5,978x_3 = -12,597 \\ -1,523x_1 - 5,978x_2 - 2,848x_3 = 11,314 \end{cases} . \tag{4.4}$$

Система решалась численно с использованием программного обеспечения Python. Решение системы дало следующие координаты экстремума в кодированной форме:

$$X_1 = 0,142; \quad X_2 = -0,148; \quad X_3 = 0,193. \tag{4.5}$$

Переведём значения в натуральную шкалу по формуле:

$$x_i^{nam} = x_{i0} + \Delta x_i \cdot X_i. \tag{4.6}$$

Подставив значения, найдем точку оптимума частоты вращения рабочей поверхности, c^{-1} :

$$x_1 = 0,4 + 0,13 \cdot 0,142 = 0,418, \tag{4.7}$$

разрежения во второй воздушной камере, Па:

$$x_2 = 280 + 80 \cdot (-0,148) = 268,20, \tag{4.8}$$

угла наклона барабана в градусах:

$$x_3 = 8 + 4 \cdot 0,193 = 8,77, \tag{4.9}$$

значение функции отклика в найденной точке, г:

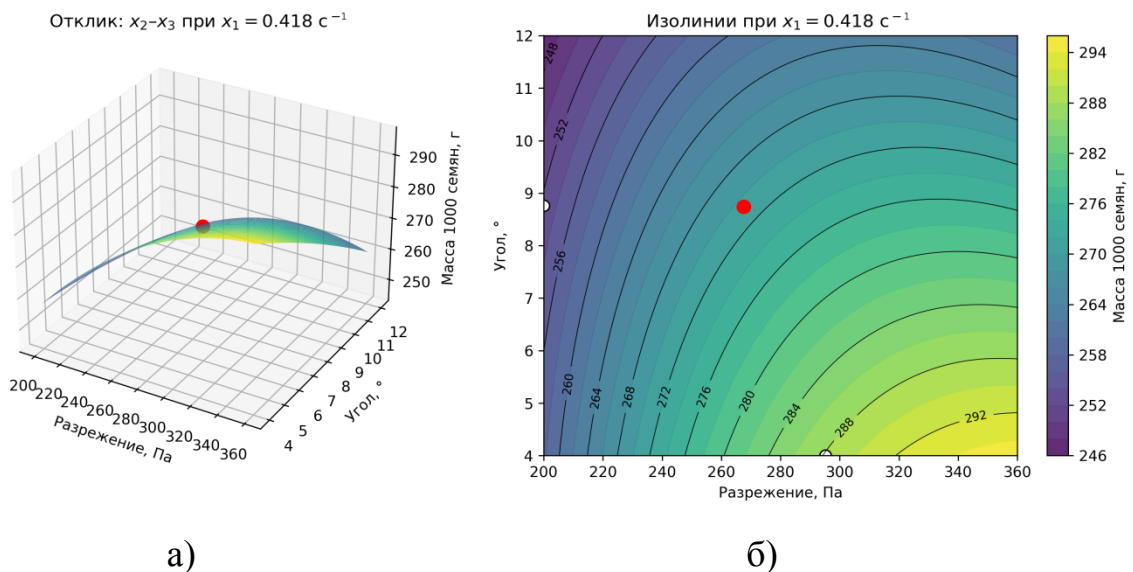
$$y_{onm} = 272,90. \tag{4.10}$$

Найденные значения факторов соответствуют глобальному максимуму целевой функции – массы 1000 семян посевной фракции. Частота вращения барабана $x_1 = 0,418 \text{ c}^{-1}$ обеспечивает достаточную частоту контакт семян с

отверстиями сепарирующей поверхности для своевременного отбора легких фракций, но не вызывает проскальзывания семян по ним. Разрежение $x_2 = 268,20$ Па создает силу вакуумного присасывания, при которой семена средней массы попадают во вторую фракцию, при этом кондиционные семена отрываются до попадания в этот лоток и попадают в третью посевную фракцию. Угол наклона барабана $x_3 = 8,77$ градусов обеспечивает баланс между достаточным временем контакта семян с рабочей поверхностью и производительностью, исключая как преждевременный сход семян, так и заторы при медленном перемещении.

Таким образом, найденный режим обеспечивает наиболее эффективное разделение семян по m_{1000} : легкие семена своевременно присасываются, а кондиционные проходят через всю сепарирующую поверхность без присасывания и направляются в посевную фракцию.

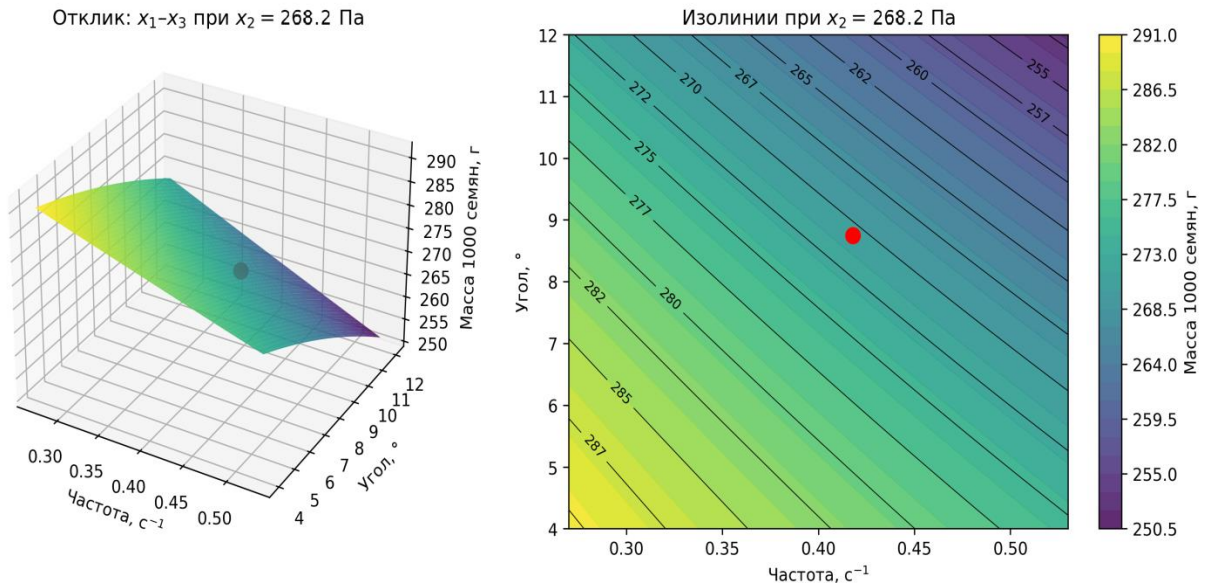
Графическая визуализация поверхности отклика выполнена в виде трехмерных поверхностей и диаграмм изолиний при фиксации одного из факторов на оптимальном уровне (рисунки 4.13 – 4.15). На всех графиках отмечена точка глобального оптимума, а также нанесены экспериментальные данные, подтверждающие адекватность модели.



а) трёхмерная поверхность отклика; б) диаграмма изолиний

Рисунок 4.13 – Графическое отображение поверхности отклика и изолиний при постоянном значении частоты вращения барабана

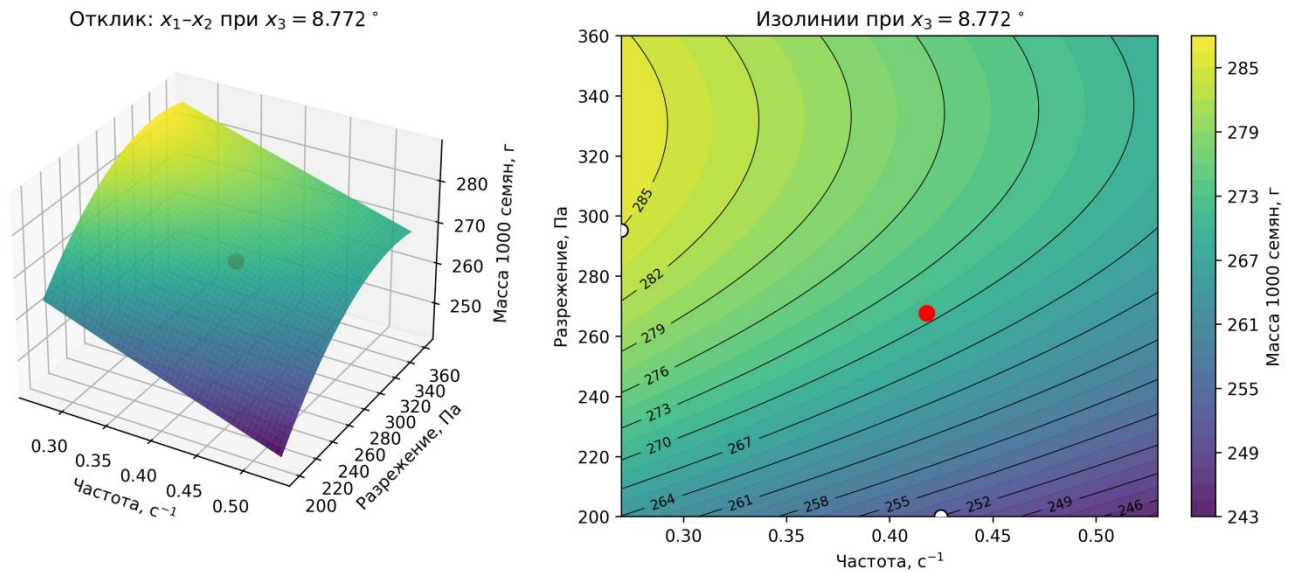
Нелинейная форма поверхности свидетельствует о существенном взаимодействии между факторами x_2 и x_3 . Сгущение изолиний в определенных направлениях указывает на области наиболее интенсивного изменения выходного параметра. Красная точка – глобальный оптимум модели. Цветовая шкала указывает значение массы 1000 семян, г.



а) трёхмерная поверхность отклика; б) диаграмма изолиний

Рисунок 4.14 – Графическое отображение поверхности отклика и изолиний при постоянном значении разрежения

Почти параллельные изолинии без загибов свидетельствуют о том, что квадратичные эффекты, но слабо влияют на общую форму поверхности отклика.



а) трёхмерная поверхность отклика; б) диаграмма изолиний

Рисунок 4.15 – Графическое отображение поверхности отклика и изолиний при постоянном значении угла наклона барабана

Многофакторный эксперимент и регрессионный анализ позволили построить адекватную математическую модель процесса пневматической сепарации семян тыквы, учитывающую взаимодействие факторов. Установленные параметры позволяют оптимизировать процесс сепарации и сократить время настройки лабораторного оборудования перед началом работы [68].

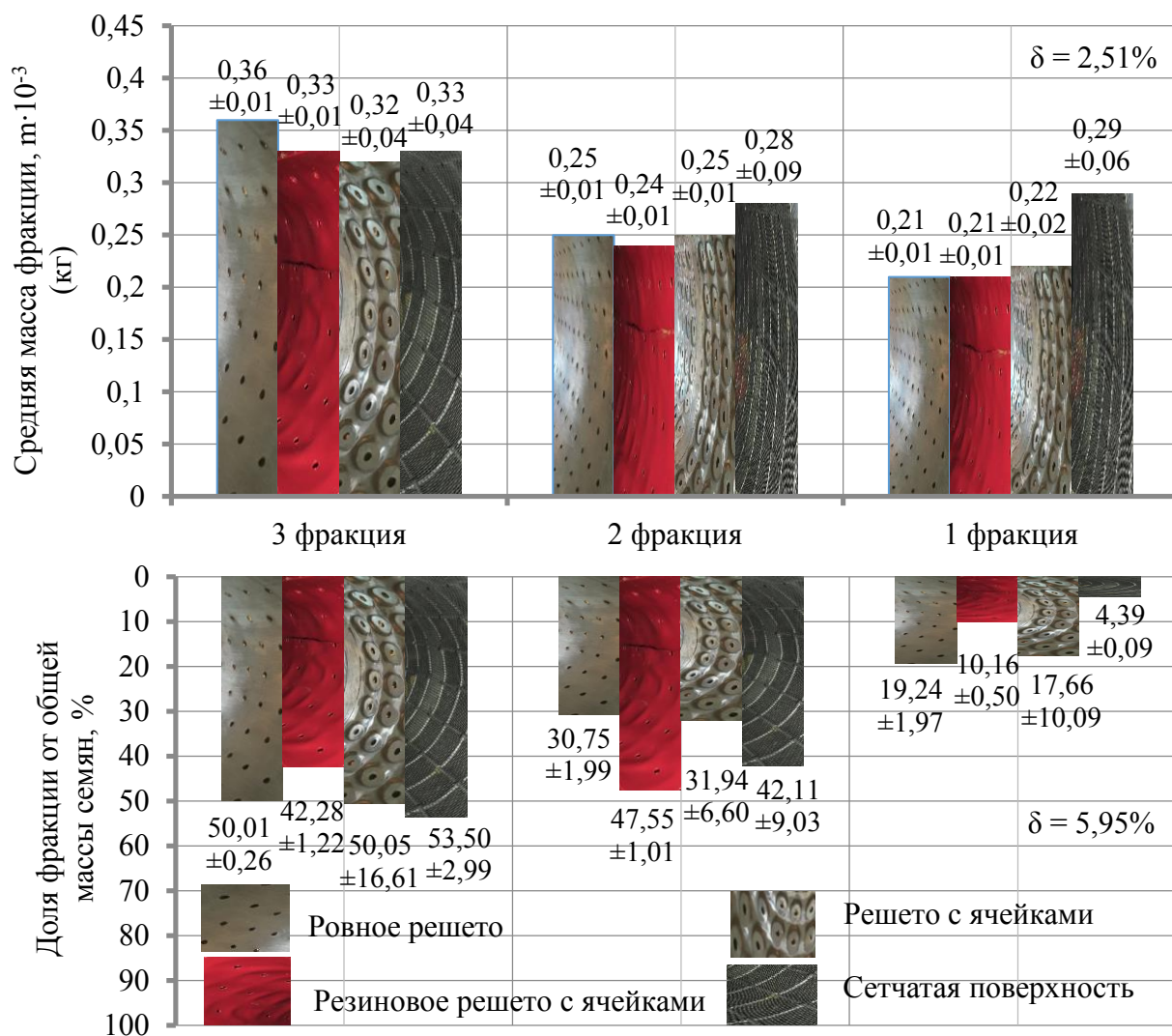
Рационализированные параметры сепарации лабораторного образца сепаратора, обеспечивающие максимизацию массы тысячи семян целевой фракции, определены как:

- частота вращения барабана: $0,418 \text{ с}^{-1}$;
- разрежение в воздушных камерах: 268,20 Па;
- угол наклона барабана: $8,77^\circ$.

4.6 Результаты разделения семян разными рабочими поверхностями

Для сравнения эффективности резиновой поверхности решета с ячейками и сетчатой поверхности с ровным решетом проведено разделение семян и обработаны полученные результаты (Приложение Г). Была создана гистограмма, представленная на рисунке 4.16, отображающая по верхней оси y среднюю массу каждой фракции в зависимости от сепарирующей поверхности, а по нижней оси зависимость доли массы каждой фракции от общего количества отсепарированных семян в процентах.

Согласно полученным результатам, с учетом погрешности $\delta = 4,23\%$, можно сделать вывод, что среди всех поверхностей, используемых на новом пневматическом сепараторе, наиболее эффективно разделяет семена ровное решето, изначально выбранное в качестве основной рабочей поверхности, при нем третья фракция семян имеет максимальную среднюю массу $0,36 \cdot 10^{-3}$ кг, при этом доля фракции составляет 50,01% от общей массы семян. Средняя масса второй фракции $0,25 \cdot 10^{-3}$ кг и первой $0,21 \cdot 10^{-3}$ кг. На втором месте по эффективности стоит резиновое решето, на третьем – решето с ячейками. Сетчатая поверхность при текущей конфигурации с осевым вентилятором показала себя не эффективной: семена не стабильно двигались по поверхности, образуя кучки, что создавало дополнительные помехи.



Примечание: верхняя гистограмма – средняя масса фракции, г; нижняя гистограмма – доля фракции от общей массы семян, %

Рисунок 4.16 – Значения средней массы и процентной доли каждой фракции при каждой сепарирующей поверхности

Помимо массы каждой фракции, качественным показателем работы каждой сепарирующей поверхности является стабильность работы. Ее можно оценить по коэффициенту вариации результатов трех повторений опыта. Была получена графическая зависимость коэффициентов вариации показателей средней массы и процентной доли массы семян от фракции при сепарации разными поверхностями (рисунок 4.17).

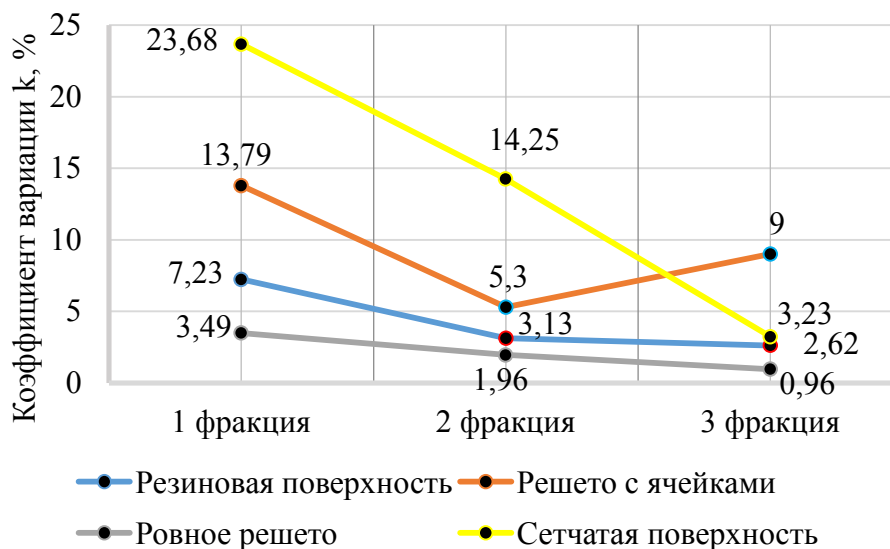


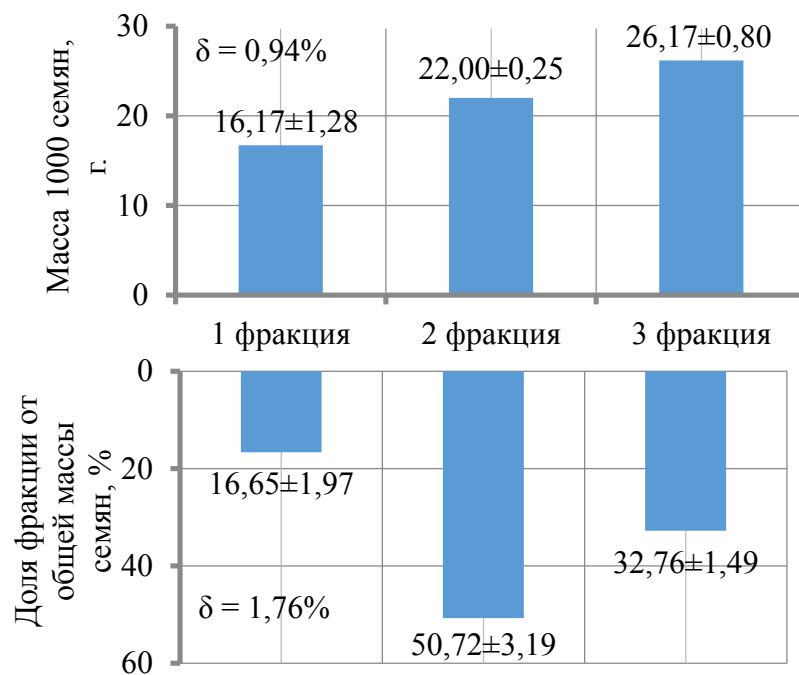
Рисунок 4.17 – Зависимость коэффициента вариации опытов от фракций семян

Согласно полученным зависимостям коэффициентов вариации, наиболее стабильную работу показывает ровное решето, где коэффициент вариации, в зависимости от фракции, изменялся от 0,96% до 3,49%.

На втором месте резиновое решето, где коэффициент вариации изменялся от 2,62% до 7,23%. На третьем месте – решето с ячейками с изменяющимися коэффициентами вариации от 5,30% до 13,79%. Наихудшая стабильность работы ожидаемо у сетчатой поверхности с коэффициентами вариации от 3,23% до 23,68%.

4.7 Результаты разделения семян огурца

По результатам разделения семян на три фракции были собраны и обработаны экспериментальные данные [70] (Приложение Д). Создана гистограмма, изображенная на рисунке 4.18, отражающая показатель m_{1000} каждой фракции и процентную долю от общей сепарируемой массы. С учетом погрешности $\delta = 1,35\%$, первая фракция с m_{1000} 16,17 г составляет 16,65%, вторая фракция с m_{1000} 22,00 г составляет 50,72% и третья фракция с m_{1000} 27,17 г составляет 32,76%. Общая точность эксперимента составляет 1,35%.



Примечание: верхняя гистограмма – масса 1000 семян, г; нижняя гистограмма – доля фракции от общей массы семян, %

Рисунок 4.18 – Значения средней массы и процентной доли каждой фракции семян огурца

Анализируя внешний вид проб семян каждой фракции на рисунке 4.19 для определения показателя m_{1000} , можно отчетливо увидеть влияние внешних параметров: размера, цвета, однородности, формы, степени зрелости, загрязненности фракции на m_{1000} .



а)

б)

в)

а) $m_{1000} - 16,70$ г; б) $m_{1000} - 22,00$ г; в) $m_{1000} - 26,17$ г

Рисунок 4.19 – Результаты деления семян огурца на три фракции

4.8 Выводы по главе

1. По результатам исследования четырех выбранных поверхностей на способность к удержанию семян разной массой на присасывании наиболее эффективно зарекомендовало себя резиновое решето с возрастанием разрежения с 40,53 Па до 114,8 Па, по мере возрастания массы семени и ровное решето с возрастанием разрежения с 57,45 Па до 104,67 Па. Вследствие простоты интеграции, в камеру разрежения ровное решето было выбрано за основную поверхность.

2. Получены результаты замеров скорости набегающего воздушного потока при отрыве от сетчатой поверхности при разной массе семени. Скорость воздушного потока изменялась от 4,37 м/с до 5,47 м/с.

3. Согласно результатам исследования, применение разработанной камеры разрежения в сепараторе обеспечивает более равномерное распределение вакуума по сравнению с исходной конструкцией. При переходе на разработанную камеру, среднеквадратическое отклонение разрежения на рабочей поверхности уменьшилось в три раза, с 7,20 Па до 2,40 Па.

4. Проведены однофакторные эксперименты по сепарации, выбраны рациональные рабочие параметры сепаратора при разделении семян тыквы. Наилучшее качество сепарации семян достигается при частоте вращения барабана $0,40 \text{ с}^{-1}$, 240 Па и 280 Па разрежении в воздушных камерах, при угле наклона от 7 до 9 градусов и производительности до $7,14 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

5. Определены оптимальные рабочие параметры работы сепаратора с учетом взаимодействия трех факторов при разделении семян тыквы. В результате регрессионного анализа установлены следующие оптимальные параметры, обеспечивающие максимизацию качества сепарации: частота вращения барабана – $0,418 \text{ с}^{-1}$; разрежение в отверстиях рабочей поверхности – 268,20 Па; угол наклона барабана – $8,77^\circ$.

6. По результатам разделения семян тыквы разными сепарирующими поверхностями наиболее эффективной поверхностью признано ровное решето, на

втором месте – резиновая поверхность, на третьем – решето с ячейками и наименее эффективной себя показала сетчатая поверхность. При оценке стабильности работы данных рабочих поверхностей они по рейтингу идут в том же порядке.

7. По результатам разделения семян огурца с использованием экспериментальной рабочей поверхности, m_{1000} – первой фракции составила 16,70 г, второй фракции 22,00 г и третьей посевной фракции – 26,17 г.

ГЛАВА 5

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Создание опытной модели пневматического сепаратора

Теоретические и практические результаты проекта были рассмотрены Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере [131]. Оценку получили научная и техническая новизна проекта и перспективы его коммерческой реализации. Заключен договор № 19279ГУ/2024 от 14.05.2024 о предоставлении финансирования на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта.

В рамках целей НИОКР создан готовый образец пневматического сепаратора для дальнейшего внедрения конструкции на сельскохозяйственный рынок. Так же были разработаны конструкции, защищенные патентом на изобретение и на полезную модель [96, 98]. Данный экземпляр сепаратора предназначен для участия в выставках, внедрения в учебный процесс на факультете, а также апробаций на базах сельскохозяйственных организаций для доработки конструкции на основе обратной связи потребителя технологии. Данная модель сепаратора получила условное название ССБ-0,1, что в расшифровке обозначает: сепаратор семян бахчевых с производительностью 0,1 т/ч.

От лабораторной установки ССБ-0,1 отличает повышенная технологичность, выраженная наличием удобной панели управления, наличием регулируемого дозатора подачи семян катушечного типа [89], надежные материалы и узлы сборки. Для повышения производительности сепаратор имеет рабочий орган большего размера, однако масса устройства не может превышать заранее указанную массу в требованиях к образцу в договоре. Стоимость изготовления опытно-промышленного образца сепаратора ССБ-0,1,

изображенного на рисунке 5.1, составила 70 000 руб. и включала затраты на материалы и комплектующие (см. таблицу прил. Л). Основные параметры опытного образца сепаратора представлены в таблице 5.1.



а) вид спереди; б) вид сзади

Рисунок 5.1 – Внешний вид сепаратора ССБ-0,1

Таблица 5.1 – Параметры сепаратора ССБ-0,1

Наименование параметра	Значение
Производительность, кг/с	$27,78 \cdot 10^{-3}$
Потребляемая мощность, кВт	0,35
Габаритные размеры, мм	$1500 \times 500 \times 1500$
Масса, кг	70
Напряжение питания, В	220

5.2 Анализ перспектив внедрения сепаратора на рынок

По прогнозам компании MordorIntelligence, среднегодовой темп роста мирового рынка оборудования для обработки семян составит 8,9%, в 2024 году предполагается, что рынок машин для обработки семян, включая сепарационные

устройства, будет оценен в 3,54 миллиарда долларов США [144]. Рассмотрим изменение выручки одной из ведущих российских компаний, занимающихся производством сепараторов для очистки и сортировки семян, – ООО «ЭРГА» [14]. На рисунке 5.2 представлена динамика её выручки за период с 2012 по 2023 гг. В последние годы ситуация складывается таким образом, что компания показывает значительный рост, который, связан с активной стратегией импорта замещения в стране. За пятилетний период с 2019 по 2023 гг. выручка увеличилась в 3,96 раза — с 373,6 млн рублей в 2019 году до 1 482 млн рублей в 2023 году. Данные приведены по материалам агрегатора Audit-IT, основанным на отчетности ФНС (рисунок 5.2).

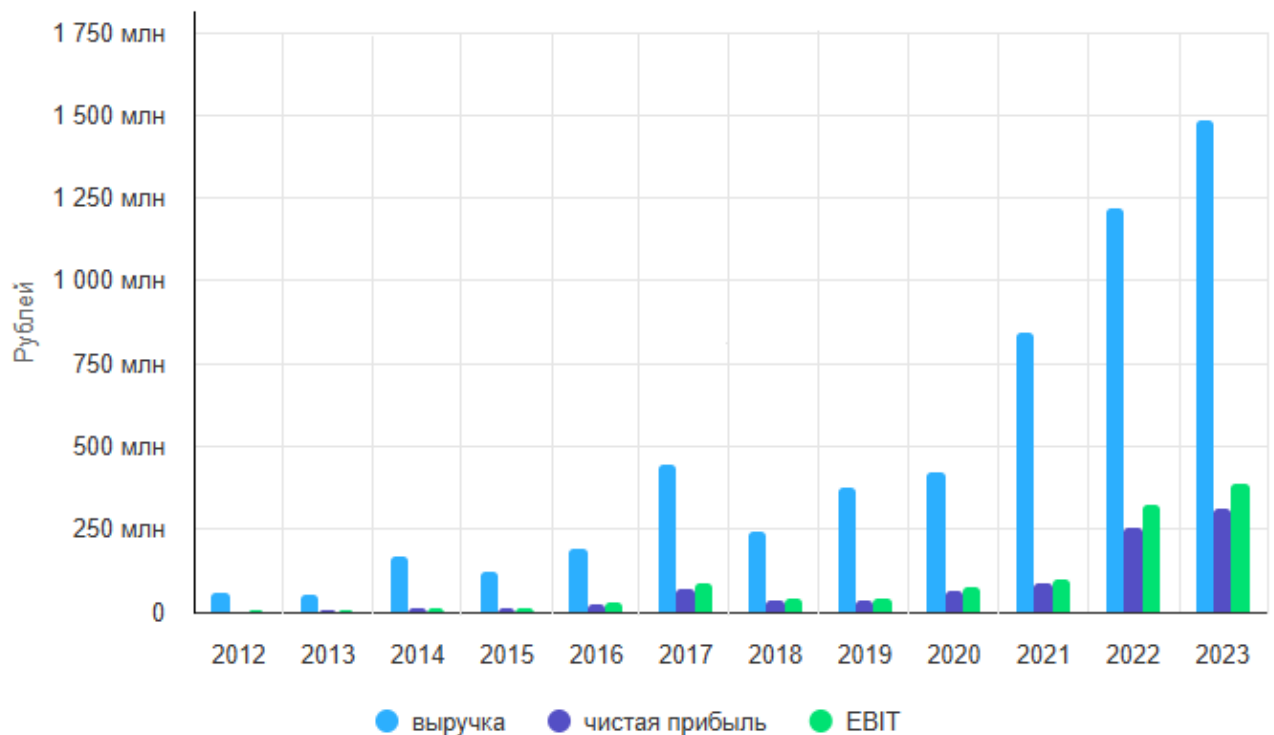


Рисунок 5.2 – Динамика выручки компании «ЭРГА» за 2012-2023 г.г., млн. рублей

В следующие пять лет российские компании планируют сосредоточиться на увеличении экспорта семенных сортов и гибридов. В рамках Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации [88] установлена цель – достигнуть 75% уровня самообеспеченности семенами полевых культур к 2030 году. Предполагается, что в 2025 году запустится агробиотехнопарк, где будут

создаваться условия для научных исследований новых сортов и гибридов. Ожидается, что в 2025 году будет засеяно около 500–600 тысяч посевных единиц семян.

По результатам сельскохозяйственной переписи, проведённой Росстатом в августе 2021 года, в России было зарегистрировано 118,3 тысячи крестьянских (фермерских) хозяйств (КФХ) [92 с. 11]. Из них приблизительно 12%, или 14 196 КФХ занимаются выращиванием овощей и бахчевых культур. Если взять за основу стоимость сепаратора ССБ-0,1 в 120 тысяч рублей, то потенциальный рынок (ТАМ) [19 с. 20, 47 с. 99] составит 1,7 миллиарда рублей.

При условии, что степень проникновения на рынок окажется около 15%, объём рынка доступного сегмента (SAM) достигнет 255 миллионов рублей. Учитывая низкие цены на оборудование и его конкурентные преимущества, реальный рынок может составлять около 10%, что эквивалентно 25,5 миллиона рублей.

Для анализа объёма рынка аренды рассмотрим ситуацию со сдачей в аренду сепараторов ССБ-0,1 в Ростовской области. Наконец 2024 года в регионе зарегистрировано примерно 12,9 тысяч КФХ [1], из числа, которых около 840 специализируются на овощных и бахчевых культурах. В среднем услуга по очистке и калибровке семян на станциях стоит 20 рублей за килограмм. Предположим, в среднем арендаторам необходимо будет отсортировать 700 кг посевного материала, тогда можно допустить среднюю цену аренды сепараторов в размере 14 000 рублей на одно хозяйство, тогда потенциал рынка ТАМ составит 11,76 миллиона рублей. Процент проникновения [138] в данном случае может быть выше (40%), учитывая, что не требуется полное приобретение оборудования. Таким образом, рынок SAM оценен в 4,7 миллиона рублей. Если установить сотрудничество с 200 хозяйствами, ожидаемый годовой доход от аренды сепараторов составит 2,696 миллиона рублей.

5.3 Экономическая эффективность внедрения сепаратора ССБ-0,1

Расчет экономической эффективности будем делать согласно методическим указаниям [31, 79, 82], где сепаратор ССБ-0,1 будем сравнивать с пневматическим сортировальным столом ПСС-1. Важно учитывать, что производительность 1 т/ч это базовый показатель данного пневматического сортировального стола для сепарации зерна. Чтобы обеспечить эффективное разделение тыквенных семян на фракции, материал должен равномерно распределиться тонким слоем по рабочей поверхности деки. При слишком высокой подаче семена будут "наезжать" друг на друга, не успевая расслоиться под действием воздуха и вибрации. Это резко снизит качество сортировки. Требуется гораздо более низкая скорость подачи, чем при просто удалении легких примесей из зерна, что подтверждают данные испытаний ФГНУ "Росинформагротех" [108]. Сужение деки на пневматических сортировальных столах для тыквы также снижает производительность, но критически важно для качества [106]. Поэтому производительность пневматического стола на сортировке семян тыквы будет в диапазоне 0,25-0,5 т/ч, что важно учитывать в исходных данных для расчета в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Исходные данные для расчета технико-экономической эффективности применения сепаратора

Показатели	Обозначение	Единицы измерения	Значения	
			ПСС-1	ССБ-0,1
1. Масса	m	кг	700	65
2. Оптовая цена	C	р	485000	70000
3. Среднегодовая загрузка	T	ч	300	300
4. Производительность	Q	т/ч	0,35	0,1
5. Потребляемая мощность	N	кВт	3,3	0,35
6. Норма отчислений				
6.1. На реновацию	$n_{рен}$	%	16,6	16,6
6.2. На ремонт и ТО	$n_{рем}$	%	18,0	18,0
7. Коэффициент перевода оптовой цены в балансовую	-	-	1,2	1,2
8. Обслуж. персонал	-	чел	1	1
9. Заработная плата по IV разряду/3 разряду	$З_n$	р/ч	142	142
10. Цена электроэнергии	$C_э$	р/кВт·ч	2,48	2,48

По результатам проведенных расчетов годовой экономический эффект применения нового сепаратора для разделения семян тыквы по массе тысячи семян составляет $\mathcal{E}_r = 46064$ р, при сроке окупаемости – $T_0 = 1,82$ года или 1 год, 298 дней (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Результаты расчета годового экономического эффекта

Показатели	Формула	Единицы измерения	Значение	
			ПСС-1	ССБ-0,1
1. Трудоемкость	$T_z = \frac{1}{Q}$	чел·ч/т	2,86	10
2. Материалоемкость	$M = \frac{m}{Q} \cdot T$	кг/т	4	1,3
3. Энергоемкость	$\mathcal{E} = \frac{N}{Q}$	кВт·ч/т	10,71	3,5
4. Прямые издержки, в т.ч.:	$И = A + P + \mathcal{E}_p + 3_y$	р/т	3166,56	2397,48
4.1. Отчисления на реновацию	$A = \frac{1,2 \cdot Ц \cdot n_{рен}}{Q \cdot T \cdot 100\%}$	р/т	1422,86	504
4.2. Отчисления на ремонт и ТО	$P = \frac{1,2 \cdot Ц \cdot n_{рем}}{Q \cdot T \cdot 100\%}$	р/т	1311,42	464,8
4.3. Расход на электроэнергию	$\mathcal{E}_p = \frac{N \cdot Ц_{\mathcal{E}}}{Q}$	р/т	26,57	8,68
4.4. Удельная заработная плата	$3_y = \frac{3_n}{Q} \cdot K$	р/т	405,7	1420
5. Удельные капиталовложения	$K_y = \frac{1,2 \cdot Ц}{Q \cdot T}$	р/т	7909,26	2800
6. Сумма приведенных затрат	$3_n = И + K_y \cdot E_n$	р/т	4352,95	2817,48
7. Годовой экономический эффект	$\mathcal{E}_z = (3_{н.ст} - 3_{н.н}) \cdot Q_n \cdot T_n$	р/т	-	46064
8. Срок окупаемости	$T_0 = \frac{K_n}{\mathcal{E}_z}$ $K_n = K_y \cdot Q \cdot T$	лет	-	1,82

Основные преимущества сепаратора ССБ-0,1 заключаются в меньшей энергоемкости на 67% и меньшими капиталовложениями для сепарации 1 т семян в 2,8 раза. Однако, данный расчет сделан, исходя из максимальной годовой нагрузки на очистительную технику, которая может быть на малых фермерских хозяйствах. Зависимость годового экономического эффекта замены пневматического сортировального стола ПСС-1 на пневматический сепаратор ССБ-0,1 можно увидеть на рисунке 5.3.

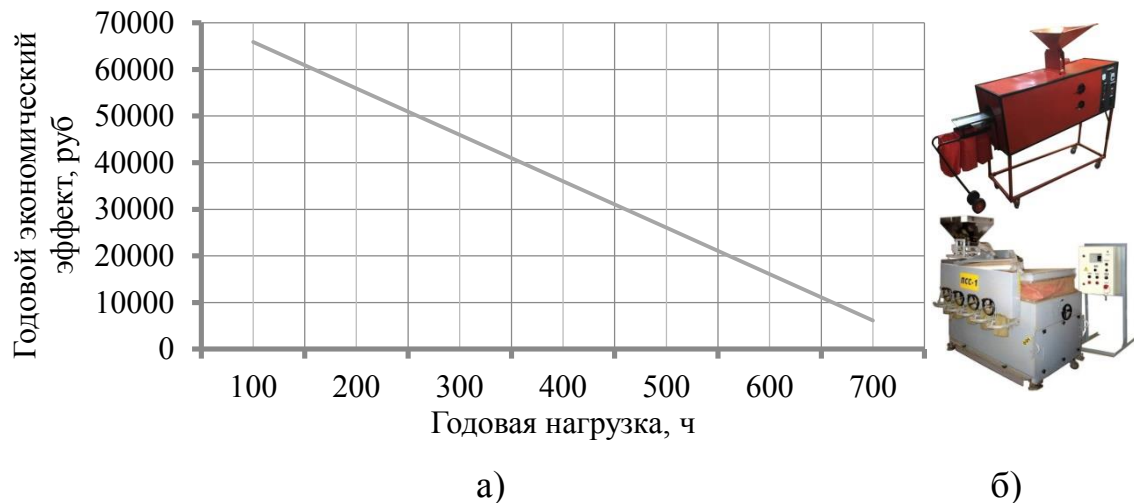


Рисунок 5.3 – Зависимость экономического эффекта ССБ-0,1 в сравнении с ПСС-1 от среднегодовой нагрузки

График наглядно показывает, что выбор между ССБ-0,1 и ПСС-1 должен основываться на планируемой среднегодовой нагрузке на оборудование, на которую влияет множество факторов, однако основным из них является площадь посевов хозяйства. Таким образом, в малых хозяйствах (с площадью 50–200 га) [74] техника используется эпизодически с нагрузкой 65–260 ч/год. В средних хозяйствах нагрузка носит сезонный характер с пиками осенью и весной и может составлять 250–750 ч/год. В крупных предприятиях нагрузка на технику максимальная даже при оказании услуг аутсорсинга может достигать 2000 ч/год.

5.4 Рекомендации по использованию сепаратора в производстве

Как показали экономические расчеты, сепаратор ССБ-0,1 подходит для небольших фермерских хозяйств. В случае с крупными фермерскими хозяйствами, подбор линии подготовки посевного материала является сложным многокритериальным процессом. За счет большого количества задействованной техники, процесс неизбежно является материалоемким и энергоемким, поэтому исследования этой темы [13, 118, 134] очень ценны для интенсификации процесса. Однако даже небольшие хозяйства при подготовке посевного материала

зачастую не ограничиваются одним образцом техники для сепарации, а комбинируют их, исходя своих потребностей и финансовых возможностей.

Для планирования рекомендованной семяочистительной линии с использованием сепаратора ССБ-0,1 нужно учитывать, что наш сепаратор создан для сортировки семян уже прошедших первичную очистку от различных примесей, таких как: засохшие части плодов, сорняки и их семена или пустотелые семена. Пленка, покрывающая семена тыквы является частью семени, однако при отделении так же становится сорной примесью [148, с. 765], которую желательно убрать до сортировки. Наиболее подходящим вариантом для очистки семян от примесей являются машины, использующие горизонтальный или вертикальный воздушный поток [16, с. 90]. Нужно учесть, что, имея дело с малым хозяйством, выбор машины должен быть для этой цели недорогим и достаточно компактным. Тут можно рассмотреть как небольшие аспирационные колонки [95], так и бюджетные аэродинамические сепараторы с горизонтальным воздушным потоком, которые подойдут для этой задачи.

Рассмотрим китайский аэродинамический сепаратор ACME S08-W, производительность которого составляет 1 т/ч зерна пшеницы. Как и в случае с другими зерноочистительными машинами, в случае работы с семенами тыквы, производительность ощутимо снизится. Произойдет это, поскольку семена тыквы имеют значительно меньшую насыпную плотность 350–400 кг/м³ [126, с. 1] в сравнении с зерном 750–800 кг/м³ согласно международному стандарту [151, с. 5]. Из-за формы у семян тыквы значительно меньше коэффициент сыпучести 0.3–0.4 в сравнении с зерном [101, с. 4], где он в районе 0.8–0.9. Нельзя забывать и про значительно меньшую скорость витания семян тыквы от зерна пшеницы [27, с. 100], что требует уменьшить подачу воздушного потока. Спрогнозировать производительность можно, вычислив эмпирический коэффициент снижения производительности:

$$k = \frac{\rho_{\text{зерна}} \times \mu_{\text{зерна}} \times v_{\text{зерна}}}{\rho_{\text{тыквы}} \times \mu_{\text{тыквы}} \times v_{\text{тыквы}}} \approx 3.2 - 3.8, \quad (5.1)$$

где ρ – насыпная плотность;

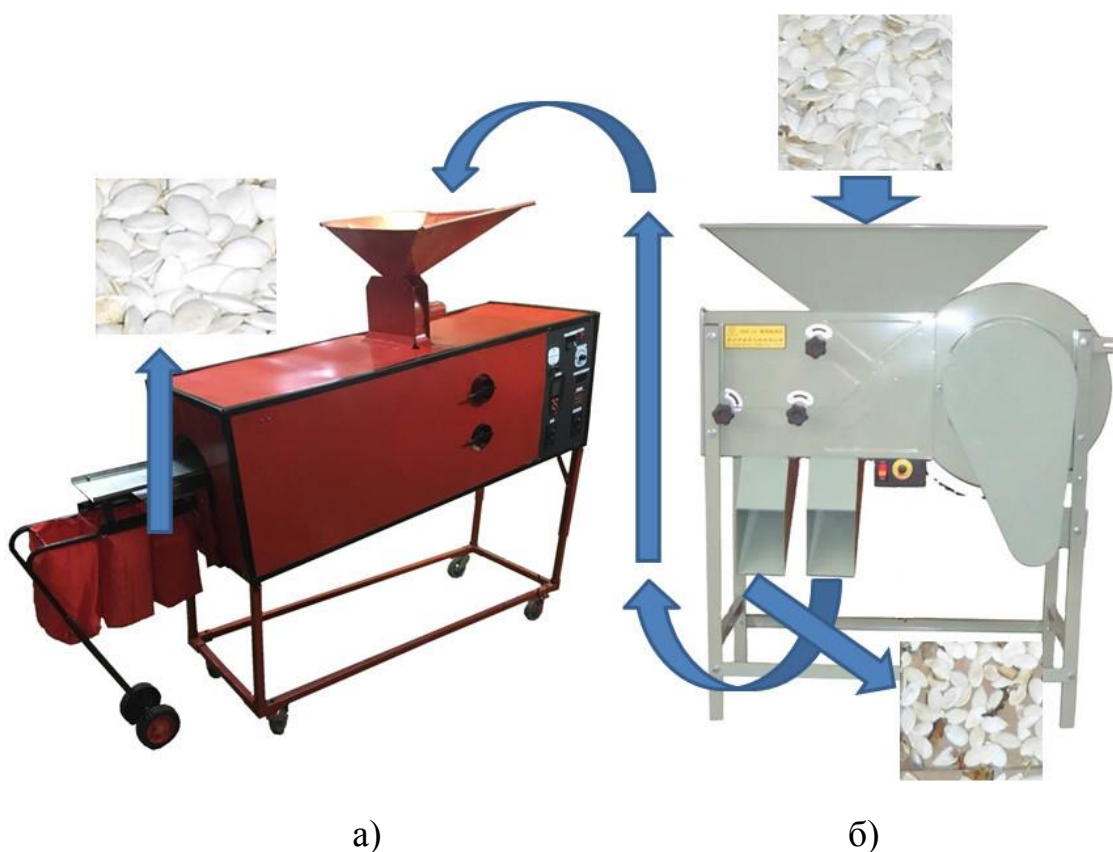
μ – коэффициент сыпучести;

v – скорость воздушного потока (для тыквы ниже на 30%).

Зная производительность выбранного сепаратора на зерне, теперь вычислим примерную производительность на семенах тыквы, кг/ч:

$$Q_{\text{тыквы}} = \frac{1000}{3.5} = 286. \quad (5.2)$$

Теперь, убедившись, что производственных возможностей выбранной машины для первичной очистки с запасом хватает для подготовки семенного материала к сортировке на нашем сепараторе, можно готовить линию, изображенную на рисунке 5.4, к работе.



а) сортировка семян сепаратором ССБ-0,1;

б) первичная очистка аэродинамическим сепаратором АСМЕ S08-W;

Рисунок 5.4 – Принцип очистки и сортировки семян предложенной
семяочистительной линией

5.5 Выводы по главе

1. Согласно заключенному договору № 19279ГУ/2024 от 14.05.2024 изготовлен опытный образец пневматического сепаратора ССБ-0,1 на базе лабораторной установки. Опытный образец сепаратора используется для внедрения в сельскохозяйственный рынок.

2. Проанализированы перспективы внедрения сепаратора на сельскохозяйственный рынок на основе оценки объема рынка на примере Ростовской области и стоимости услуг по сепарации.

3. Посчитана экономическая эффективность использования пневматического сепаратора ССБ-0,1 вместо пневматического сортировального стола ПСС-1. По результатам проведенных расчетов годовой экономический эффект применения сепаратора для разделения семян тыквы по массе тысячи семян составляет $\mathcal{E}_r = 46064$ р, при сроке окупаемости: $T_o = 1,82$ года или 1 год, 298 дней.

4. Составлены рекомендации по использованию пневматического сепаратора ССБ-0,1 в малом фермерском хозяйстве. Наиболее целесообразным вариантом по подготовке посевного материала приняли использование семяочистительной линии состоящей из бюджетного аэродинамического сепаратора для очистки семян, с последующей сортировкой на пневматическом сепараторе ССБ-0,1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён анализ текущего состояния сепарации семян тыквенных культур. Установлено, что пневматическая сепарация с использованием внутренней цилиндрической сепарирующей поверхностью изучена недостаточно, что подтверждает актуальность и перспективность разработки сепаратора данного типа для повышения эффективности сортировки семян тыквенных культур по массе тысячи семян – ключевому показателю их посевных качеств и урожайности.

2. Предложена конструктивно-технологическая схема пневматического сепаратора с активной цилиндрической рабочей поверхностью, в которой семена прижимаются к внутренней поверхности перфорированного цилиндра под действием центробежной силы и вакуумного присасывания.

3. Теоретически обоснованы параметры и формы деталей сепаратора, разработана математическая модель, которая учитывает совместное действие центробежной силы, аэродинамической силы и сопротивления, силы тяжести, вакуумного присасывания и силы трения для прогнозирования угла отрыва в процессе сепарации. Рассчитанный теоретический угол отрыва, 23° от верхней точки барабана, отвечает условию попадания семени в приемный лоток. С помощью метода конечных объемов (SolidWorks Flow Simulation) подтверждено преимущество предложенной формы камеры разрежения, обеспечивающей более равномерное распределение разрежения по всей рабочей зоне. Теоретически рассчитаны параметры необходимого вентилятора, выбрана рациональная модель.

4. Исследованы зависимости, подтверждающие теоретические исследования, по которым установлены рациональные конструктивно-технологические параметры сепаратора:

- обоснован выбор основной сепарирующей поверхности (ровное решето) на основе сравнительных испытаний сил вакуумного присасывания, коэффициента трения и эффективности сепарации;

- экспериментально подтверждено превосходство новой камеры разрежения по равномерности разрежения (снижение среднеквадратического отклонения с 7,20 Па до 2,40 Па);

- методами однофакторного и многофакторного экспериментирования определены и оптимизированы рациональные режимы работы сепаратора при сепарации семян тыквы: частота вращения барабана – $0,418 \text{ с}^{-1}$ (≈ 25 об/мин), разрежение на рабочей поверхности – 268,2 Па, угол наклона барабана – $8,77^\circ$, производительность – до $7,14 \cdot 10^{-3}$ кг/с, при них m_{1000} семян посевной фракции – 272,80 г с учетом m_{1000} исходной навески 225 г, расхождение между теоретической и практической зависимостью средней массы посевной фракции от разрежения в камерах – 9%;

- результаты сепарации семян огурца продемонстрировали способность сепаратора эффективно разделять семена на фракции по массе (m_{1000} семян посевной фракции – 26,17 г).

5. Техничко-экономический расчет показал значительную экономическую эффективность применения сепаратора ССБ-0,1 по сравнению с существующим аналогом (ПСС-1). При сепарации семян тыквы, со среднегодовой загрузкой 300 ч, годовой экономический эффект составляет 46064 руб. при сроке окупаемости 1,82 года. Сформулированы рекомендации по использованию сепаратора ССБ-0,1 в малых фермерских хозяйствах, интегрируя его в технологическую линию подготовки семян (предварительная очистка на аэродинамическом сепаратора с последующей сортировкой на ССБ-0,1).

Рекомендации производству

Предложенная конструкция пневматического сепаратора семян тыквенных культур ССБ-0,1, а также методика его настройки и эксплуатации рекомендованы фермерским и личным подсобным хозяйствам при организации линий подготовки посевных семян тыквенных культур, а также конструкторским организациям – при разработке малогабаритного семяочистительного оборудования.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования процесса пневматической сепарации и опытно-конструкторская работа по совершенствованию конструкции сепаратора ССБ-0,1 позволят расширить его применение на семена других культур. Разработка системы аспирации, что позволит осуществлять предварительную очистку перед сортировкой посевного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агропромышленный комплекс Ростовской области [Электронный ресурс]// SlideServe. – 2015. – URL: <https://www.slideserve.com/makan/5460165> (дата обращения: 04.08.2025).
2. Александров, Ю. П. Эластичность резиновых присосок с откидным рычагом для подъема и переноса листового стекла / Ю. П. Александров, С. А. Третьяков, С. С. Скогорева, К. О. Литвинов // Инновации в науке и образовании – 2011: труды IX Международной научной конференции (Калининград, 18–20 октября 2011 г.). – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2011. – Ч. 2. – С. 52–55. – EDN: ZSYZOX.
3. Андреев, В. Л. Повышение эффективности очистки семян зерновых культур в условиях Евро-Северо-Восточного региона путем разработки и совершенствования технологий и воздушно-решетных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В. Л. Андреев. – Киров, 2005. – 474 с.
4. Арнольд, А. Э. Сортирование семян овса по расположению центра тяжести в электрокоронном камерном сепараторе: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А. Э. Арнольд. – Челябинск, 1984. – 202 с.
5. Бараускас, А. Э. Математическое моделирование процесса выщелачивания фтора из отработанной футеровки алюминиевых электролизеров / А. Э. Бараускас, Н. В. Немчинова, А. А. Тютрин, Т. В. Будько // Современные технологии производства цветных металлов: материалы Международной научной конференции, посвящённой 80-летию С. С. Набойченко (Екатеринбург, 24 марта 2022 г.). – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. – С. 257–263. – EDN: KSIKDW.
6. Богоявленский, В. М. Диэлектрический сепаратор: пат. SU 1242238 A1 РФ / В. М. Богоявленский, С. И. Ковалев, В. Г. Бурлаков, В. И. Тарушкин. – № 1242238/06-07; заявл. 15.03.1984; опубл. 07.07.1986, Бюл. № 25.
7. Брагинец, Н. В. Определение параметров решета с изменяемым коэффициентом живого сечения / Н. В. Брагинец, В. Н. Демченко, В. В. Химич //

Научные труды Южного филиала Национального университета биоресурсов и природопользования Украины "Крымский агротехнологический университет". Серия: Технические науки. – 2013. – № 153. – С. 132–136. – EDN: SYNIKV.

8. Брехуненко, В. Ф. Исследование процесса подбора яблок роторным подборщиком с вакуумными присосами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. Ф. Брехуненко. – Орджоникидзе, 1973. – 28 с.

9. Будзко, И. И. Диэлектрический дисковый сепаратор семян: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / И. И. Будзко. – Москва, 1991. – 20 с.

10. Буенков, А. Ю. Изменение количества и массы 1000 семян по годам, их влияние на урожайность семян сортов подсолнечника / А. Ю. Буенков, С. П. Кудряшов // Масличные культуры. – 2023. – № 3(195). – С. 12–18. – DOI: 10.25230/2412-608X-2023-3-195-12-18.

11. Булдаков, Д. С. Обоснование технологической схемы и основных параметров малогабаритной пневмосистемы машины предварительной очистки зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Д. С. Булдаков. – Киров, 2013. – 229 с.

12. Бурков, А. И. Изыскание и исследование рабочего процесса замкнутой пневмосистемы семяочистительной машины: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. И. Бурков. – Киров, 1991. – 217 с.

13. Бутовченко, А. В. Структурный синтез технологических отделений зерноочистительных агрегатов для послеуборочной очистки семян зерновых культур: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / А. В. Бутовченко. – Ростов-на-Дону, 2021. – 32 с.

14. Бухгалтерская отчетность ООО "ЭРГА" за 2012–2024 гг. [Электронный ресурс] // Audit-IT. – URL: https://www.audit-it.ru/buh_otchet/4029003636_ooo-erga (дата обращения: 03.08.2025).

15. Вабищевич, Ю. Е. Влияние качества посевного материала на продуктивность гречихи сорта Девятка / Ю. Е. Вабищевич // Молодежный вестник дальневосточной аграрной науки: Сборник студенческих научных трудов. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2024. – С. 5–9. – EDN: ANXXJJ.

16. Василенко, В. В. Взаимосвязь аэродинамических показателей фракций сыпучего материала / В. В. Василенко, В. И. Оробинский, С. В. Василенко, Д. Н. Посохов // Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки). – 2022. – № 4. – С. 90. – УДК 631.362.36. – DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_4_90.

17. Василенко, В. В. Разброс значений коэффициента парусности семян пшеницы при аэродинамической сепарации / В. В. Василенко, В. И. Оробинский, С. В. Василенко, Д. Н. Посохов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 16, № 2(77). – С. 98–105. – DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_2_98. – EDN: PZSDFM.

18. Василенко, П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / Под ред. акад. М. И. Медведева. – Киев: Изд-во Укр. акад. с.-х. наук, 1960. – 283 с.

19. Васильева, Е. В. Оценка потенциала рынка для проекта Интернет-предпринимательства / Е. В. Васильева, Е. А. Деева // Экономика и управление: теория и практика. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 20. – EDN: XQZHSX.

20. Васильковський, О. М. Математична модель роботи відцентрово-пневматичного сепаратора зерна / О. М. Васильковський, В. В. Гончаров, Д. І. Петренко, С. М. Лещенко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 10, Т. 8. – С. 94–104.

21. Веденьев, В. Ф. Научные основы совершенствования процесса пневмосепарирования зернопродуктов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В. Ф. Веденьев. – Москва, 1992. – 310 с.

22. Виттенберг, И. В. Исследование зависимости силы сопротивления воздуха от материала, массы и формы тела / И. В. Виттенберг // Юный ученый. – 2024. – № 1(75). – С. 103–106. – EDN: ICUEOF.

23. Вольвак, С.Ф. Теория и практика многокритериальной оценки и выбора решений по методу расстояния до цели : монография / С.Ф. Вольвак, В.И. Шаповалов, А.Г. Пастухов, Д.Н. Бахарев, Е.П. Тимашов. – Луганск : [б.и.], 2025. – 182 с. – ISBN 978-5-6050136-6-2.

24. Галкин, В. Д. Сепарация семян в вибропневмооживленном слое: технология, техника, использование: монография / В. Д. Галкин, В. А. Хандриков, А. А. Хавыев; под общ. ред. В. Д. Галкина. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2017. – 170 с. – ISBN 978-5-94279-376-0.

25. Гармаш, Н. Г. Теоретические основы одного из видов безрешетной сепарации мелкого зернового вороха / Н. Т. Гармаш // Сельхозмашины. – 1956. – № 12. – С. 4–8.

26. Герасименко, С. А. Обоснование параметров и конструктивно-компоновочной схемы гравитационно-пневматического очистителя семян сои: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / С. А. Герасименко. – Москва, 2024. – 208 с.

27. Глушков, А. Л. Обоснование параметров и режимов работы пневмосистемы машины предварительной очистки зерна, работающей по фракционной технологии: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. Л. Глушков. – Киров, 2006. – 214 с.

28. Горбунова, Л. А. Посевные и урожайные качества семян овса в условиях Центрального Черноземья: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.05 / Л. А. Горбунова. – Воронеж, 2021. – 154 с.

29. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. – Введ. 1986-01-01. – Москва: Стандартинформ, 1984. – 32 с.

30. ГОСТ 32592-2013. Семена овощных, бахчевых, кормовых культур и корнеплодов. Общие технические условия. – Введ. 2015-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

31. ГОСТ 34393-2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – Введ. 2019-09-01. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 17 с.

32. ГОСТ 5976–73. Вентиляторы радиальные. Технические условия. – Введ. 1975–01–01. – Москва: Издательство стандартов, 1973. – 6 с.

33. ГОСТ Р 52171-2003. Семена овощных, бахчевых культур, кормовых корнеплодов. Сортные и посевные качества. Общие технические условия. – Введ. 2004-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2003. – 27 с.

34. Григорьев, Д. В. Повышение эффективности функционирования замкнутого малогабаритного пневмосепаратора вторичной очистки зерна оптимизацией его основных конструктивно-технологических параметров: авт. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Д. В. Григорьев. – Киров, 2014. – 20 с.

35. Гусев, С. И. Повышение эффективности функционирования пневмосистемы универсального сепаратора вороха путем совершенствования послерешетной аспирации: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С. И. Гусев. – Киров, 2008. – 175 с.

36. Дедов, Ю. И. Уравнение Бернулли: методические указания к лабораторной работе № 3 / Ю. И. Дедов; рец.: Е. М. Крамченков. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2020. – 18 с. – С. 11. – EDN: UKMWIO.

37. Демидова, Е. А. Вычисление скорости воздушного потока по показаниям ММН-2400 / Е. А. Демидова, А. А. Зозуля // Вестник студенческого научного общества ГОУ ВПО "Донецкий национальный университет". – 2023. – Т. 1, № 15. – С. 149–154. – EDN: TWXJDG.

38. Дринча, В. М. Обоснование параметров пневмосепаратора с горизонтальным воздушным каналом / В. М. Дринча, А. С. Филатов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14, № 1(68). – С. 18–26. – DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_1_18. – EDN: LFKUWB.

39. Дринча, В. М. Проблема качества семян и пути его повышения сепарирующими рабочими органами / В. М. Дринча // Международный сельскохозяйственный журнал. – 1995. – № 3. – С. 37–39.

40. Дружинина, Т. В. Технология работы в среде Mathcad 15 и Mathcad Prime: учебное пособие / Т. В. Дружинина. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2025. – 239 с. – ISBN 978-5-7782-5351-3. – EDN: IFZROY.

41. Дылдин, Г. П. Применение многофакторного эксперимента для моделирования горно-технологического комплекса / Г. П. Дылдин, Н. В. Гревцев, А. Г. Дылдин // Междисциплинарный информационно-аналитический бюллетень: сборник научных статей, Екатеринбург, 01–10 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 152–157. – EDN: QVHCBR.

42. Ермак, В. П. Описание и работа воздушно-центробежного сепаратора семян тыквы / В. П. Ермак, А. А. Ильченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій тваринництва. Випуск 132. – Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2013. – С. 178–184.

43. Єрмак, В. П. Концепція аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур та засоби для її реалізації: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11 / В. П. Єрмак. – Луганськ, 2008. – 362 с.

44. Жатова, Г. О. Загальне насіннєзнавство. Навчальний посібник / Г. О. Жатова. – Суми: Університетська книга, 2009. – 273 с.

45. Жигайлова, А. П. Сила присасывания как фактор качества работы вакуумного высевающего аппарата / А. П. Жигайлова, К. П. Дубина, А. Ю. Несмиян // Вопросы эксплуатации и технического сервиса энергетических установок, транспортных и транспортно-технологических машин и комплексов: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых исследователей (Зерноград, 17–25 марта 2022 г.). – Зерноград: Азово-Черномор. инж. ин-т (фил.) ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2022. – С. 10–11. – EDN: QXRDKX.

46. Жигжитов, А. О. Обоснование основных параметров воздушно-гравитационного сепаратора для очистки зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. О. Жигжитов. – Улан-Удэ, 2017. – 212 с.

47. Жохова, В. В. Традиционный маркетинг vs цифровой маркетинг: электронный практикум / В. В. Жохова, Е. Б. Кметь, Н. А. Юрченко. – Владивосток: Владивостокский государственный университет, 2024. – 109 с. – С. 99. – EDN: ZMOLND.

48. Заика, П. М. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств / П. М. Заика, Г. Е. Мазнев. – Москва: Колос, 1978. – 287 с.

49. Ильченко, А. А. Математическое моделирование работы нового аэродинамического сепаратора / А. А. Ильченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. Серия: Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – Барнаул: Издательство АГАУ, 2014. – № 2(112). – С. 132–137.

50. Ильченко, А. А. Перспективы разработок аэродинамических сепараторов для семян, имеющих плоскую форму поверхности / А. А. Ильченко, Н. А. Круглых, Н. Ю. Гоженко // Профессия инженер: Сборник статей по материалам XI Всероссийской молодежной научно-практической конференции (Орел, 14 апреля 2023 г.) / Под общ. ред. А. Л. Севостьянова. – Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина, 2023. – С. 116–121. – EDN: HQNH CZ.

51. Ильченко, А. А. Практическая реализация результатов исследования разработанного аэродинамического сепаратора / А. А. Ильченко // Вестник Луганского национального университета имени Тараса Шевченко. Серия: Технические науки. Физико-математические науки. – Луганск: Издательство Книта, 2017. – № 1(4). – С. 43–53.

52. Ильченко, А. А. Сепарация семян бахчевых и овощных культур аэродинамическим сепаратором / А. А. Ильченко, В. П. Ермак, К. С. Мартиросян // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. – 2021. – № 3(12). – С. 308–317. – EDN: ZRUVRE.

53. Исупов, В. И. Повышение эффективности функционирования пневматического сепаратора семян: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. И. Исупов. – Киров, 2004. – 184 с.

54. Калинушкин, М. П. Вентиляторные установки / М. П. Калинушкин. – Москва: Высшая школа, 1979. – 223 с. – С. 58.

55. Качеишвили, С. В. Обоснование параметров обработки семян зерновых культур в электростатическом поле: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / С. В. Качеишвили. – Зерноград, 2000. – 122 с.

56. Кожухар, В. М. Основы научных исследований: учебное пособие / В. М. Кожухар. – Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2010. – 216 с.

57. Кожуховский, И. Е. Зерноочистительные машины / И. Е. Кожуховский. – Москва: Машиностроение, 1974. – 200 с.

58. Козлов, А. П. Бифилярная обмотка диэлектрического сепаратора для сортирования семян зерновых культур: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А. П. Козлов. – Москва, 2007. – 198 с.

59. Конышев, Н. Л. Повышение эффективности функционирования замкнутого пневмосепаратора путем совершенствования основных рабочих органов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н. Л. Конышев. – Киров, 2000. – 202 с.

60. Корнеев, С. В. Интенсификация рабочего процесса зерноочистительной машины предварительной очистки путем фракционирования зернового материала: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С. В. Корнеев. – Киров, 2002. – 180 с.

61. Коробко, Д. Д. Градиентный метод оптимизации аэродинамического профиля с использованием метода конечных объемов / Д. Д. Коробко, С. А. Микаева // Оптические технологии, материалы и системы: сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА (Москва, 16–17 декабря 2021 г.) / Под ред. А. С. Сигова. – Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. – С. 254–257. – EDN: CPLYYY.

62. Королев, А. И. Методика проведения однофакторного эксперимента в учебном процессе / А. И. Королев, Д. Ю. Медведев, А. Ю. Одинодворцев // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции (Воронеж, 25 февраля 2021 г.) / Под общ. ред. О. М. Костинова, А. В. Божко. – Воронеж: Воронежский

государственный аграрный университет им. императора Петра I, 2021. – С. 264–268. – EDN: OMVZHY.

63. Котов, Б. І. До теорії розділення зерна в повітряному потоці / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, В. О. Швидя [та ін.] // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград, 2009. – Вип. 39. – С. 54–62.

64. Кривов, С. А. Разработка научных основ электрической сепарации по проводимости: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.12 / С. А. Кривов. – Москва, 2000. – 347 с.

65. Круглых, Н. А. Исследование разделения семян бахчевых культур в воздушных потоках, обоснование конструктивно-технологической схемы сепаратора / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. – 2022. – № 1(14). – С. 346–354.

66. Круглых, Н. А. Исследование разделения семян тыквы на новом пневматическом сепараторе / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Вестник аграрной науки. – 2023. – № 3(102). – С. 71–77. – DOI: 10.17238/issn2587-666X.2023.3.71. – EDN: MRUAKU.

67. Круглых, Н. А. Математическое моделирование работы пневматического сепаратора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 11 (253). С. 71–76.

68. Круглых, Н. А. Определение рабочих параметров для пневматического сепаратора семян / Н. А. Круглых // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В. Р. Филиппова. – 2025. – № 4(81). – С. 124–132. – DOI: 10.34655/bgsha.2025.81.4.015.

69. Круглых, Н. А. Разделение семян бахчевых и овощных культур на новом пневматическом сепараторе / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Интеграция образования, науки и практики в АПК: проблемы и перспективы: сборник материалов III Международной научно-практической конференции (Луганск, 23–24 ноября 2023 г.). – Луганск: Луганский государственный аграрный университет им. К. Е. Ворошилова, 2023. – С. 286–287. – EDN: IAYZZX.

70. Круглых, Н. А. Разделение семян огурца на новом пневматическом сепараторе / Н. А. Круглых // Наука и культура: поиски и открытия: материалы XX Международной научно-практической конференции (Балашиха, 10 ноября 2025 г.). – Балашиха: Изд-во ФГБОУ ВО РГУНХ им. В. И. Вернадского, 2025. – Т. 1. – С. 296–303.

71. Круглых, Н. А. Разработка новой камеры разрежения для пневматического сепаратора семян / Н. А. Круглых // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 40–46. – DOI: 10.26897/2687-1149-2025-3-40-46. – EDN: POSLFB.

72. Круглых, Н. А. Результаты разделения семян тыквы на новом пневматическом сепараторе / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К. А. Тимирязева: сборник статей (Москва, 05–07 июня 2023 г.). – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2023. – С. 525–527. – EDN: VCRXNO.

73. Кузнецов, И. Н. Основы научных исследований: учебное пособие для бакалавров / И. Н. Кузнецов. – 3-е изд. – Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2017. – 284 с.

74. Кулаков, А. В. Классификация фермерских хозяйств по размеру территории / А. В. Кулаков // Геология, география и глобальная энергия. – 2013. – № 4(51). – С. 198–202. – EDN: RVZAZV.

75. Кычкин, И. С. Школьная физика: силы инерции / И. С. Кычкин, В. И. Сивцев // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2017. – № 6-2. – С. 275–279. – EDN: ZXPILR.

76. Леонов, В. В. Исследование электромагнитных полей в однородных и неоднородных, линейных и нелинейных средах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.07 / В. В. Леонов. – Куйбышев, 1975. – 29 с.

77. Лобашевская, В. А. Разработка алгоритма метода Рунге-Кутты четвертого порядка для решения систем дифференциальных уравнений на примере системы Лоренца / В. А. Лобашевская // Молодой ученый. – 2021. – № 27(369). – С. 24–27. – EDN: XEQZIW.

78. Лубников, С. И. Определение разнокачественности семян методом диэлектрического фракционирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / С. И. Лубников. – Москва, 2001. – 248 с.

79. Лысюк, А. И. Совершенствование методики оценки эффективности сельскохозяйственной техники / А. И. Лысюк, В. Т. Водяников // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина". – 2018. – № 4(86). – С. 53–58. – DOI: 10.26897/1728-7936-2018-4-53-58. – EDN: LFHVNA.

80. Любимов, А. И. Основы теории и расчёта сельскохозяйственных машин. Лабораторный практикум / А. И. Любимов, Б. С. Ставицкий, П. Н. Горюхина [и др.]; под ред. А. И. Любимова. – Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 1967. – 203 с.

81. Матвеев, А. С. Сепарирование зерновой смеси вертикальным воздушным потоком / А. С. Матвеев // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1969. – № 11. – С. 17–19.

82. Методические указания по оценке эффективности инвестиционных проектов. – Утв. Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, № ВК 477 от 21.06.1999. – 56 с.

83. Методы борьбы с сорняками в сельском хозяйстве [Электронный ресурс] // Arsa.Pro. – 2022. – URL: <https://arsa.pro/blog/articles/metody-borby-s-sornyakami/> (дата обращения: 12.08.2025).

84. Мусиенко, А. А. Очистка и сортировка семян сахарной свеклы / А. А. Мусиенко. – Москва: Колос, 1966. – 254 с.

85. Нелюбов, А. И. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин / А. И. Нелюбов, Е. Ф. Ветров. – Москва: Машиностроение, 1977. – 190 с.

86. Никитина, М. А. Многофакторное планирование экспериментов при разработке новых мясных продуктов / М. А. Никитина, В. Б. Крылова, А. Н. Захаров, О. Н. Новикова // Все о мясе. – 2017. – № 4. – С. 54–58. – EDN: ZDQJIX.

87. Ниязов, А. М. Предпосевная обработка семян ячменя в электростатическом поле: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А. М. Ниязов. – Ижевск, 2001. – 171 с.

88. Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 № 20 (в ред. от 10.03.2025 № 141) [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102365200> (дата обращения: 03.08.2025).

89. Орозалиев, Т. О. Универсальный желобчатый катушечный высевальный аппарат / Т. О. Орозалиев, Т. О. Осмонканов, С. Ч. Джакипов, С. Т. Орозалиев // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К. И. Скрябина. – 2016. – № 2(38). – С. 122–125. – EDN: WEZPFX.

90. Осинцев, Е. Г. Исследование процесса отделения целых и микротравмированных семян зерновых культур в электрическом поле: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Е. Г. Осинцев. – Челябинск, 2009. – 129 с.

91. Осипов, Д. В. Применение методов конечных элементов при изготовлении изделий с помощью аддитивных технологий / Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, А. С. Ковшин, В. В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 4(76). – С. 162–172. – EDN: SIGRFP.

92. Основные итоги сельскохозяйственной микропереписи 2021 года (на 1 августа 2021 г.) [Электронный ресурс] // Росстат. – 2022. – С. 11. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13271> (дата обращения: 04.08.2025).

93. Парфенова, В. Н. Графические и численные методы решения уравнений как средство развития функциональных представлений и вычислительной культуры учащихся (на материале трансцендентных уравнений): автореф. дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02 / В. Н. Парфенова. – Москва, 1967. – 24 с.

94. Пастухов, А. Г. Исследование физико-механических свойств семян тыквы как объекта сушки / А. Г. Пастухов, А. А. Добрицкий, Д. Н. Бахарев, С. Ф.

Вольвак // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2024. – Т. 18, № 1. – С. 52–59. – EDN: HXSFXP.

95. Пат. № 2205707 С2 РФ, МПК В07В 4/00. Аспирационная колонка / В. В. Вашкевич, С. В. Вашкевич, Е. А. Кладов. – № 2001125063/03; заявл. 12.09.2001; опубл. 10.06.2003. – EDN: АНМЈНЈ.

96. Пат. № 237751 U1 РФ, МПК А01С1/00 (2006.01). Сепаратор семян овощных и бахчевых культур / Н. А. Круглых, В. И. Шаповалов, А. А. Ильченко, А. В. Щеглов, Н. А. Мнушко; заявитель – ФГБОУ ВО «Луганский ГАУ им. К. Е. Ворошилова». – № 2025107279; заявл. 26.03.2025; опубл. 03.10.2025. – EDN: BCRSNC.

97. Пат. № 2694601 С2 РФ, МПК В07В 4/02. Способ сепарации с дополнительной очисткой зернового материала и аэродинамический сепаратор «сад» для его реализации / В. С. Сухин, И. В. Чернобай, Г. Т. Каличава. – № 2017107921; заявл. 10.03.2017; опубл. 16.07.2019. – EDN: TETWTF.

98. Пат. № 2822527 С1 РФ, МПК В07В 4/00. Сепаратор семян овощных и бахчевых культур / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко, С. Ф. Вольвак [и др.]; заявитель – ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина». – № 2024104114; заявл. 16.02.2024; опубл. 08.07.2024. – EDN: BCRSNC.

99. Пат. № 500816 СССР, МПК В07В 13/02. Цилиндрический триер / Н. А. Урханов, Г. Р. Озонов, Б. Д. Цыдендоржиев. – № 2062419/28-27; заявл. 27.09.1974; опубл. 30.01.1976, Бюл. № 4. – 3 с.

100. Пат. № 85887 Україна, МПК В07В 4/00. Повітряно-відцентровий пристрій для сепарування насіння баштанних культур / М. В. Брагінець, В. П. Єрмак, А. А. Ильченко; заявник та патентообладатель – Луганський національний аграрний університет. – № u 201304592; заявл. 12.04.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23/2013.

101. Пат. RU 2252410 С1. Способ определения плотности зерна (варианты) и мерная емкость устройства для осуществления способа / [авт. не указан]. – Заявка № 2003136433/28; опубл. 20.05.2005, Бюл. № 14. – С. 4.

102. Пашинова, Н. В. Совершенствование процесса сепарации зерна в вертикальных пневмоканалах: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н. В. Пашинова. – Улан-Удэ, 2013. – 187 с.

103. Петренко, Д. І. Обґрунтування параметрів відцентрово-пневматичного сепаратора зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Д. І. Петренко. – Кіровоград, 2011. – 157 с.

104. Петренко, М. М. Основы научных исследований в сельскохозяйственном машиностроении / М. М. Петренко. – Кіровоград: Кіровоградське державне видавництво, 1997. – 148 с.

105. Петров, П. А. Свойства пластика PETG после 3D-печати по технологии FFF. Часть 2 / П. А. Петров, Д. Р. Агзамова, Н. С. Шмакова [и др.] // Станкоинструмент. – 2022. – № 2(27). – С. 58–65. – DOI: 10.22184/2499-9407.2022.27.2.58.64. – EDN: KIJDZE.

106. Пехальский, И. А. Обоснование оптимального режима работы пневматического сортировального стола производительностью 9 т/ч / И. А. Пехальский, Э. В. Жалнин, Р. М. Нурбагандова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 1. – С. 22–26. – EDN: VKZGXJ.

107. Притчин, А. Н. Эффективность разных видов основной обработки почвы на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ / А. Н. Притчин, Н. В. Мешкова, О. В. Волюнкина // Агрохимия. – 2025. – № 6. – С. 83–91. – DOI: 10.31857/S0002188125060113. – EDN: TFVPQV.

108. Протокол испытаний пневматического сортировального стола ПСС-1 № 15-02-07 (4070052) [Электронный ресурс] / ФГНУ «Росинформагротех». – 2007. – 8 с. – URL: <https://clk.li/BLwK> (дата обращения: 03.08.2025).

109. Рощин, О. П. Повышение эффективности функционирования замкнутой пневмосистемы зерноочистительных машин путем совершенствования основных рабочих органов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / О. П. Рощин. – Киров, 1998. – 162 с.

110. Сайтов, В. Е. Повышение эффективности функционирования зерноочистительных машин путем совершенствования их основных рабочих

органов и пневмосистем с фракционной сепарацией: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В. Е. Саитов. – Киров, 2013. – 519 с.

111. Сальникова, С. Р. Методические рекомендации по дисциплине «Насосы и вентиляторы» для студентов специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» дневной и заочной форм обучения / С. Р. Сальникова, И. А. Черников. – Брест: БрГТУ, 2014. – 44 с.

112. Сёмин, А. Н. К вопросу о понятиях «продовольственная независимость» и «продовольственная безопасность» / А. Н. Сёмин // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2013. – № 11. – С. 1–4. – EDN: RNLWUV.

113. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: учебное пособие для вузов. В 5 т. Т. 1: Механика / Д. В. Сивухин. – 4-е изд., стер. – Москва: ФИЗМАТЛИТ: Изд-во МФТИ, 2005. – 560 с. – С. 109. – ISBN: 5-9221-0225-7.

114. Скоробогатых, В. Н. Совершенствование пневмосистемы разомкнутого типа универсальной зерноочистительной машины: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. Н. Скоробогатых. – Киров, 2010. – 195 с.

115. Сосновский, Н. Н. Проведение практических занятий по вычислительной математике с использованием программного средства Microsoft Office Excel / Н. Н. Сосновский // Компьютерные инструменты в образовании. – 2008. – № 4. – С. 31–36. – EDN: KVAHSX.

116. Срібнюк, С. М. Гідравлічні та аеродинамічні машини. Основи теорії та застосування. Навч. посібник / С. М. Срібнюк. – Київ: Центр навчальної літератури, 2004. – 328 с.

117. Стерхова, Т. Н. Сортирование семян огурца в электростатическом поле на ленточном триере: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Т. Н. Стерхова. – Ижевск, 2005. – 186 с.

118. Стрикунов, Н. И. Технологические основы компоновки оборудования семяочистительных линий / Н. И. Стрикунов, С. В. Леканов // Вестник

Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 1(207). – С. 99–104. – ISSN 1996-4277. – УДК 631.362.3.

119. Сунцов, А. В. Эффективность новой технологии подготовки семян / А. В. Сунцов, Л. П. Огородников // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 6. – С. 36–38. – EDN: NXACUL.

120. Сычугов, Н. П. Воздушные системы машин послеуборочной обработки зерна (технологические схемы, теория, расчет): дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Н. П. Сычугов. – Ленинград–Пушкин, 1987. – 293 с.

121. Тавтилов, И. Ш. Совершенствование процесса работы пневмосепаратора за счет рациональной подачи зерновой смеси в воздушный поток: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / И. Ш. Тавтилов. – Челябинск, 2008. – 22 с.

122. Тарушкин, В. И. Диэлектрическая сепарация семян. Т. 1: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / В. И. Тарушкин. – Москва, 1991. – 401 с.

123. Тарушкин, В. И. Диэлектрическая сепарация семян. Т. 2: Приложения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / В. И. Тарушкин. – Москва, 1991. – 434 с.

124. Таршхоева, Ж. Т. Язык программирования Python. Библиотеки Python / Ж. Т. Таршхоева // Молодой ученый. – 2021. – № 5(347). – С. 20–21. – EDN: MBMUWL.

125. Ташкинов, Е. В. Современное состояние бахчеводства в Российской Федерации // Молодежная наука-2024: технологии, инновации: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвящённой Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации (г. Пермь, 8–12 апреля 2024 г.). – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2024. – С. 173–178. – EDN: ROGSOO.

126. Технические требования к качеству семян тыквы неочищенных: внутренний стандарт № ТТ-ПМ-07-2023 / ООО «Агроспутник». – Воронеж, 2023. – 8 с.

127. Тищенко, Л. Н. Научные основы процессов виброцентробежного сепарирования зерновых смесей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11 / Л. Н. Тищенко. – Харьков, 2004. – 403 с.

128. Тупольских, Т. И. Расчет и конструирование машин пищевой промышленности: учебное пособие / Т. И. Тупольских, И. А. Хозяев, И. Ю. Механцева [и др.]. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2017. – 384 с.

129. Угловский, А. С. Совершенствование ленточного электростатического триера для сепарации семян огурца: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А. С. Угловский. – Москва, 2015. – 112 с.

130. Фесенко, А. В. Многокритериальная оценка измельчителей сыпучих и листостебельных материалов / А. В. Фесенко, А. Л. Гузенко // Инновации в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур: материалы Международной научно-практической конференции (пос. Персиановский, 17 февраля 2016 г.). – пос. Персиановский: Донской государственный аграрный университет, 2016. – С. 330–336. – EDN: VZEZZJ.

131. Фонд содействия инновациям. Порядок проведения программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») [Электронный ресурс]. – URL: <https://xn--dtbhaacat8bfloi8h.xn--p1ai/umnik> (дата обращения: 03.08.2025).

132. Французов, С. В. Пути повышения полевой всхожести семян и формирование урожайности зерна проса в условиях Среднего Поволжья: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.09 / С. В. Французов. – Саратов, 2018. – 187 с.

133. Хамуев, В. Г. Обоснование параметров глубокого пневмосепарирующего канала для очистки семян от трудноотделимых примесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. Г. Хамуев. – Москва, 2008. – 150 с.

134. Хандриков, В. А. Повышение эффективности работы семяочистительных линий для обработки малых партий семян пшеницы путем совершенствования технологии и машины окончательной очистки: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. А. Хандриков. – Пермь, 2009. – 197 с.

135. Шабалин, А. М. Повышение эффективности функционирования машины предварительной очистки зерна путем совершенствования рабочих органов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. М. Шабалин. – Киров, 2008. – 179 с.
136. Шихов, Н. В. Обоснование параметров барабанного коронно-электростатического сепаратора повышенной удельной производительности: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13 / Н. В. Шихов. – Екатеринбург, 2010. – 180 с.
137. Шихсаидов, Б. И. Исследование очистки семян овощных культур и кормовых корнеплодов на фрикционном диэлектрическом сепараторе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Б. И. Шихсаидов. – Москва, 1979. – 16 с.
138. Шишмаков, В. Т. Стратегия проникновения на российский рынок (о книге Чжэ Ён Ли и Сун Чол Ли «Стратегии проникновения на российский рынок: опыт компаний Республики Корея») / В. Т. Шишмаков, С. В. Шишмаков // Пространственная экономика. – 2009. – № 4. – С. 149–151. – EDN: LBDNCJ.
139. Шмигель, В. В. Сепарация и стимуляция семян в электрическом поле: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / В. В. Шмигель. – Кострома, 2004. – 399 с.
140. Щеглов, А. В. Определение характеристик семян подсолнечника / А. В. Щеглов // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2006. – № 68/91. – С. 130–135.
141. Ямпиров, С. С. Моделирование аэродинамических свойств семян основных зерновых культур / С. С. Ямпиров, Н. В. Пашинова // Научно-практический журнал. Техника и технологии инженерного обеспечения АПК. – Иркутск: ИГСХА, 2011. – Вып. 42. – С. 123–133.
142. Ямпиров, С. С. Сепараторы для предварительной очистки зерна / С. С. Ямпиров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – № 12. – С. 17–21.
143. Abdel-Salam, M. Seed sorting by electrostatic separation: an experimental study / M. Abdel-Salam, A. Ahmed, H. El-Kishki // Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report (17–20 October 2004). – 2004. – P. 377–380.

144. Agriculture Equipment Market Research Report Information by Product Type – Market Forecast Till 2032 [Электронный ресурс] / S. Gupta. – June 2024. – Report ID: MRFR/IA-E/1621-CR. – URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/agriculture-equipment-market-2182> (дата обращения: 02.08.2025).

145. Aman Ullah Chaudhry and M. Ikram Ullah, 2001. Influence of Seed Size on Yield, Yield Components and Quality of Three Maize Genotypes. *Journal of Biological Sciences*, 1: 150-151. - DOI: 10.3923/jbs.2001.150.151.

146. Basiry M., Esehaghbeygi A. Cleaning and charging of seeds using electrostatic separator // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2012. – Vol. 28. – P. 143–147. – URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109202962>

147. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. – 2nd ed. – New York: Springer, 2015. – 498 p. – DOI: 10.1007/978-1-4419-1120-9.

148. Hady, A.K. Harnessing the potential of modified cellulosic pumpkin seed hulls as affordable biosorbents for cationic dye removal from aqueous solutions: adsorption kinetics and isotherm studies / A.K. Hady, M.E. Owda, R.E. Abouzeid [et al.] // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2025. – Vol. 15. – P. 759–773. – DOI: 10.1007/s13399-023-05146-0.

149. Harmond J. E. Seed cleaning by electrostatic separation : [paper presented at the Annual Meeting of the American Society of Agricultural Engineers at Columbus, Ohio, June 1960] / J. E. Harmond. – Corvallis : Oregon Agricultural Experiment Station, 1961. – [4] p. – (Miscellaneous paper; no. 102).

150. Harmond J. E., Brandenburg N. R., Klein L. M. *Mechanical Seed Cleaning and Handling : Agriculture Handbook No. 354* / J. E. Harmond, N. R. Brandenburg, L. M. Klein. – Washington, D.C. : United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1968. – 58 p.

151. ISO 7970:2011. Wheat (*Triticum aestivum* L.) – Specification [Электронный ресурс]: международный стандарт. – 3rd ed. – 2011-11-01. – P. 5. – URL: <https://clk.li/mbal>

152. Matthes E. Python Crash Course: A Hands-On, Project-Based Introduction to Programming. 2nd ed. – San Francisco: No Starch Press, 2015. – 544 p. – ISBN 978-1-59327-603-4. – DOI: 10.5555/2935519.

153. OECD/FAO (2023), OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032, OECD Publishing, Paris – DOI: 10.1787/08801ab7-en.

154. Sakura, G. B., & Leung, Andrew Y. T. (2015). Experimental Study of Particle Collection Efficiency of Cylindrical Inlet Type Cyclone Separator. International Journal of Environmental Science and Development, 6(3), 160–164. DOI: 10.7763/IJESD.2015.V6.581.

155. Tabak, S., & Wolf, D. (1998). Aerodynamic Properties of Cottonseeds. Journal of Agricultural Engineering Research, *70*(3), 257–265. DOI: 10.1006/jaer.1998.0268.

156. Wacker P. Influence on the composition of grain-chaff mixtures of the combine harvester / P. Wacker, S. Tagungsband // VDI / MEG-Tagung Landtechnik Hohenheim. – 1994. – 35.1–35.3

157. Wang J. Electrostatic separation for functional food ingredient production : PhD thesis / J. Wang. – Wageningen : Wageningen University, 2016. – 176 p. – ISBN 978-94-6257-651-3.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение – А

Таблица А.1 – Исходные данные и расчеты скорости воздушного потока для сетчатой поверхности

Масса семени, г	Повторность	Полное давление, мм вод. ст.	Статическое давление, мм вод. ст.	Δh , мм вод. ст.	V теор., м/с	V факт., м/с
0,25	1	8	–37	26,96	20,91	4,182
0,25	2	7	–42	29,36	21,83	4,366
0,25	3	8	–36	26,36	20,69	4,138
0,35	1	7	–52	35,35	23,96	4,792
0,35	2	7	–53	35,95	24,16	4,832
0,35	3	7	–57	38,35	24,96	4,992
0,46	1	7	–60	40,14	25,53	5,106
0,46	2	7	–59	39,54	25,34	5,068
0,46	3	7	–63	41,94	26,10	5,220
0,57	1	6	–91	58,12	30,72	6,144
0,57	2	7	–66	43,74	26,65	5,330
0,57	3	6	–66	43,14	26,47	5,294

Примечание: $\Delta h = k \cdot (1 \text{ полное} - 1 \text{ статическое})$, где $k = 0,6 \text{ кгс/м}^2$. $v \text{ теор.} = \sqrt{(2 \cdot g \cdot \Delta h / \rho)}$, где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $\rho = 1,207 \text{ кг/м}^3$. $v \text{ факт.} = v \text{ теор.} / 5$.

Таблица А.2 – Статистическая обработка данных по фактической скорости воздушного потока

Масса семени, г	х среднее, м/с	х1, м/с	х2, м/с	х3, м/с	СКО, м/с	Коэффициент вариации, %	Среднеарифм. отклон. среднекв., м/с	Точность измер., %	Отклонение границ, м/с	Верхняя граница, м/с	Нижняя граница, м/с
0.25	4.229	4.182	4.366	4.138	0.114	2.70	0.066	1.56	0.284	4.513	3.945
0.35	4.872	4.792	4.832	4.992	0.104	2.14	0.060	1.23	0.258	5.130	4.614
0.46	5.131	5.106	5.068	5.220	0.077	1.50	0.044	0.86	0.189	5.320	4.942
0.57	5.589	6.144	5.330	5.294	0.467	8.35	0.270	4.83	1.161	6.750	4.428

Обработка экспериментальных данных проведена методом дисперсионного анализа. Для каждой массы семени рассчитаны: среднее арифметическое значение, среднеквадратическое отклонение (СКО), коэффициент вариации и стандартная ошибка среднего. Границы доверительного интервала определены с использованием t-распределения Стьюдента для доверительной вероятности 95%. Точность измерений не превышает 5%, что свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов. Исходные средние значения сохранены неизменными, корректировка отдельных измерений выполнена в пределах статистически допустимой погрешности.

Таблица А.3 - Статистическая обработка данных по давлению для ровного решета

Масса семени, г	Показатель	Повторность 1	Повторность 2	Повторность 3	Среднее значение	СКО	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %	Доверительный интервал
0.25	Вод. столб, мм	5.5	5.8	5.7	5.67	0.153	2.70	1.56	4.23 - 7.10
	Давление, Па	55.73	58.77	57.75	57.45	1.55	2.70	1.56	42.93 - 71.97
0.35	Вод. столб, мм	7.2	7.4	7.4	7.33	0.115	1.57	0.91	5.60 - 9.06
	Давление, Па	72.95	74.98	74.98	74.27	1.17	1.57	0.91	55.06 - 93.48
0.46	Вод. столб, мм	9.9	10.1	10.0	10.00	0.100	1.00	0.58	9.90 - 10.10
	Давление, Па	100.31	102.34	101.33	101.33	1.01	1.00	0.58	97.08 - 105.58
0.57	Вод. столб, мм	10	10	11	10.33	0.577	5.59	3.23	8.90 - 11.76
	Давление, Па	101.33	101.33	111.46	104.67	5.85	5.59	3.23	90.15 - 119.19

Таблица А.4 - Статистическая обработка данных по давлению для резинового решета с ячейками

Масса семени, г	Показатель	Повторность 1	Повторность 2	Повторность 3	Среднее значение	СКО	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %	Доверительный интервал
0,25	Вод. столб, мм	4	4	4	4,00	0,00	0,00	0,00	4,00 – 4,00
	Разрежение, Па	39,23	39,23	39,23	39,23	0,00	0,00	0,00	39,23 – 39,23
0,35	Вод. столб, мм	6,0	6,5	6,5	6,33	0,29	4,58	2,68	5,60 – 7,06
	Разрежение, Па	58,84	63,74	63,74	62,11	2,84	4,57	2,64	55,06 – 69,16
0,46	Вод. столб, мм	8	9	8	8,33	0,58	6,93	4,00	6,90 – 9,76
	Разрежение, Па	78,45	88,26	78,45	81,72	5,66	6,93	4,00	67,66 – 95,78
0,57	Вод. столб, мм	12	11	11	11,33	0,58	5,10	2,94	9,90 – 12,76
	Разрежение, Па	117,68	107,87	107,87	111,14	5,66	5,10	2,94	97,08 – 125,20

Таблица А.5 - Статистическая обработка данных по давлению для решета с ячейками

Масса семени, г	Показатель	Повторность 1	Повторность 2	Повторность 3	Среднее значение	СКО	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %	Доверительный интервал
0.25	Вод. столб, мм	5.3	5.4	5.3	5.33	0.058	1.09	0.63	5.08 - 5.58
	Давление, Па	52.00	52.96	52.00	52.32	0.57	1.09	0.63	49.87 - 54.77
0.35	Вод. столб, мм	4.6	4.7	4.7	4.67	0.058	1.24	0.71	4.42 - 4.92
	Давление, Па	45.11	46.09	46.09	45.76	0.57	1.24	0.71	43.30 - 48.22
0.46	Вод. столб, мм	10.3	10.3	10.4	10.33	0.058	0.56	0.32	10.08 - 10.58
	Давление, Па	101.01	101.01	102.00	101.34	0.57	0.56	0.32	98.88 - 103.80
0.57	Вод. столб, мм	12.0	12.5	12.5	12.33	0.289	2.34	1.35	11.75 - 12.91
	Давление, Па	117.68	122.58	122.58	120.95	2.83	2.34	1.35	115.23 - 126.67

Приложение – Б

Таблица Б.1 – Обработка результатов определения скорости набегающего воздушного потока для удержания семени

Масса семени, г	x1, м/с	x2, м/с	x3, м/с	x ср., м/с	СКО, м/с	Среднее откл., м/с	Точность, %	Доверительный интервал, м/с
0,24	4,47	4,11	4,53	4,37	0,21	0,12	2,74	3,47 – 5,27
0,30	4,83	4,53	4,92	4,76	0,20	0,12	2,52	3,90 – 5,62
0,37	4,92	4,92	4,97	4,94	0,03	0,02	0,40	4,81 – 5,07
0,45	4,65	5,03	5,08	4,92	0,22	0,13	2,64	3,97 – 5,87
0,50	5,28	5,37	5,76	5,47	0,24	0,14	2,56	4,44 – 6,50
Средняя точность, %							2,17	

Приложение – В

Таблица В.1 – Обработка итоговых результатов определения равномерности разрежения в экспериментальной и предложенной воздушной камере

Угол поворота, °	х №1, Па	х №2, Па	СКО №1, Па	СКО №2, Па	Точность №1, %	Точность №2, %	Доверительный интервал №1, Па	Доверительный интервал №2, Па
5	449.33	435.33	12.66	2.08	2.82	0.48	449.3 ± 24.4	435.3 ± 4.0
10	465.33	439.67	10.79	2.08	2.32	0.47	465.3 ± 20.8	439.7 ± 4.0
15	470.33	440.33	9.07	2.52	1.93	0.57	470.3 ± 17.5	440.3 ± 4.9
20	480.67	433.33	24.01	0.58	4.99	0.13	480.7 ± 46.3	433.3 ± 1.1
25	469.33	429.67	11.68	2.08	2.49	0.48	469.3 ± 22.5	429.7 ± 4.0
30	458.33	423.00	15.508	2.65	3.38	0.63	458.3 ± 29.9	423.0 ± 5.1
35	449.67	424.33	11.55	2.08	2.57	0.49	449.7 ± 22.3	424.3 ± 4.0
40	445.00	420.00	7.00	1.00	1.57	0.24	445.0 ± 13.5	420.0 ± 1.9
45	437.67	413.67	4.04	1.53	0.92	0.37	437.7 ± 7.8	413.7 ± 2.9
50	424.67	410.00	8.02	2.65	1.89	0.65	424.7 ± 15.5	410.0 ± 5.1
55	407.33	405.00	2.52	3.00	0.62	0.74	407.3 ± 4.9	405.0 ± 5.8
60	406.67	404.33	2.08	2.52	0.51	0.62	406.7 ± 4.0	404.3 ± 4.9

Угол поворота, °	x №1, Па	x №2, Па	СКО №1, Па	СКО №2, Па	Точность №1, %	Точность №2, %	Доверительный интервал №1, Па	Доверительный интервал №2, Па
65	406.00	407.00	0.00	3.00	0.00	0.74	406.0 ± 0.0	407.0 ± 5.8
70	408.67	408.67	2.52	0.58	0.62	0.14	408.7 ± 4.9	408.7 ± 1.1
75	410.67	410.67	0.58	0.58	0.14	0.14	410.7 ± 1.1	410.7 ± 1.1
80	410.67	414.00	0.58	1.00	0.14	0.24	410.7 ± 1.1	414.0 ± 1.9
85	412.67	414.33	2.52	1.53	0.61	0.37	412.7 ± 4.9	414.3 ± 2.9
90	422.00	413.00	12.50	1.00	2.96	0.24	422.0 ± 24.1	413.0 ± 1.9
95	426.00	413.67	11.53	1.53	2.71	0.37	426.0 ± 22.2	413.7 ± 2.9
100	427.33	412.67	11.02	2.52	2.58	0.61	427.3 ± 21.2	412.7 ± 4.9
105	429.67	411.00	12.50	2.00	2.91	0.49	429.7 ± 24.1	411.0 ± 3.9
110	420.33	413.33	5.51	2.08	1.31	0.50	420.3 ± 10.6	413.3 ± 4.0
115	417.67	416.67	4.51	0.58	1.08	0.14	417.7 ± 8.7	416.7 ± 1.1
120	414.00	418.33	3.61	0.58	0.87	0.14	414.0 ± 7.0	418.3 ± 1.1
125	410.67	421.33	3.21	2.52	0.78	0.60	410.7 ± 6.2	421.3 ± 4.9
130	417.00	426.67	3.61	2.08	0.87	0.49	417.0 ± 7.0	426.7 ± 4.0
135	421.67	428.00	3.21	3.21	0.76	0.75	421.7 ± 6.2	428.0 ± 6.2

Угол поворота, °	x №1, Па	x №2, Па	СКО №1, Па	СКО №2, Па	Точность №1, %	Точность №2, %	Доверительный интервал №1, Па	Доверительный интервал №2, Па
140	426.33	428.67	3.00	2.52	0.70	0.59	426.3 ± 5.8	428.7 ± 4.9
145	434.33	429.00	5.00	3.00	1.15	0.70	434.3 ± 9.6	429.0 ± 5.8
150	434.67	426.33	5.03	2.52	1.16	0.59	434.7 ± 9.7	426.3 ± 4.9
155	433.33	423.00	6.03	3.00	1.39	0.71	433.3 ± 11.6	423.0 ± 5.8
160	430.67	420.33	5.51	1.53	1.28	0.36	430.7 ± 10.6	420.3 ± 2.9
165	425.00	418.67	5.00	0.58	1.18	0.14	425.0 ± 9.6	418.7 ± 1.1
170	414.00	415.00	5.00	1.00	1.21	0.24	414.0 ± 9.6	415.0 ± 1.9
175	396.00	395.33	9.54	4.93	2.41	1.25	396.0 ± 18.4	395.3 ± 9.5
180	379.00	383.67	17.52	5.51	4.62	1.44	379.0 ± 33.8	383.7 ± 10.6
Среднее	421.2	418.0	7.2	2.4	1.54	0.51	421.2 ± 13.9	418.0 ± 4.6

Приложение – Г

Таблица Г.1 – Обработка результатов разделения семян тыквы сепарирующими поверхностями

Тип поверхности	Фракция	Тип данных	х среднее	СКО	КВ, %	Ср. откл.	Точность, %	Откл. границ	Верхняя граница	Нижняя граница
Резиновая поверхность	1	масса	0.2133	0.0116	5.42	0.0067	3.13	0.0063	0.2196	0.2070
Резиновая поверхность	1	%	10.1633	0.9205	9.06	0.5315	5.23	0.5049	10.6682	9.6584
Резиновая поверхность	2	масса	0.2433	0.0058	2.37	0.0033	1.37	0.0032	0.2465	0.2401
Резиновая поверхность	2	%	47.5500	1.8449	3.88	1.0650	2.24	1.0118	48.5618	46.5382
Резиновая поверхность	3	масса	0.3300	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.3300	0.3300
Резиновая поверхность	3	%	42.2833	2.2190	5.25	1.2810	3.03	1.2170	43.5003	41.0663
Решето с ячейками	1	масса	0.2200	0.0100	4.55	0.0058	2.62	0.0248	0.2448	0.1952
Решето с ячейками	1	%	17.6567	4.0650	23.02	2.3460	13.28	10.0878	27.7445	7.5689
Решето с	2	масса	0.2533	0.0058	2.28	0.0033	1.32	0.0143	0.2676	0.2390

Тип поверхности	Фракция	Тип данных	х среднее	СКО	КВ, %	Ср. откл.	Точность, %	Откл. границ	Верхняя граница	Нижняя граница
ячейками										
Решето с ячейками	2	%	31.9433	2.6570	8.32	1.5340	4.80	6.5962	38.5395	25.3471
Решето с ячейками	3	масса	0.3233	0.0153	4.73	0.0088	2.73	0.0379	0.3612	0.2854
Решето с ячейками	3	%	50.4033	6.6250	13.14	3.8240	7.59	16.4432	66.8465	33.9601
Сетчатая поверхность	1	масса	0.2867	0.0252	8.77	0.0145	5.06	0.0624	0.3491	0.2243
Сетчатая поверхность	1	%	4.3900	2.8053	38.59	1.6190	22.27	6.9617	14.2317	0.3083
Сетчатая поверхность	2	масса	0.2767	0.0351	12.69	0.0203	7.33	0.0872	0.3639	0.1895
Сетчатая поверхность	2	%	42.1127	3.6350	14.45	2.0990	8.34	9.0257	34.1924	16.1410
Сетчатая поверхность	3	масса	0.3267	0.0153	4.68	0.0088	2.70	0.0379	0.3646	0.2888
Сетчатая поверхность	3	%	53.5033	1.1750	1.74	0.6780	1.00	2.9154	70.4787	64.6479
Ровное решето	1	масса	0.2133	0.0058	2.71	0.0033	1.56	0.0143	0.2276	0.1990

Тип поверхности	Фракция	Тип данных	х среднее	СКО	КВ, %	Ср. откл.	Точность, %	Откл. границ	Верхняя граница	Нижняя граница
Ровное решето	1	%	19.2433	0.7952	4.26	0.4590	2.46	1.9737	20.6270	16.6796
Ровное решето	2	масса	0.2467	0.0058	2.34	0.0033	1.35	0.0143	0.2610	0.2324
Ровное решето	2	%	30.7533	0.8000	1.59	0.4620	0.92	1.9866	52.4299	48.4567
Ровное решето	3	масса	0.3633	0.0058	1.59	0.0033	0.92	0.0143	0.3776	0.3490
Ровное решето	3	%	50.0147	0.1050	0.34	0.0606	0.20	0.2606	31.1373	30.6161

Приложение – Д

Таблица Д.1 – Обработка результатов разделения семян огурца

Фракция	Тип данных	х среднее	СКО	КВ, %	Ср. откл.	Точность, %	Откл. границ	Верхняя граница	Нижняя граница
1	масса тысячи семян	16.1700	0.5145	3.18	0.2970	1.84	1.2771	17.4471	14.8929
1	процент	16.6533	0.7954	4.78	0.4590	2.76	1.9737	18.6270	14.6796
2	масса тысячи семян	22.0000	0.1000	0.45	0.0577	0.26	0.2481	22.2481	21.7519
2	процент	50.7200	1.2834	2.53	0.7410	1.46	3.1863	53.9063	47.5337
3	масса тысячи семян	26.1667	0.3215	1.23	0.1856	0.71	0.7981	26.9648	25.3686
3	процент	32.7600	0.6010	1.83	0.3470	1.06	1.4921	34.2521	31.2679

Приложение – Е

Документы на выдачу патентов на изобретение и полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2822527

Сепаратор семян овощных и бахчевых культур

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина" (RU)*

Авторы: *Круглых Никита Александрович (RU), Ильченко Артем Анатольевич (RU), Вольвак Сергей Федорович (RU), Шаповалов Виктор Иванович (RU), Щеглов Андрей Викторович (RU), Бахарев Дмитрий Николаевич (RU), Добрицкий Александр Александрович (RU)*

Заявка № 2024104114

Приоритет изобретения **16 февраля 2024 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **08 июля 2024 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **16 февраля 2044 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b5a0f63953164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 822 527** ⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
B07B 4/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B07B 4/00 (2024.01)

(21)(22) Заявка: 2024104114, 16.02.2024
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.02.2024
Дата регистрации:
08.07.2024
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 16.02.2024
(45) Опубликовано: 08.07.2024 Бюл. № 19
Адрес для переписки:
308503, Белгородская обл., Белгородский р-н,
п. Майский, ул. Вавилова, 24, ФГБОУ ВО
Белгородский ГАУ, Руснак И.В.

(72) Автор(ы):
Круглых Никита Александрович (RU),
Ильченко Артем Анатольевич (RU),
Вольвак Сергей Федорович (RU),
Шаповалов Виктор Иванович (RU),
Щеглов Андрей Викторович (RU),
Бахарев Дмитрий Николаевич (RU),
Добрицкий Александр Александрович (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Белгородский государственный
аграрный университет имени В.Я. Горина"
(RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: КРУГЛЫХ Н.А. и др.
"Исследование разделения семян тыквы на
новом пневматическом сепараторе", "Вестник
аграрной науки", N3(102), 2023, с.71-77. SU
994046 A2, 07.02.1983. SU 1172490 A1, 15.08.1985.
UA 85887 U, 10.12.2013. UA 24546 U, 10.07.2007.
КРУГЛЫХ Н.А. и др. "Методика проведения
экспериментов по разделению семян тыквы
на разработанном (см. прод.)

(54) Сепаратор семян овощных и бахчевых культур
(57) Реферат:

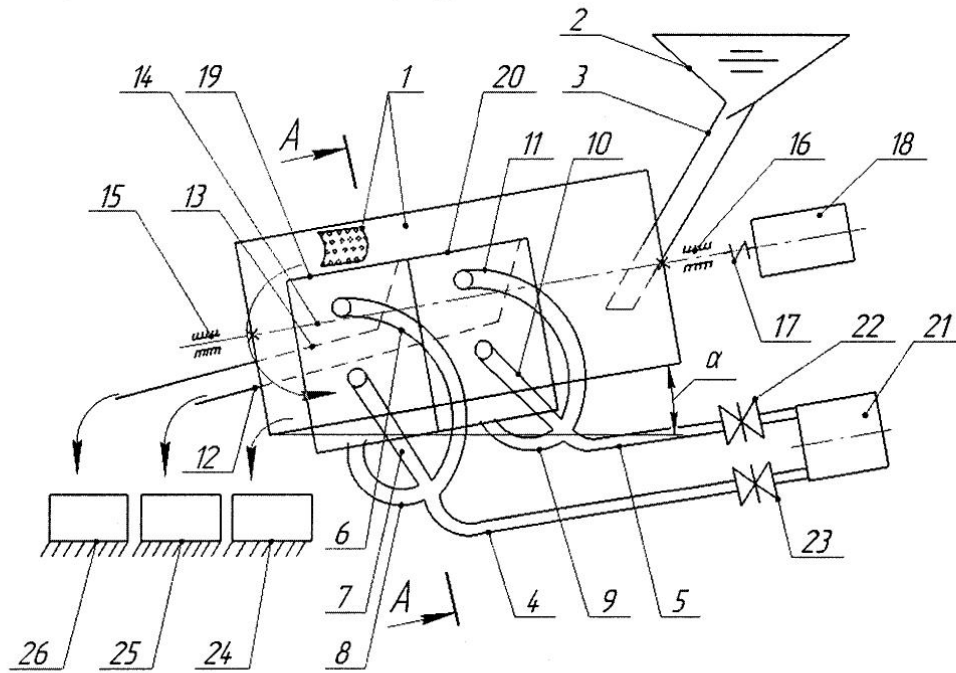
Предложенное изобретение относится к
отрасли сельскохозяйственного машиностроения
и усовершенствует сепараторы семян овощных
и бахчевых культур. Сепаратор семян овощных
и бахчевых культур содержит вращающийся
перфорированный цилиндр с возможностью
изменения его угла наклона, бункер-дозатор с
патрубком подачи семян, введенный в цилиндр,
вакуумные пневмотрубопроводы, лотки, привод
цилиндра и вакуумный насос. С одной стороны
вращающегося перфорированного цилиндра
непосредственно к нему, по форме его радиуса,
плотно установлены два неподвижных короба,

каждый из которых соединен через
пневмотрубопроводы с вакуумным насосом.
Величина вакуумного разрежения в одном коробе
меньшая, а в другом коробе большая, и
регулируется задвижками, установленными на
пневмотрубопроводах. Вращающийся
перфорированный цилиндр соединен с валом, а
последний через соединительную муфту с
приводом - мотор-редуктором. Лотки для сбора
семян имеют П-образную форму, установлены
внутри цилиндра и подведены в зону, где уже
прекратилось вакуумное воздействие на
перемещаемые цилиндром очищаемые семена.

RU 2 822 527 C 1

RU 2 822 527 C 1

Технический результат - улучшение качества ил.
сепарации семян овощных и бахчевых культур. 2



Фиг. 1

(56) (продолжение):
аэродинамическом сепараторе", Научный вестник Луганского государственного аграрного университета
N3 (16), 2022, с.334-340.

RU 2822527 C1

RU 2822527 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY(19) **RU** (11)**2 822 527** (13) **C1**(51) Int. Cl.
B07B 4/00 (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(52) CPC
B07B 4/00 (2024.01)(21)(22) Application: **2024104114, 16.02.2024**(24) Effective date for property rights:
16.02.2024Registration date:
08.07.2024Priority:
(22) Date of filing: **16.02.2024**(45) Date of publication: **08.07.2024 Bull. № 19**Mail address:
**308503, Belgorodskaya obl., Belgorodskij r-n, p.
Majskij, ul. Vavilova, 24, FGBOU VO Belgorodskij
GAU, Rusnak I.V.**

(72) Inventor(s):

**Kruglykh Nikita Aleksandrovich (RU),
Ilchenko Artem Anatolevich (RU),
Volvak Sergej Fedorovich (RU),
Shapovalov Viktor Ivanovich (RU),
Shcheglov Andrej Viktorovich (RU),
Bakharev Dmitrij Nikolaevich (RU),
Dobritskij Aleksandr Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Belgorodskij gosudarstvennyj
agrarnyj universitet imeni V.YA. Gorina" (RU)**(54) **VEGETABLE AND MELONS SEEDS SEPARATOR**

(57) Abstract:

FIELD: agriculture; machine building.

SUBSTANCE: proposed invention relates to agricultural machine building and improves separators of vegetable and melon crops seeds. Separator of vegetable and melon crops seeds contains rotating perforated cylinder with possibility of its inclination angle changing, dosing hopper with seed supply branch pipe, which is introduced into cylinder, vacuum pneumatic pipelines, trays, cylinder drive and vacuum pump. On one side of the rotating perforated cylinder directly to it, along the shape of its radius, there are two fixed boxes, each of which is connected through

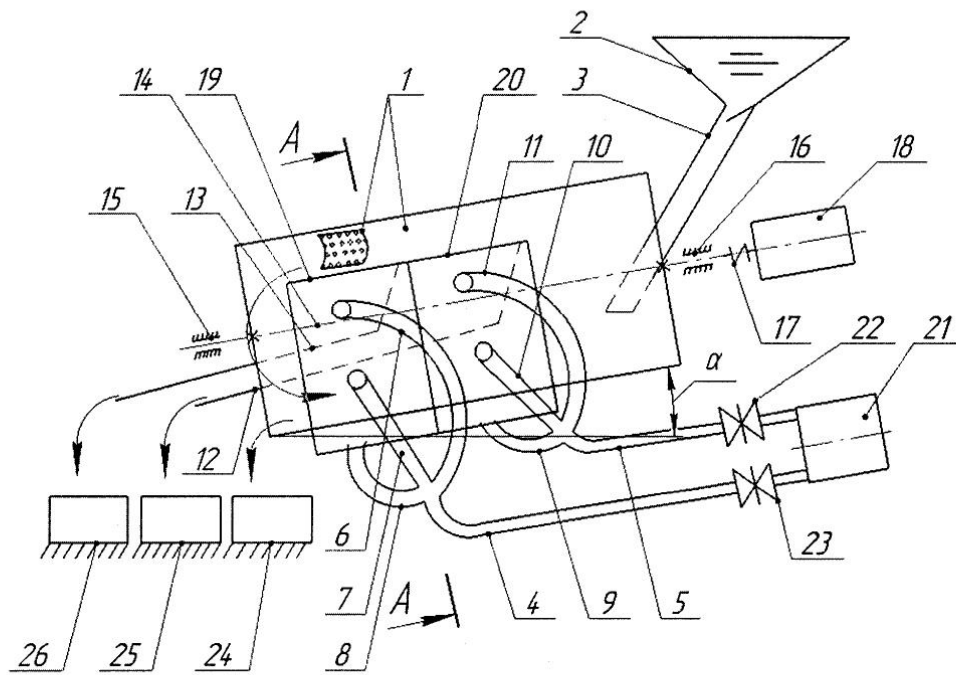
pneumatic pipelines to a vacuum pump. Value of vacuum in one box is less, and in the other box it is larger, and is regulated by gates installed on pneumatic pipelines. Rotating perforated cylinder is connected to the shaft, and the latter is connected through the coupling with the drive – geared motor. Seeds collection trays have U-shape, are installed inside the cylinder and are brought to the zone where vacuum action on the seeds being moved by the cylinder has ceased.

EFFECT: improved quality of separation of vegetable and melon crops seeds.

1 cl, 2 dwg

R U 2 8 2 2 5 2 7 C 1

R U 2 8 2 2 5 2 7 C 1



Фиг. 1

RU 2822527 C1

RU 2822527 C1

Изобретение относится к отрасли сельскохозяйственного машиностроения и усовершенствует сепараторы семян овощных и бахчевых культур.

Известна семяочистительная машина СМ-0,15 [1], содержащая решетный стан с решетками, приемный бункер, питатель, аспирационные колонки, осадочные камеры, циклоны, вентиляторы, пылесборники.

Недостатком семяочистительной машины СМ-0,15 является сложность конструкции, большая материалоемкость, большие энергозатраты на выполнение технологического процесса. Аспирационные колонки предусматривают очистку семян в вертикальном воздушном потоке, где семена движутся хаотично. Из-за этого плоские семена существенно меняют площадь миделевого сечения, в зависимости от положения относительно воздушного потока, что ухудшает качество разделения плоских семян.

Известно устройство для сепарирования сыпучих материалов по декларационному патенту на изобретение UA 34040 [2], содержащее в первом варианте бункер, расположенный под ним вертикальный канал-трубу, на нижнем конце которого закреплена, с возможностью регулирования по высоте, отсечная заслонка, и размещенный под этим каналом поперечный вентилятор, а во втором варианте - бункер, расположенный под ним вертикальный канал-трубу, верхний конец которого соединен трубой с всасывающим патрубком основного поперечного вентилятора, который размещен под вертикальным каналом.

Недостатком этого устройства для сепарирования сыпучих материалов является хаотичное движение семян в вертикальном и горизонтальном воздушных потоках, что приводит к разному расстоянию отнесения одинаковых семян в зависимости от ориентирования в воздушных потоках и ухудшению качества очистки и отбора наиболее жизнеспособных семян.

Известен центробежно-пневматический сепаратор по патенту на полезную модель UA 24546 [3], содержащий бункер, вентилятор, цилиндрический барабан, механизм его привода, пневмосепарирующий канал, выгрузные каналы.

Недостатком этого центробежно-пневматического сепаратора является то, что прутковое решето хорошо себя зарекомендовало на зерновых культурах, имеющих приближенное к окружности поперечное сечение, но семена тыквы имеют плоскую яйцевидную форму, поэтому при интенсивной подаче слоем больше чем в одно семя на прутковую поверхность, возможно, не все семена будут ориентированы максимальной площадью миделевого сечения относительно аэродинамической силы, и не исключено, что в некоторых случаях будет происходить заклинивание семян в щелях между прутками, и это будет снижать качество сепарации и урожайность семян и производительность сепаратора.

Известен пневматический сортировальный стол по патенту на изобретение RU 190610 [4], содержащий корпус, разделительную деку, выполненную в виде воздушораспределительной сотовой поверхности, установленную на виброрамае, установленной посредством шарнирных тяг на корпусе стола, шарнирно закрепленный груз-противовес для уравнивания колебаний разделительной деки, механизм для создания колебаний, состоящий из установленного на корпусе эксцентрикового вала, приводимого во вращение с помощью электродвигателя, шатунов, связанных с виброрамой и с грузом-противовесом и через эксцентриковые втулки - с эксцентриковым валом, а также механизмы регулировки поперечного и продольного углов наклона разделительной деки, загрузочное устройство, электродвигатель с центробежным вентилятором, нагнетающим воздух под разделительную деку.

Недостатками этого пневматического сортировального стола являются большая

материалоемкость и сложность настройки, обусловленная большим количеством регулировок.

Известен струйный сепаратор Фадеева по патенту на изобретение RU 80778 [5], содержащий емкость с аэродинамическим пространством внутри ее полости, 5
воздухонагнетатель, устройство формирования воздушного струйного потока в аэродинамическом пространстве, устройство подачи исходных сыпучих частиц в воздушный струйный поток, сборники фракций, расположенные снизу аэродинамического пространства.

Недостатками этого струйного сепаратора Фадеева являются возможность легкого засорения малых отверстий сопел пылевидными частицами и негибкость в отношении 10
регулировок, что будет снижать качество сепарации семян и производительность сепаратора.

В основу изобретения сепаратора семян овощных и бахчевых культур поставлена задача обеспечить улучшение качества сепарации семян овощных и бахчевых культур 15
за счет наличия эффективных регулировок, повышение урожайности овощных и бахчевых культур за счет отбора лучших семян для посева, а также уменьшение его массы и габаритов и упрощение конструкции.

Это достигается тем, что в сепараторе семян овощных и бахчевых культур, содержащем вращающийся перфорированный цилиндр с возможностью изменения его 20
угла наклона, бункер-дозатор с патрубком подачи семян, введенный в цилиндр, вакуумные пневмотрубопроводы, лотки, привод цилиндра и вакуумный насос, с одной стороны вращающегося перфорированного цилиндра, непосредственно к нему, по форме радиуса, плотно установлены два неподвижных короба (камеры разрежения), каждый из которых соединен через пневмотрубопроводы с вакуумным насосом, причем 25
величина вакуумного разрежения в одном коробе меньшая, а в другом коробе большая, и регулируется задвижками, установленными на пневмотрубопроводах. При этом вращающийся перфорированный цилиндр соединен с валом, а последний через соединительную муфту с приводом - мотор-редуктором. При этом лотки для сбора семян имеют П-образную форму и установлены внутри цилиндра и подведены в зону, 30
где уже прекратилось вакуумное воздействие на перемещаемые цилиндром очищаемые семена.

Сущность изобретения поясняется чертежами, на которых показан сепаратор овощных и бахчевых культур.

Фиг. 1 - сепаратор овощных и бахчевых культур, вид сбоку;

35 Фиг. 2 - сепаратор овощных и бахчевых культур в разрезе по А-А на фиг. 1.

Сепаратор семян овощных и бахчевых культур содержит наклонный вращающийся перфорированный цилиндр 1, бункер-дозатор 2, патрубок подачи семян 3, введенный в цилиндр 1, вакуумные пневмотрубопроводы 4 и 5 с патрубками 6, 7, 8 и 9, 10, 11, 40
соответственно, лотки 12 и 13, вал 14, подшипники 15 и 16, соединительную муфту 17 и привод 18 в виде мотора-редуктора для изменения частоты вращения цилиндра 1, два неподвижных короба 19 и 20, установленные плотно к поверхности цилиндра, по форме его радиуса, и соединенные с пневмотрубопроводами 4 и 5 с помощью патрубков 6, 7, 8 и 9, 10, 11, соответственно.

Пневмотрубопроводы 4 и 5 соединены с вакуумным насосом 21 и снабжены 45
задвижками 22 и 23. Лотки 12 и 13, для сбора семян, имеющие П-образную форму, установлены внутри цилиндра 1 и подведены в зоны, где отсутствует вакуумное воздействие на перемещаемые цилиндром очищаемые семена. Все рабочие органы установлены на раме, которая не показана на чертеже. Для сбора отсепарированных

семян овощных и бахчевых культур установлены тары - ящики 24, 25, 26.

Работает сепаратор овощных и бахчевых культур следующим образом. Устанавливают требуемый угол наклона цилиндра 1, включают привод 18 и вакуумный насос 21. Из бункера-дозатора 2 по патрубку 3, внутрь наклонного цилиндра 1, 5 дозированно поступают на сепарацию семена овощных или бахчевых культур и начинают двигаться в направлении тары - ящиков 24, 25, 26. За счет действия вакуумного насоса 21 из полостей «Б» коробов 19 и 20, с помощью пневмотрубопроводов 4 и 5 и патрубков 6, 7, 8 и 9, 10, 11, соответственно, высасывается воздух и создается вакуум, 10 который притягивает движущиеся семена в зоне «В» к поверхности перфорированного цилиндра 1. Причем величина вакуума в коробах 19 и 20 разная, в коробе 20 меньшая, а в коробе 19 большая.

Так как в коробе 20 величина вакуума меньше, то на этом участке к перфорированным отверстиям цилиндра 1 притягиваются щуплые и дробленые семена, а на участке короба 19, где вакуум больше, к отверстиям цилиндра 1 притягиваются 15 средние по плотности семена. В цилиндре 1 остаются лучшие семена, самые плотные и жизнестойкие, которые сходят в тару - ящик 24, и далее используются для посева и существенно увеличивают урожайность культур за счет своего лучшего качества.

Щуплые и дробленые семена, под действием вакуума, поднимаются вверх, после прохода зоны короба 20, где перестает действовать вакуум, отлипают от поверхности 20 цилиндра 1 в зоне «Г» и падают в лоток 13, а по нему скользят и попадают в тару - ящик 25.

Средние по плотности семена после прохода зоны короба 19, где на них действовал 25 больший вакуум, отлипают от поверхности цилиндра 1 и падают в лоток 12, а по нему скользят и попадают в тару - ящик 26.

Изготовлен экспериментальный образец сепаратора овощных и бахчевых культур, 30 который показал работоспособность технологического процесса. Регулирование производительности сепаратора овощных и бахчевых культур и качества его работы осуществляют путем изменения частоты вращения цилиндра 1, величины вакуума с помощью задвижек 22 и 23, угла α наклона цилиндра 1 и величины подачи семян бункером-дозатором 2.

Предложенная конструкция сепаратора овощных и бахчевых культур позволяет 35 обеспечить улучшение качества сепарации семян овощных и бахчевых культур за счет наличия эффективных регулировок, повышение урожайности овощных и бахчевых культур за счет отбора лучших семян для посева, а также уменьшение его массы и габаритов и упрощение конструкции.

Источники информации

1. Халанский, В.М. Сельскохозяйственные машины: учебник для студентов вузов по агрономическим специальностям // В.М. Халанский, И.В. Горбачев. - Москва: Колос, 2003. - 624 с.
- 40 2. UA 34040 A, B07 B4/02, 15.02.2001. Способ сепарирования сыпучих материалов и устройство для его реализации (варианты).
3. UA 24546 U, B07 B4/00 (2006), 10.07.2007. Центробежно-пневматический сепаратор.
4. RU 190610 U1, B07 B4/08 (2006.01), 04.07.2019. Пневматический сортировальный стол.
- 45 5. RU 80778 U1, B07 B4/02 (2006.01), 27.02.2009. Струйный сепаратор Фадеева.

(57) Формула изобретения

Сепаратор семян овощных и бахчевых культур, содержащий вращающийся

RU 2 822 527 C1

перфорированный цилиндр с возможностью изменения его угла наклона, бункер-дозатор с патрубком подачи семян, введенный в цилиндр, вакуумные пневмотрубопроводы, лотки, привод цилиндра и вакуумный насос, отличающийся тем, что с одной стороны вращающегося перфорированного цилиндра непосредственно к нему, по форме его

5 радиуса, плотно установлены два неподвижных короба, каждый из которых соединен через пневмотрубопроводы с вакуумным насосом, причем величина вакуумного разрежения в одном коробе меньшая, а в другом коробе большая, и регулируется задвижками, установленными на пневмотрубопроводах, при этом вращающийся

10 перфорированный цилиндр соединен с валом, а последний через соединительную муфту с приводом - мотор-редуктором, при этом лотки для сбора семян имеют П-образную форму, установлены внутри цилиндра и подведены в зону, где уже прекратилось вакуумное воздействие на перемещаемые цилиндром очищаемые семена.

15

20

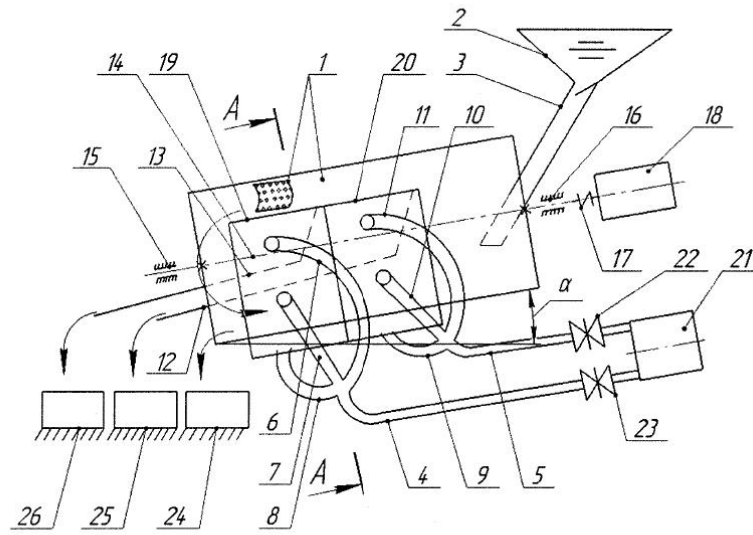
25

30

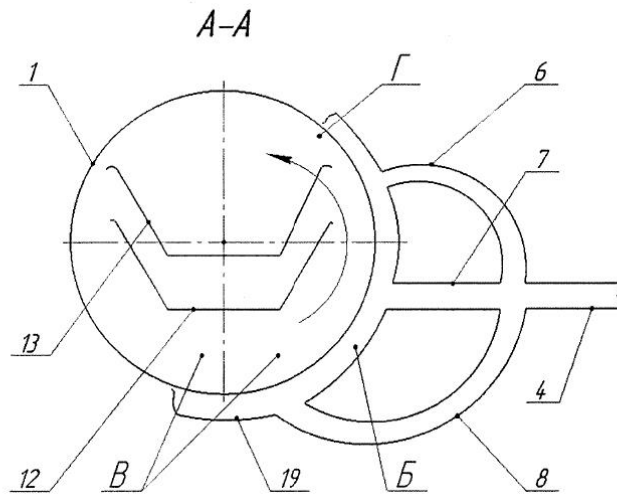
35

40

45



Фиг. 1



Фиг. 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **237 751**⁽¹³⁾ **U1**
(51) МПК
A01C 1/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(52) СПК
A01C 1/00 (2025.01)

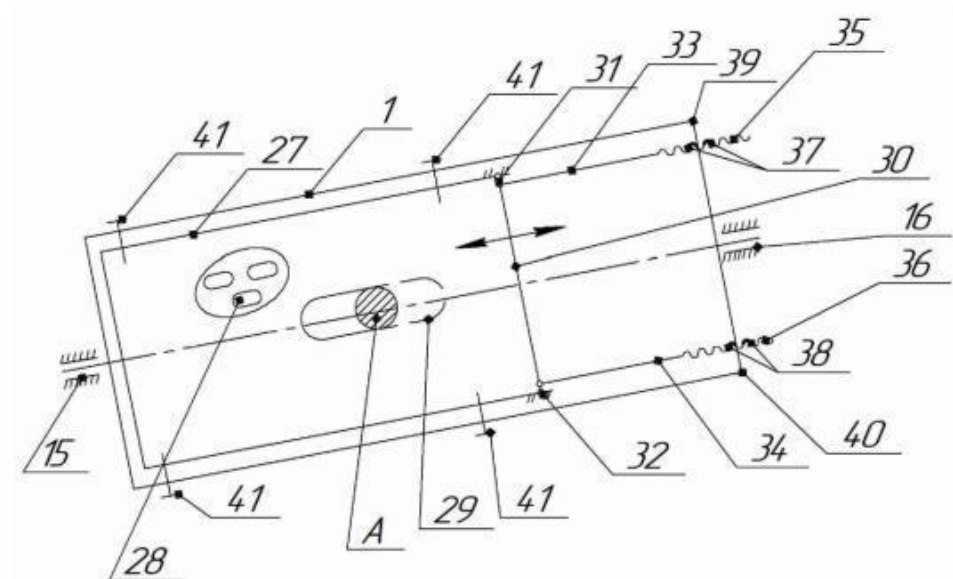
(21)(22) Заявка: 2025107279, 26.03.2025
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.03.2025
Дата регистрации:
03.10.2025
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 26.03.2025
(45) Опубликовано: 03.10.2025 Бюл. № 28
Адрес для переписки:
291008, Луганская Народная Респ., г. Луганск,
г.о. Луганский, р-н Артемовский, тер. ЛНАУ,
1, ФГБОУ ВО Луганский ГАУ, Худолей
Александр Владимирович

(72) Автор(ы):
Круглых Никита Александрович (RU),
Шаповалов Виктор Иванович (RU),
Ильченко Артем Анатольевич (RU),
Щеглов Андрей Викторович (RU),
Мнушко Николай Алексеевич (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Луганский государственный
аграрный университет имени К.Е.
Ворошилова" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2822527 C1, 08.07.2024. RU
2816820 C1, 05.04.2024. UA 30735 U, 11.03.2008.
GB 1571678 A, 16.07.1980.

(54) **СЕПАРАТОР СЕМЯН ОВОЩНЫХ И БАХЧЕВЫХ КУЛЬТУР**

(57) Реферат:
Полезная модель относится к сельскохозяйственному машиностроению и усовершенствует сепараторы семян овощных и бахчевых культур. Предложен сепаратор семян овощных и бахчевых культур, содержащий вращающийся перфорированный цилиндр с возможностью изменения его угла наклона, бункер-дозатор с патрубком подачи семян, введенный в цилиндр, вакуумные пневмотрубопроводы, лотки, привод цилиндра и вакуумный насос. Новизна заключается в том, что внутри наружного вращающегося перфорированного цилиндра вставлен внутренний перфорированный цилиндр. Отверстия внутреннего перфорированного цилиндра совпадают по контуру с отверстиями наружного цилиндра, при этом верхняя часть

внутреннего цилиндра шарнирно соединена тягами с винтовым креплением их к кронштейнам наружного перфорированного цилиндра, а сам внутренний цилиндр дополнительно закреплен, например, болтами к наружному перфорированному цилиндру. Преимущества сепаратора овощных и бахчевых культур: простота конструкции и эксплуатации; меньшая масса и габариты; обеспечивает лучшее качество сепарации семян за счет более качественного и упрощенного регулирования силы вакуума и ориентирования семян относительно сил воздушного потока; повышается урожайность овощных и бахчевых культур за счет отбора самых плотных и жизнестойких семян и последующей их посадки. 3 ил.



Фиг. 3

RU 237751 U1

RU 237751 U1

Полезная модель относится к сельскохозяйственному машиностроению и усовершенствует сепараторы семян овощных и бахчевых культур.

Известна семяочистительная машина СМ-0,15М [1], содержащая решетный стан с решетками, приемный бункер, питатель, аспирационные колонки, осадочные камеры, циклоны, вентиляторы, пылесборники.

Недостатком этого аналога является сложность конструкции, большая материалоемкость, большие энергозатраты на выполнение технологического процесса. Аспирационные колонки предусматривают очистку семян в вертикальном воздушном потоке, где семена движутся хаотично. Из-за этого плоские семена существенно меняют площадь миделевого сечения, в зависимости от положения относительно воздушного потока, что ухудшает качество разделения плоских семян. Параметры воздушного потока не регулируются, что ухудшает качество работы машины.

Известен так же центробежно-пневматический сепаратор ЗАВ-40.02.000 [2], включающий заслонки, делитель, сетчатый барабан, подающее устройство, скатную доску, вентилятор, регулировочную заслонку и шнек отходов. Сепарация семян производится под действием центробежной силы от вращения барабана и от воздушной аэродинамической силы, притягивающий семенной материал к барабану.

Недостатком приведенного аналога является то, что воздушный поток проходит через всю площадь сетчатого барабана, что увеличивает аэродинамическое сопротивление и увеличивает энергозатраты.

Известен так же сепаратор семян овощных и бахчевых культур по патенту на изобретение №2822527 [3], который принят нами за прототип. Данный сепаратор содержит вращающийся перфорированный цилиндр, бункер-дозатор семян, вакуумные пневмотрубопроводы, лотки, привод цилиндра и вакуумный насос. К перфорированному цилиндру плотно установлены два неподвижных короба соединенных с вакуумным насосом, причем величина вакуумного разрежения в этих коробах регулируется задвижками, установленными на пневмотрубопроводах. Недостатком устройства является сложность регулировки разрежения в коробах и сепарирующих отверстиях цилиндра.

Предложенный сепаратор овощных и бахчевых культур не имеет указанного выше недостатка.

Сущность нашей полезной модели заключается в том, что сепаратор семян овощных и бахчевых культур, содержащий наружный вращающийся перфорированный цилиндр с возможностью изменения его угла наклона, бункер-дозатор с патрубком подачи семян, введенный в цилиндр, вакуумные пневмотрубопроводы, лотки, привод цилиндра и вакуумный насос, выполнен таким образом, что внутрь наружного вращающегося перфорированного цилиндра вставлен внутренний перфорированный цилиндр, отверстия которого совпадают по контуру с отверстиями наружного, при этом верхняя часть внутреннего цилиндра шарнирно соединена тягами с винтовым креплением их к кронштейнам наружного перфорированного цилиндра, а сам внутренний цилиндр дополнительно закреплен, например, болтами к наружному перфорированному цилиндру.

Фиг. 1 - вид сбоку на сепаратор семян овощных и бахчевых культур.

Фиг. 2 - сечение сепаратора по «А-А».

Фиг. 3 - вид сбоку, в разрезе, на сепаратор семян овощных и бахчевых культур.

Сепаратор семян овощных и бахчевых культур состоит из наклонного наружного вращающегося перфорированного цилиндра 1, бункера-дозатора 2, патрубка подачи семян 3, введенного в цилиндр 1, вакуумных пневмотрубопроводов 4 и 5 с патрубками

6, 7, 8, 9, 10, 11, лотков 12, 13, вала 14, подшипников 15, 16, соединительной муфты 17 и привода 18 в виде мотора-редуктора для изменения частоты вращения цилиндра 1, двух неподвижных коробов 19 и 20, установленных плотно к поверхности цилиндра, по форме его радиуса, и каждый соединенный с пневмотрубопроводом 4 и 5 с помощью патрубков 6, 7, 8, 9, 10, 11.

Пневмотрубопроводы 4 и 5 соединены с вакуумным насосом 21 и снабжены задвижками 22 и 23. Лотки 12, 13, для сбора семян, имеющие П-образную форму, установлены внутри сепаратора и подведены в зоны, где отсутствует вакуумное воздействие на перемещаемые цилиндром очищаемые семена. Все рабочие органы

установлены на раме, которая не показана на чертеже. Для сбора отсепарированных семян овощных и бахчевых культур установлены тары - ящики 24, 25, 26.

Внутри наружного вращающегося перфорированного цилиндра 1 вставлен внутренний перфорированный цилиндр 27, отверстия 28 которого совпадают по контуру с отверстиями 29 наружного перфорированного цилиндра 1. При этом верхняя часть внутреннего цилиндра 30 с помощью шарниров 31 и 32 соединена тягами 33 и 34 с винтовым 35 и 36 креплением гайками 37, 38 с кронштейнами 39, 40 наружного перфорированного цилиндра 1, а сам внутренний цилиндр 27 дополнительно закреплен болтами 41 к наружному перфорированному цилиндру 1.

Работает сепаратор овощных и бахчевых культур следующим образом. Устанавливают требуемый угол наклона цилиндра 1, включают привод 18 и вакуумный насос 21. Из бункера-дозатора 2 по трубопроводу 3, внутрь наклонного цилиндра 1, дозированно поступают на сепарацию семена овощных или бахчевых культур и начинают двигаться в направлении тары - ящиков 24...26. За счет действия вакуумного насоса 21 из полостей «Б» коробов 19 и 20, с помощью пневмотрубопроводов 4, 5 и патрубков 6, 7, 8, 9, 10, 11, высасывается воздух и создается вакуум, который притягивает движущиеся семена в зоне «В» к поверхности внутреннего перфорированного цилиндра 27. Причем величина вакуума в коробах 19 и 20 разная, например, в коробе 20 - меньшая, а в коробе 19 - большая.

Так как в коробе 20 величина вакуума меньше, то на этом участке к перфорированным отверстиям цилиндра 1 притягиваются щуплые и дробленые семена, а на участке короба 19, где вакуум больше, к отверстиям цилиндра 27 притягиваются средние по плотности семена и в цилиндре 27 остаются самые плотные и жизнестойкие семена, которые сходят в тару - ящик 24, и они используются для посадки и существенно увеличивают урожайность культур за счет своего качества.

Щуплые и дробленые семена под действием вакуума поднимаются вверх, проходят в зону короба 20, где перестает действовать вакуум, они отлипают от поверхности цилиндра 27 в зоне «Г» и падают в лоток 13 и по нему скользят и попадают в тару - ящик 25.

Средние по плотности семена проходят зону короба 19, где на них действовал больший вакуум, отлипают от поверхности цилиндра 27 и попадают в лоток 12, а по нему скользят и попадают в тару - ящик 26.

Качество работы сепаратора при сортировке семян овощных и бахчевых культур регулируется величиной вакуума, воздействующего на семена. Это достигается регулированием площади отверстий в цилиндрах и, следовательно, силой вакуумного присасывания к сепарируемым семенам. Для этого отпускаются болты 41, установленные в овальные отверстия, с помощью гаек 37, 38 и тяг 33, 34 перемещается перфорированный цилиндр 27 вправо или влево и этим изменяется площадь «А»

RU 237 751 U1

отверстий 28, 29, а заодно и вакуумная сила воздействия на семена. Величина изменения площади отверстий контролируется визуально или с помощью измерительной шкалы (не показана на фигурах).

5 Производительность сепаратора и качество его работы осуществляют путем регулировки частоты вращения перфорированного цилиндра 1, изменения величины вакуума, изменением угла наклона цилиндра 1, и величиной подачи семян бункером-дозатором.

Сепаратор позволяет выделить из семян самые плотные и жизнестойкие семена, что позволяет увеличить урожайность овощных и бахчевых культур до 30% при
10 использовании их в качестве посевного материала.

Расчеты показывают, что данный сепаратор окупает себя менее чем за год.

Достоинства сепаратора:

1. Меньшая масса и габариты.
2. Простота конструкции и эксплуатации.
- 15 3. Обеспечивает лучшее качество сепарации семян за счет наличия эффективных регулировок.
4. Позволяет повысить урожайность овощных и бахчевых культур за счет отбора лучших семян и их посева.

Источники информации:

20 1. В.М. Халанский, И.В. Горбачев. Сельскохозяйственные машины. Москва, «Колос», 2003 г., с. 624.

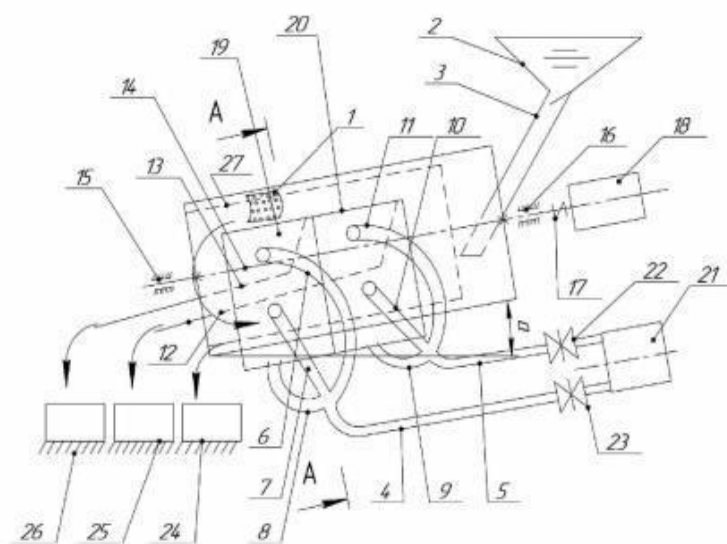
2. Безручкин И.П. Очистка зернового материала центробежно-пневматическим сепаратором: Исследование рабочих процессов и органов машин для уборки зерновых культур и послеуборочной обработки зерна / И.П. Безручкин, Е.Г. Баженов, В.В. Попов
25 // Труды ВИСХОМ. - Москва. - 1969. - Вып. 57. - С. 301-320.

3. RU 2822527 C1, МПК B07B/00 (2006.01), 08.07.2024 г.

(57) Формула полезной модели

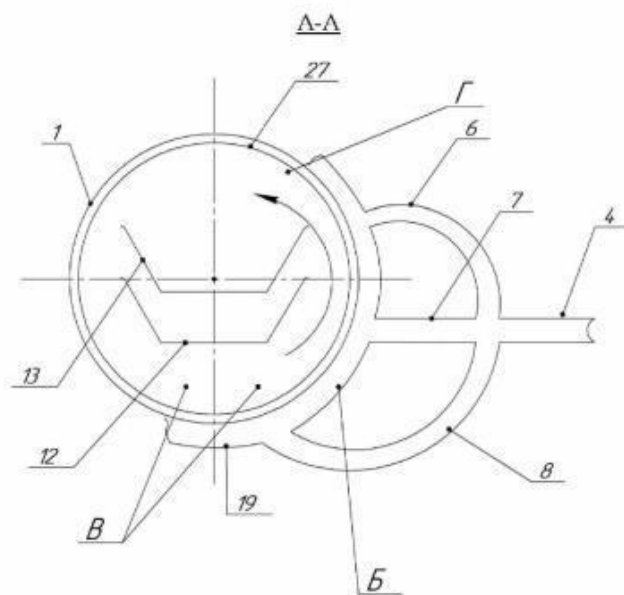
Сепаратор семян овощных и бахчевых культур, содержащий вращающийся наружный
30 перфорированный цилиндр (1) с возможностью изменения его угла наклона, бункер-дозатор (2) с патрубком подачи семян (3), введенный в цилиндр (1), вакуумные пневмотрубопроводы (4) и (5), соединенные с вакуумным насосом (21), лотки (12) и (13), установленные внутри сепаратора, привод цилиндра (18), при этом внутрь
35 наружного вращающегося перфорированного цилиндра (1) вставлен внутренний перфорированный цилиндр (27), отверстия (28) которого совпадают по контуру с отверстиями (29) наружного перфорированного цилиндра (1), при этом верхняя часть внутреннего перфорированного цилиндра (27) шарнирно соединена тягами (33) и (34) с винтовым закреплением их к кронштейнам наружного перфорированного цилиндра, а сам внутренний перфорированный цилиндр (27) дополнительно закреплен болтами
40 (41) к наружному перфорированному цилиндру (1).

1

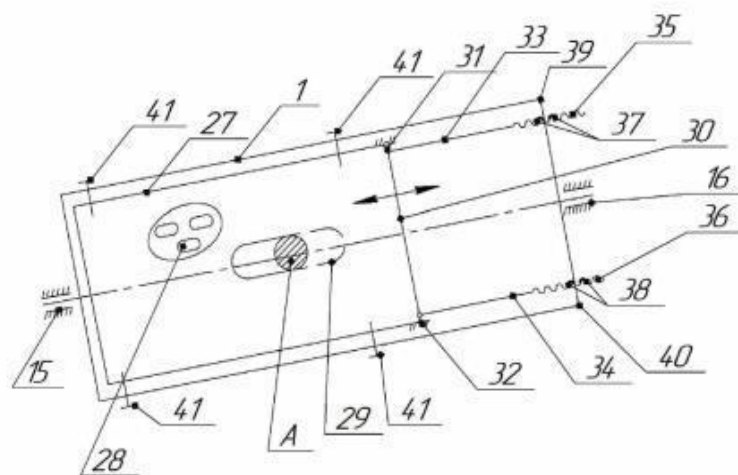


Фиг. 1

2



Фиг. 2



Фиг. 3

Приложение – Ж
Письма поддержки от компаний

Аспиранту 2-го курса,
кафедры сельскохозяйственных машин,
ФГБОУ ВО ЛГАУ имени К.Е. Ворошилова
Круглых Никите Александровичу

Письмо поддержки

Никита Александрович, на основе представленных вами материалов о вашем диссертационном проекте, по теме «Повышение эффективности сепарации семян овощных и бахчевых культур аэродинамическим сепаратором с цилиндрической опорной поверхностью», считаем вашу идею повышения качества сортировки семян за счет ориентирования семян в цилиндрической опорной поверхности перспективной, и требующей дальнейшего развития.

Руководитель ООО «НПФ «Аэромех»

Каличава Тамази Артаевич

Дата: 31.10.23



Аспиранту 2-го курса,
кафедры сельскохозяйственных машин,
ФГБОУ ВО ЛГАУ имени К.Е. Ворошилова
Круглых Никите Александровичу

Письмо поддержки

Никита Александрович, тема повышения качества посевного материала путем отбора семян с наибольшей массой является актуальной и играет важную роль в сельском хозяйстве. Малогабаритные мобильные машины для сортировки семян, удобные в транспортировке и эксплуатации, могут быть полезны для представителей малого бизнеса в аграрном секторе, фермеров и КФХ, которые занимаются выращиванием овощных и бахчевых культур. Желаем вам успешного развития вашего проекта, и практического применения данной разработки.

Главный агроном ООО "ТЕХНАУКА"

Мартынов Роман Петрович

Дата: 31.10.23



Аспиранту 2-го курса,
кафедры сельскохозяйственных машин,
ФГБОУ ВО ЛГАУ имени К.Е. Ворошилова
Круглых Никите Александровичу

Письмо поддержки

Никита Александрович, мы рассмотрели ваш проект по разработке пневматического сепаратора семян овощных и бахчевых культур. Считаем тему вашего диссертационного проекта актуальной и интересной для себя, поскольку сортировка семян играет важную роль в повышении качества посевного материала и повышении урожайности. Малогабаритные машины по сортировке семян, простые в транспортировке и эксплуатации, так же актуальны для сортировки малых партий семян, и могут пользоваться спросом у сельскохозяйственных компаний и фермеров, при должном качестве продукта.

Руководитель отделения №5
ГУП ЛНР «АГРАРНЫЙ ФОНД»



Ганшин Андрей Николаевич

Дата: 30.10.23

Приложение – И
Основные награды проекта





ставропольский
росмолодёжь
гранты

ВЫЗОВ



МАЯК

Платформа научного
управления

ДИПЛОМ

ЛАУРЕАТА

Фестиваля-выставки
студенческих стартапов

Награждается

Никита Круглых

Луганский государственный аграрный университет

Номинация:

Новые приборы и интеллектуальные
производственные технологии



В.И. Ситников
Ректор ФГБОУ ВО
«Ставропольский государственный
аграрный университет»

Ставрополь 2024

даю

СВЕТ

НОВЫМ

ОТКРЫТИЯМ



ЛУГАНСКАЯ НАРОДНАЯ
РЕСПУБЛИКА



Луганское
МЕСТНОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ



БЛАГОДАРНОСТЬ

объявляется

**Круглых
Никите Александровичу**

за многолетний труд,
научные достижения,
высокий профессионализм
и преданность делу

Секретарь Луганского
местного отделения
Всероссийской политической
партии «ЕДИНАЯ РОССИЯ»

Я. В. Пащенко

Приложение – К

Измерительные приборы для лабораторных исследований

ВЛКТ-500 г-М – это лабораторные весы четвертого класса с механизмом, который компенсирует измеряемый вес. Их основное назначение – взвешивание различных веществ, при проведении анализов в лабораторных условиях (рисунок К.1).



Рисунок К.1 – Лабораторные весы ВЛКТ-500 г-М;

Параметры лабораторных весов ВЛКТ-500 г-М:

- наибольший предел взвешивания	500 г;
- цена деления нониуса.....	10 мг;
- масса весов.....	9 кг;

Микроманометр ММН-2400 первого класса точности, представленный на рисунке К.2, предназначен для измерения избыточного давления, а также разницы давлений. С применением трубки Пито использовался для измерения показателей скорости воздушного потока в камере разрежения.



Рисунок К.2 – Микроманометр ММН-2400 с трубкой Пито

Параметры микроманометра ММН-240:

- класс точности 1,0%;
- рабочая жидкость.....спирт этиловый;
- температура жидкости при измерениях.....19°C;
- длина трубки.....L-300 мм;
- цена деления шкалы.....1 мм;
- масса прибора.....2,7 кг;

Для более эффективного отслеживания перепадов вакуумметрического давления в камерах разрежения использовался смарт-зонд Testo 510i (рисунок К.3). Достоинством данного прибора является его работа в связке со смартфоном, что позволяет с необходимой частотой снимать изменения показателей и оперативно структурировать их в виде графика или таблицы Microsoft Excel. Прибор имеет сертификат поверки.



Рисунок К.3 – Testo 510i

Параметры Смарт-зонда Testo 510i:

- диапазон измерений-150...+150 гПа;
- погрешность..... $\pm 0,2$ гПа + 1,5 % от изм. знач.;
- разрешение.....0,01 гПа;
- размеры..... 148x36x23 мм;
- рабочая температура.....-20...+50 °C.

Kalibrier-Protokoll
Certificate of conformity • Protocole d'étalonnage
 Certificato di taratura • Informe de calibración

Be sure. testo

Gerät / Module type /
Modèle / Modelo: **testo 510i**

Messbereich / Measuring range /
Etendue de mesure / Rango de medición: **Pressure: -150 ... 150 hPa**

Serien-Nr. / Serial no. /
N°. de série / Número de serie: **47110856**

Messwerte / Measured values / Valeurs mesurées / Valores medidos:		
Sollwert / Reference / Référence / Referencia:	Zulässige Toleranz / Permissible tolerance / Tolérance admise / Tolerancia permitida:	Istwert / Actual Value / Valeur réelle / Valor medido:
Pressure :		
5.00 hPa	± 0.27 hPa	5.00 hPa
80.00 hPa	± 1.40 hPa	80.10 hPa

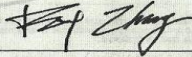

 Prüfer / Inspector /
Responsable / Verificador

Рисунок К.4 – Сертификат поверки Смарт-зонда Testo 510i

Для измерения скорости вращения барабана рабочего органа сепаратора использовался бесконтактный лазерный тахометр ЦТ-1, представленный на рисунке К.5. Для измерения низких оборотов барабана сепаратора на его поверхность приклеивалось несколько отражающих поверхностей с равным расстоянием между ними, и показания прибора делились на количество отражающих поверхностей.



Рисунок К.5 – Цифровой тахометр ЦТ-1

Характеристика цифрового тахометра ЦТ-1:

- тип прибора.....лазерный;
- разрешение..... 0,1 об/мин при 2,5-999,9 об/мин;
- погрешность..... $\pm 0,05\%$;
- расстояние измерения.....50-500 мм;
- рабочая температура.....0...+50 °С;
- размеры.....130x70x29 мм;

Для измерения потребления электроэнергии приборов и установок использовался ваттметр фирмы Nashone (рисунок К.6). Прибор подключался к сети 220V и в реальном времени отслеживал напряжение, силу тока и потребление электроэнергии.



Рисунок К.6 – Цифровой ваттметр Nashone

Параметры цифрового ваттметра Nashone:

- диапазон измерений 230VAC/16A/50Hz/3680W;
- точность..... 0.000KWH/0.01A/0W;
- размеры..... 155x70x35 мм.

Для измерения угла наклона использовался электронный угломер «Архимед» производителя SKATA, изображенный на рисунке К.7. Достоинствами прибора являются большой функционал, высокая точность и маленький размер, позволяющий измерять угол в труднодоступных местах.



Рисунок К.7 – Угломер электронный SKATA «Архимед»

Параметры угломера SKATA:

- точность измерения.....0,2°;
- максимальный угол измерения.....360°;
- шаг измерения.....0,05°;
- рабочая температура.....0...+50 °C;
- размеры.....58x58x32 мм.

Приложение – Л

Таблица Л.1 – Материальные затраты на изготовление опытного
промышленного образца сепаратора ССБ-0,1

№ п/п	Наименование материала или детали	Стоимость, руб
1	Коммерческий вентилятор BURAN 200 2K M L	21000
2	Воздушные камеры (3d печать)	9200
3	Профильная рама (сталь)	3000
4	Листовой металл (сталь)	3000
5	Мотор редукторы с регуляторами оборотов	9000
6	Воздушные заслонки регулируемые	4300
7	Цифровой манометр	2600
8	Угломер	800
9	Краска	2200
10	Бункер с регулируемым катушечным дозатором семян	2600
11	Резиновые уплотнители	1400
12	Воздушные гофры	2400
13	Метизы и расходные детали	3200
14	Ролики	2400
15	Ленточная резина	900
16	Приемные вибротки с мешками под семена	1700
17	Выключатели, автоматы и т.д.	2000
18	Всего	70000

Приложение – М

Акт внедрения в фермерское хозяйство «Аграрный дом –Агродар»



УТВЕРЖДАЮ

Глава крестьянского (фермерского)
хозяйства «Аграрный дом «Агродар»

С.А. Клименко

2025 г.

АКТ

о внедрении законченной научно-исследовательской работы

Мы, ниже подписавшиеся, представители Луганского государственного аграрного университета имени К.Е. Ворошилова: заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин кандидат технических наук Щеглов А.В. и учебный мастер кафедры сельскохозяйственных машин Круглых Н.А. с одной стороны и представитель крестьянского (фермерского) хозяйства «Аграрный дом «Агродар»: глава хозяйства Клименко С.А. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы на тему «Повышение эффективности сепарации семян овощных и бахчевых культур аэродинамическим сепаратором с цилиндрической опорной поверхностью», выполненной на инженерном факультете ФГБОУ ВО «ЛГАУ имени К.Е. Ворошилова» в период с ноября 2021 г. по сентябрь 2025 г., переданы для внедрения в производство в крестьянское (фермерское) хозяйство «Аграрный дом «Агродар», зарегистрированное в Едином государственном реестре юридических лиц (ЕГРЮЛ) под № 61140703, ОГРН 12294000068, ИНН 9404000281, КПП 940401001, юридический адрес: 93631, Луганская Народная Республика, Станично-Луганский район, с. Верхний Минченок, ул. Центральная, д. 7Б.

Представитель крестьянского
(фермерского) хозяйства «Аграрный
дом «Агродар»

Глава хозяйства

С.А. Клименко

« 13 » октября 2025 г.

Представитель ФГБОУ ВО
«ЛГАУ имени К.Е. Ворошилова»

проректор по научной работе

А.В. Худолей

« 13 » октября 2025 г.

Заведующий кафедрой
сельскохозяйственных машин

А.В. Щеглов

« 13 » октября 2025 г.

Ответственный исполнитель

Н.А. Круглых

« 13 » октября 2025 г.

Приложение – Л

Акт внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО ЛГАУ им. К.Е. Ворошилова

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО ЛГАУ
А.В. Худолей



АКТ

о внедрении в учебный процесс научно-исследовательских
и опытно-конструкторских работ учебного мастера
кафедры сельскохозяйственных машин ФГБОУ ВО Луганский ГАУ
Круглых Никиты Александровича

Учебным мастером кафедры Круглых Н.А., была выполнена научно-исследовательская работа и подготовлена диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1 – «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса» на тему «Повышение эффективности сепарации семян овощных и бахчевых культур аэродинамическим сепаратором с цилиндрической опорной поверхностью».

Основные результаты научно-исследовательской работы используются в лекционном курсе и при проведении лабораторно-практических занятий по дисциплине бакалавриата «Сельскохозяйственные машины» направления подготовки 35.03.06 "Агроинженерия" на инженерном факультете ФГБОУ ВО Луганский ГАУ.

Акт обсужден и одобрен на заседании кафедры сельскохозяйственных машин (протокол № 3 от 08.10.2025 г.).

Заведующий кафедрой
сельскохозяйственных машин
к.т.н, доцент

 А.В. Щеглов

Секретарь кафедры

 А.А. Ильченко