

На правах рукописи



КРУГЛЫХ НИКИТА АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

Специальность: 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Луганск – 2026

Работа выполнена на кафедре сельскохозяйственных машин в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Луганском государственном аграрном университете имени К.Е. Ворошилова»

Научный руководитель: **Ильченко Артем Анатольевич**

кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Бутовченко Андрей Владимирович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», институт перспективного машиностроения «Ростсельмаш», профессор

Глушков Андрей Леонидович, кандидат технических наук, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, лаборатория зерно- и семяочистительных машин, заведующий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I».

Защита диссертации состоится «27» ноября 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.022.02, созданного на базе ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ по адресу: 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, зал заседаний диссертационных советов (ауд. 1/206), тел./факс (47545) 3-88-13, доб. 3-82, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте университета: <https://mgau.ru/>, а также на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: <https://vak.gisnauka.ru/>. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направить ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических
наук, доцент

Криволапов Иван Павлович

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. По мнению специалистов, продовольственная независимость любой страны зависит от импорта продуктов питания в общем объеме. В XXI веке наблюдается тенденция увеличения валовых сборов бахчевых культур в России. Согласно Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, утверждённой Указом Президента РФ от 21.01.2020 № 20, к 2030 году уровень самообеспеченности семенами полевых культур должен быть не менее 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.

Сепарация семян воздушным потоком является наиболее перспективной, поскольку не приводит к повреждению семян и при этом позволяет достаточно точно разделять их по массе. Однако свободное перемещение семян в воздушном потоке приводит к потере качества в результате изменения площади миделевого сечения. В особенности это относится к семенам бахчевых 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, 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.

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.

Задачи исследования:

- 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.

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 и практическая значимость работы. 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 так же 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 «Славыносербская 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.

Методология и 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

- технологический процесс сепарации и конструкция пневматического сепаратора семян с цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью, 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.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационное исследование соответствует п. 2, 4, 6, 14, 15 паспорта специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов исследований достигалась за счет сочетания теоретических и экспериментальных исследований. Исследования опираются на стандартные методы оценки точности экспериментов. Измерительное оборудование – поверено, сертифицировано, тарировано под задачи исследований.

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-летию 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 автора

Диссертационная работа является обобщением научных исследований, проведенных в период с 2021 по 2026 гг. лично автором и/или при его непосредственном участии.

Публикации

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.

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 источников литературы и 12 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены научная новизна и практическая значимость результатов работы, основные положения, представленные к защите.

В **первой главе «Современное состояние сепарации семян тыквенных культур, пути интенсификации процесса»** отмечена роль сепарации в эффективности возделывания сельскохозяйственных культур.

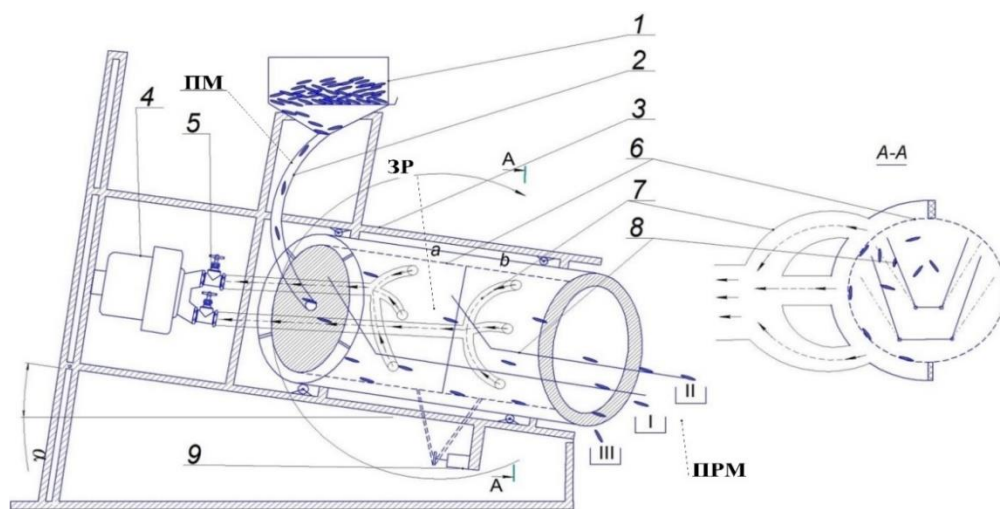
Проанализировано современное состояние сепарации семян тыквенных культур с целью отбора биологически ценных семян, рассмотрены ключевые достоинства и недостатки существующих машин для сепарации. Согласно результатам многокритериального анализа рассмотренных сепараторов по методу расстояния до цели, наиболее приближенную оценку к идеалу получил пневмоцентробежный сепаратор ЗАВ-40-02.000 ($\mu = 1,72$). Это подтверждает актуальность разработки пневматического сепаратора с цилиндрической опорной сепарирующей 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 сепаратор.

Проанализированы существующие поверхности, используемые при сепарации, выбраны наиболее перспективные поверхности для сепаратора.

Во второй главе «Теоретическое исследование технологического процесса работы пневматического сепаратора» рассмотрена модель функционирования пневматического сепаратора, разработана и обоснована конструктивно-технологическая схема (рисунок 1).



1 – бункер для семян; 2 – гофра для подачи семян; 3 – рама; 4 – вакуумный вентилятор; 5 – регулировочный вентилятор; 6 – сепарирующая 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 1 – 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 ventили 5 позволяют подобрать необходимую силу присасывания на разных участках поверхности, сама сепарирующая 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.

Опираясь на опыт П.М. Василенко, проведены теоретические исследования для получения математической модели движения семени по опорной цилиндрической поверхности сепаратора, позволяющей определить угол отрыва семени при заданных параметрах. Составлена схема сил, действующих на семя в процессе сепарации пневматическим сепаратором, к которой разработана математическая модель, позволяющая определить угол отрыва в зависимости от заданных параметров (рисунок 2).

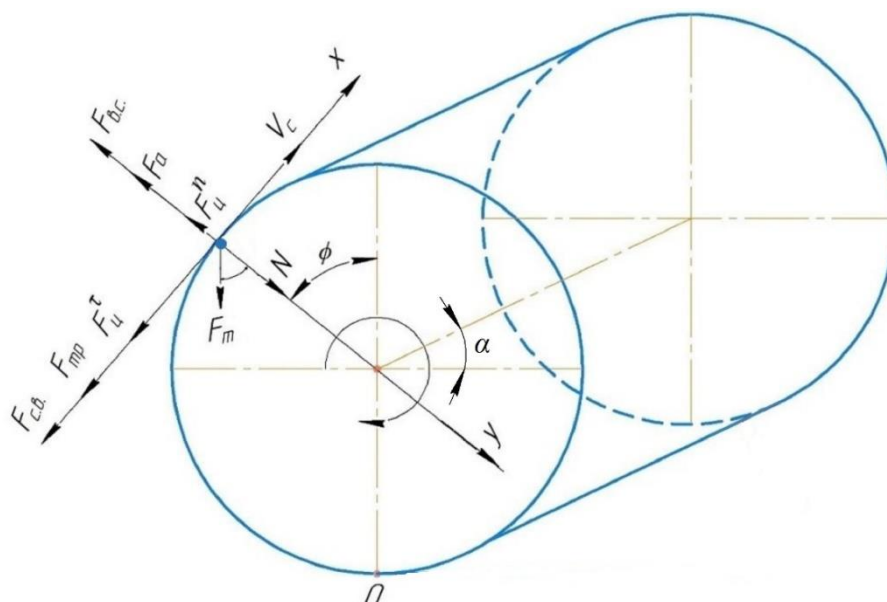


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на семя при его движении на внутренней цилиндрической сепарирующей поверхности разрабатываемого пневматического сепаратора

На материальное тело, находящееся во вращающемся цилиндре в процессе сортировки, действуют: сила тяжести $F_m = mg$, Н; $F_{mp} = fN$ – сила трения, Н; центробежная сила инерции, которая делится на тангенциальную $F_{\tau}^{(c)} = m \frac{dV_c}{dt}$ и нормальную $F_{\tau}^{(n)} = m\omega^2 r = m \frac{V_c^2}{r}$, Н; $F_{в.с.} = \Delta p \cdot s$ – сила вакуумного присасывания, Н; $F_{с.в.} = m \cdot k_n \cdot V_c^2$ – сила сопротивления воздуха, Н; $F_a = m \cdot k_n \cdot V_c^2$ – аэродинамическая сила, Н; где: m – масса семени, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; f – коэффициент трения семени о поверхность; N – нормальная реакция; V_c – скорость движения семени, м/с; ω – угловая скорость цилиндра, с⁻¹; r – радиус цилиндра, м;

Δp – величина вакуума в живом сечении, Н/м²; s – площадь живого сечения на семя, м²; k_n – коэффициент парусности, м⁻¹; V_ϵ – скорость воздушного потока на семя.

Все семена оказывают нормальное давление N на сепарирующую поверхность. Спроектируем рассмотренные силы на цилиндрическую опорную поверхность и составим дифференциальное уравнение движения семени в проекциях на оси движимой системы координат XOY :

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -F_{c.c.} - F_y^\tau - F_{mp} - F_m \cdot \sin \phi \cos \alpha \\ m\ddot{y} = -F_{c.c.} - F_a - F_y + F_m \cos \phi \cos \alpha + N \end{cases} \quad (1)$$

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

Тогда из второго уравнения выразили:

$$N = F_{c.c.} + F_a + F_y - F_m \cos \phi \cos \alpha. \quad (2)$$

Подставив N и сделав преобразования получили:

$$\ddot{\phi} + f\dot{\phi}^2 = -\frac{k_n V_c^2}{r} - \frac{f\Delta p \cdot s}{mr} - \frac{k_n V_\epsilon^2}{r} + \frac{fg \cos \phi \cos \alpha}{r} - \frac{g \sin \phi \cos \alpha}{r}. \quad (3)$$

Сделали замену:

$$B = -\frac{k_n V_c^2}{r} - \frac{f\Delta p \cdot s}{mr} - \frac{k_n V_\epsilon^2}{r}. \quad (4)$$

Имеем дифференциальное уравнение второго порядка с правой частью:

$$\ddot{\phi} + f\dot{\phi}^2 = \frac{fg \cos \phi \cos \alpha}{r} - \frac{g \sin \phi \cos \alpha}{r} + B. \quad (5)$$

Для решения применен одношаговый метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

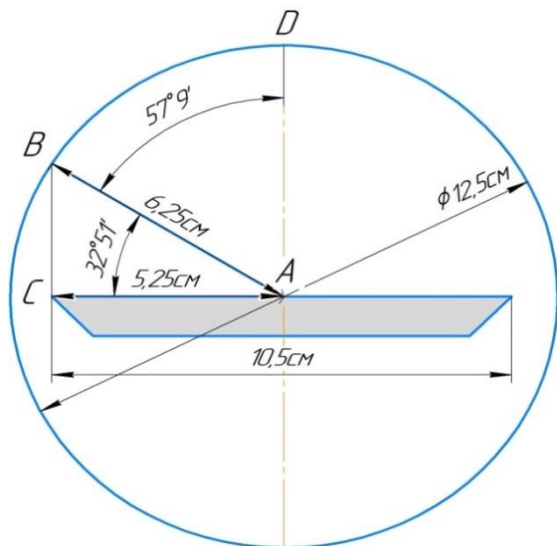
С целью проверки математической модели, подставим параметры сепарации из поисковых экспериментов, где диаметр отверстий будет равен 0,4 см и разрежение в них будет равно 280 Па. Линейная скорость вращения барабана будет 0,16 м/с, семя возьмем массой 0,0003 кг, угол наклона составит 4°. Радиус барабана 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:

$$\ddot{y} + 0,61\dot{y}^2 = 95,648 \cos y - 156,8 \sin y - 123,09 \quad (6)$$

Решение, полученное в математических пакетах MathCAD представляет собой затухающие колебания. Решение сходится к значению $y=0.401$, приблизительно, что соответствует углу 23° от верхней точки барабана.

Расстояние приемного лотка от стенки барабана регулируемое, зная его и диаметр барабана сепаратора, путем элементарных геометрических вычислений узнаем минимальный угол отрыва семени, при котором оно попадает в приемный лоток. В соответствии с геометрической схемой на рисунке 3, параметры треугольника ABC и углы определяются исходя из заданных конструктивных размеров:



- длина катета AC = 5,25 см – расстояние от центра барабана до начала стенки приемного лотка;
- длина гипотенузы AB = 6,25 см – радиус окружности, по которой движется семя при отрыве;
- угол отрыва BAC рассчитывается по теореме косинусов для прямоугольного треугольника:

$$\angle BAC = \arccos \frac{AC}{AB} = \arccos \frac{5,25}{6,26} =$$

$$= \arccos 0,84 = 32^\circ 51', \quad (7)$$

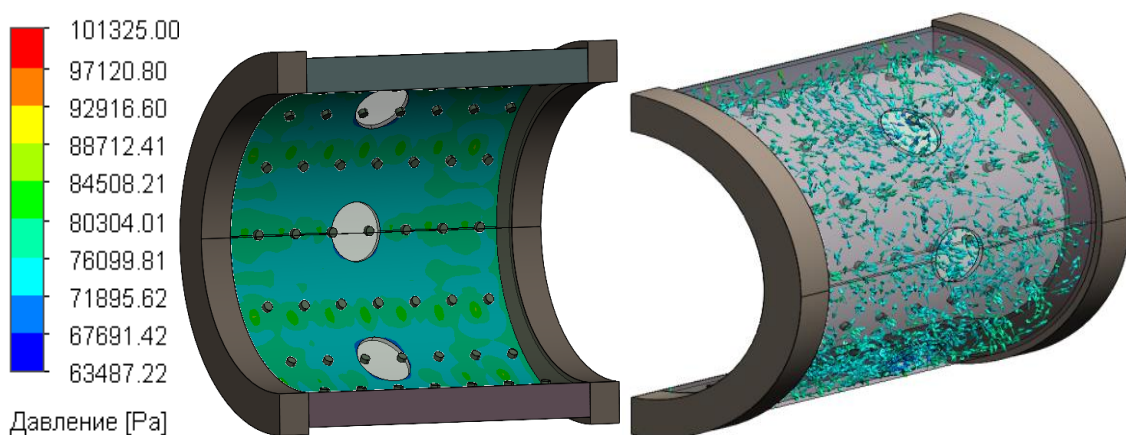
тогда минимальный угол отрыва от верхней точки барабана составляет:

Рисунок 3 – Минимальный угол отрыва для попадания в лоток

$$\angle BAD = \angle CAD - \angle BAC = 90^\circ - 32^\circ 51' = 57^\circ 9'. \quad (8)$$

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 соответствует данному требованию. Основным влияющим фактором на угол отрыва семени является разрежение в отверстиях рабочей поверхности.

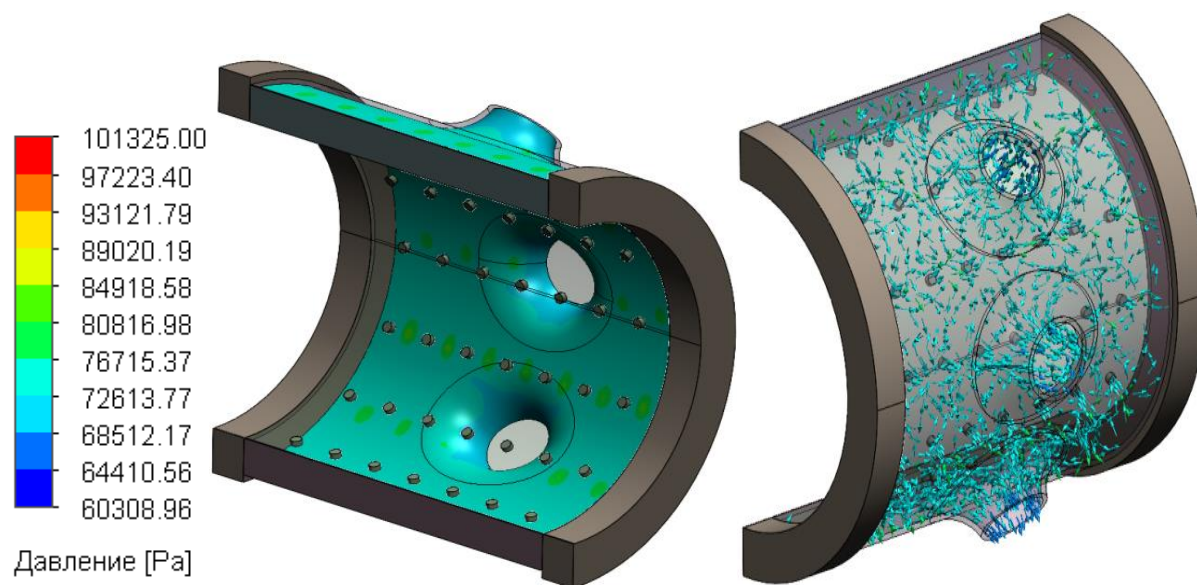
Одной из целей теоретических исследований является нахождение рациональных параметров рабочих органов сепаратора, которые обеспечат эффективность работы при проведении практических исследований сепаратора. Теоретически, методом программного аэродинамического моделирования определена эффективность исходной и разработанной камеры разрежения. Установлено, что второй вариант обеспечивает более равномерное разрежение на рабочей поверхности сепаратора. Распределение разрежения в исходной камере показано на рисунке 4.



а) перепады давления; б) траектории воздушного потока

Рисунок 4 – Моделирование перепадов давления в исходной камере разрежения

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. Аэродинамический анализ разработанной воздушной камеры представлен на рисунке 5.



а) перепады давления; б) траектории воздушного потока

Рисунок 5 – Моделирование перепадов давления в разработанной камере разрежения

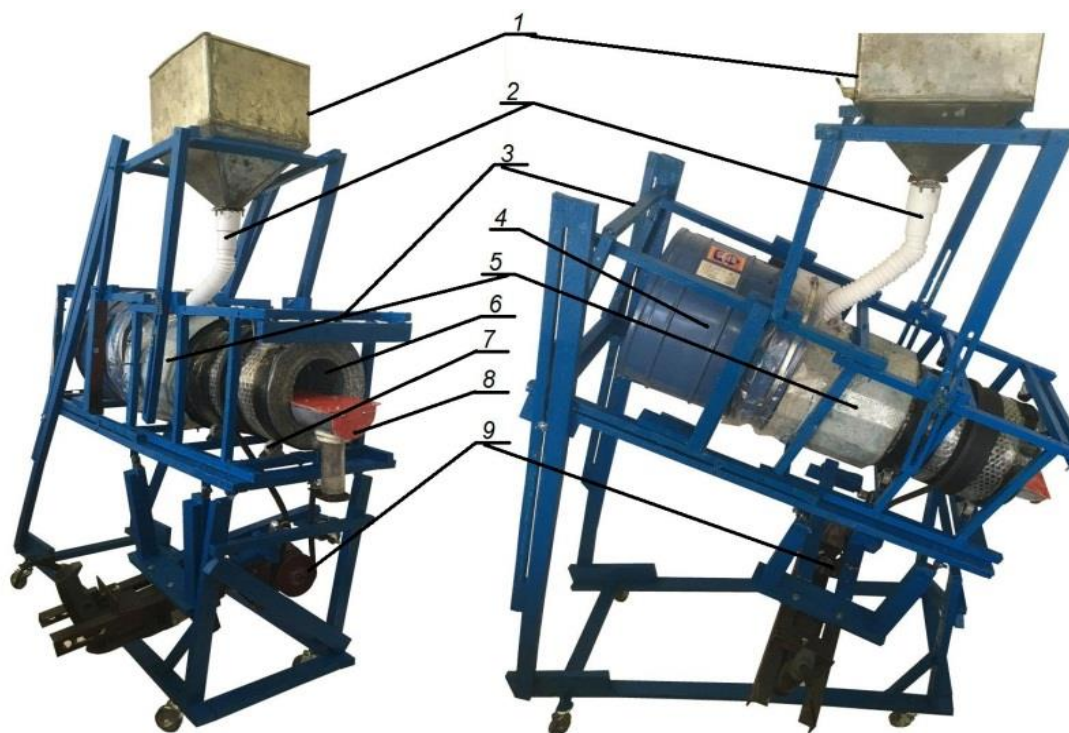
Установлено, что разработанная камера обеспечивает более равномерное разрежение на сепарирующей поверхности сепаратора.

Исходя из параметров сепаратора, рассчитана пропускная способность сепаратора, которая равна $6,86 \cdot 10^{-3}$ кг/с при расчётных параметрах. Определены теоретические зависимости разрежения на рабочей поверхности сепаратора от производительности вентилятора и потребления электроэнергии привода от частоты вращения. Подобран рациональная марка вентилятора 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 $0,41 \text{ с}^{-1}$.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований пневматического сепаратора» были поставлены задачи 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.

Исследованы выбранные рабочие поверхности для сепаратора. Определены силы вакуумного присасывания, необходимые для разрезания удержания семян разной массы на разных поверхностях. Определен коэффициент трения этих поверхностей. Определена необходимая скорость воздушного потока для удержания семени на поверхности. Проведены замеры скорости набегающего воздушного потока на семя, расположенного на сепарирующей поверхности при помощи доработанной трубки Пито Прандтля.

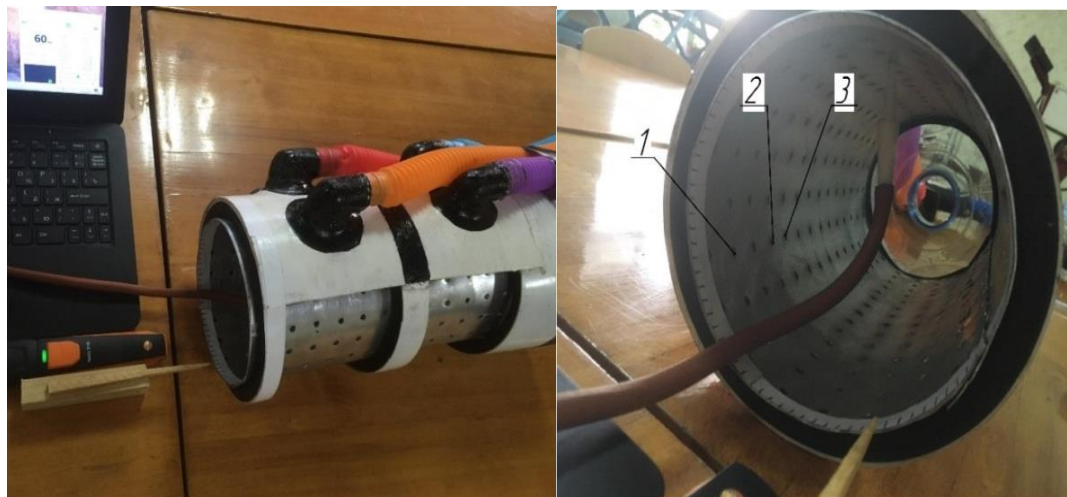
Изготовлена лабораторная модель сепаратора (рисунок 6), описаны технические параметры основных узлов и рабочих органов. Изготовлены три экспериментальные рабочие поверхности: резиновая поверхность, решето с ячейками и сетчатая поверхность.



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

Рисунок 6 – Лабораторный пневматический сепаратор с цилиндрической сепарирующей поверхностью

Для проверки преимуществ разработанной камеры на основе программного аэродинамического расчета проведен сравнительный замер в двух камерах на предмет равномерности разрезания (рисунок 7).



1, 2, 3 – траектории движения семени для измерений
 Рисунок 7 – Исследование равномерности давлений в воздушных камерах пневматического сепаратора

С целью определения рациональной частоты вращения барабана, вакуумметрического давления в воздушных камерах, угла наклона барабана и производительности сепаратора.

Каждый из параметров поочередно постепенно увеличивался до момента, когда сепаратор полностью терял свою эффективность, параллельно фиксировалась на каждом этапе средняя масса каждой фракции и ее процентная доля массы от всех семян.

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

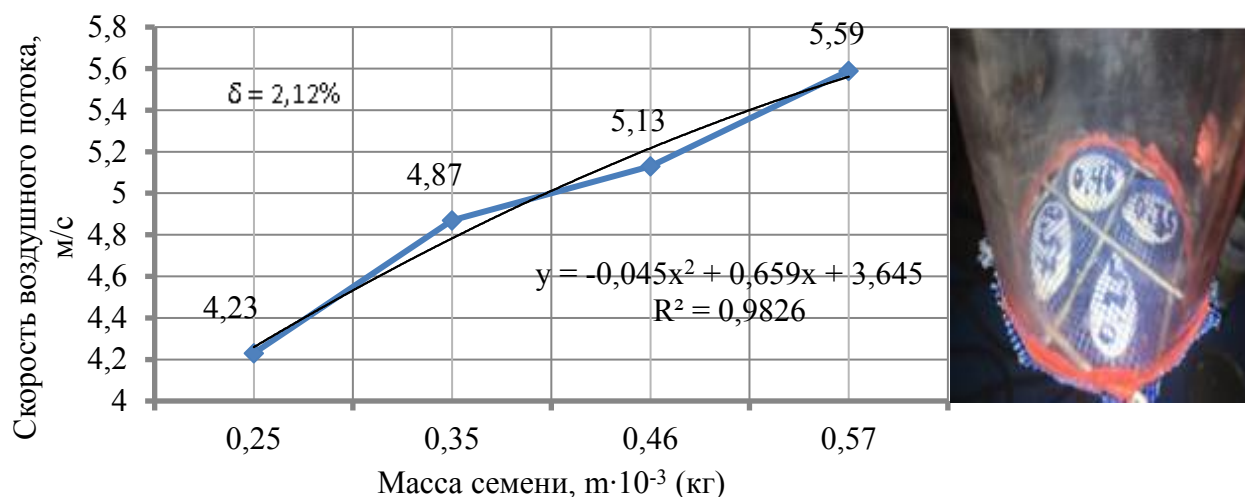
Проведен эксперимент по сепарации тремя экспериментальными рабочими поверхностями для сравнения их эффективности с ровным решетом ($d = 4$ мм, $t = 20$ мм), которое было взято за основную сепарирующую поверхность.

Исследовано разделение семян огурца на сепараторе с целью определения возможности разделения семян разной формы.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты и анализ экспериментальных исследований.

Составлена графическая зависимость показателей скорости воздушного потока и разрежения в воздушной камере в момент отрыва семени с рабочей поверхности.

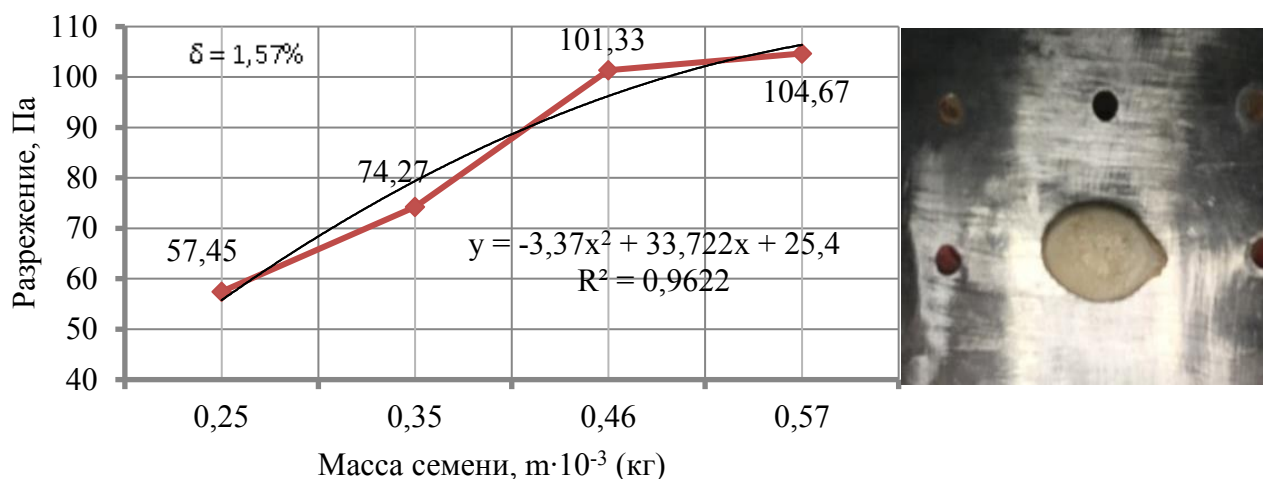
По результатам эксперимента на сетчатой поверхности скорость воздушного потока по мере изменения массы семени возрастала от 4,23 м/с до 5,59 м/с. Недостатком данной рабочей поверхности можно назвать большое живое сечение, что приводит к увеличению набегающего воздушного потока в барабан сепаратора (рисунок 8).



а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

Рисунок 8 – Зависимость скорости воздушного потока от массы семени при отрыве от сетчатой поверхности ($a = 1 \times 1$ мм)

По результатам исследований ровного решета разрежение изменялось от 57,45 Па до 104,67 Па (рисунок 9).

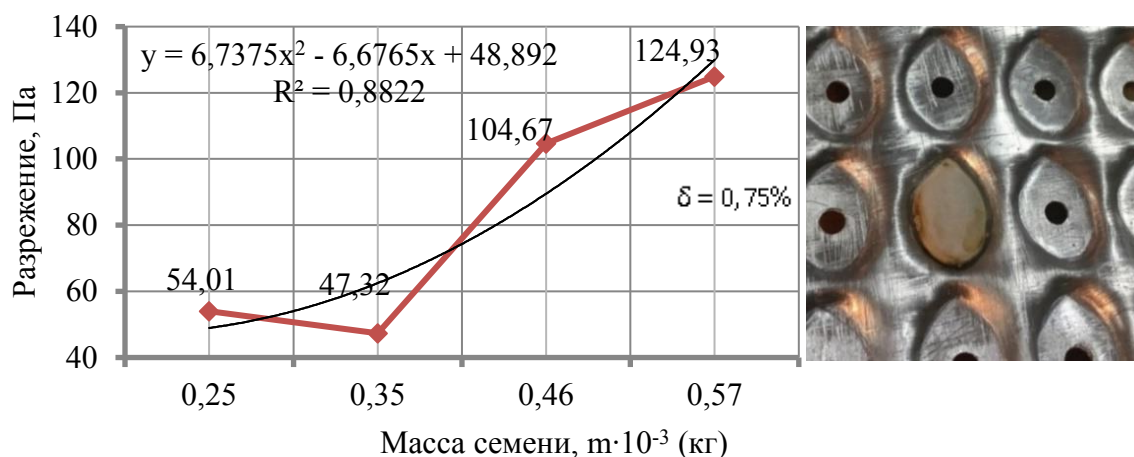


а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

Рисунок 9 – 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.

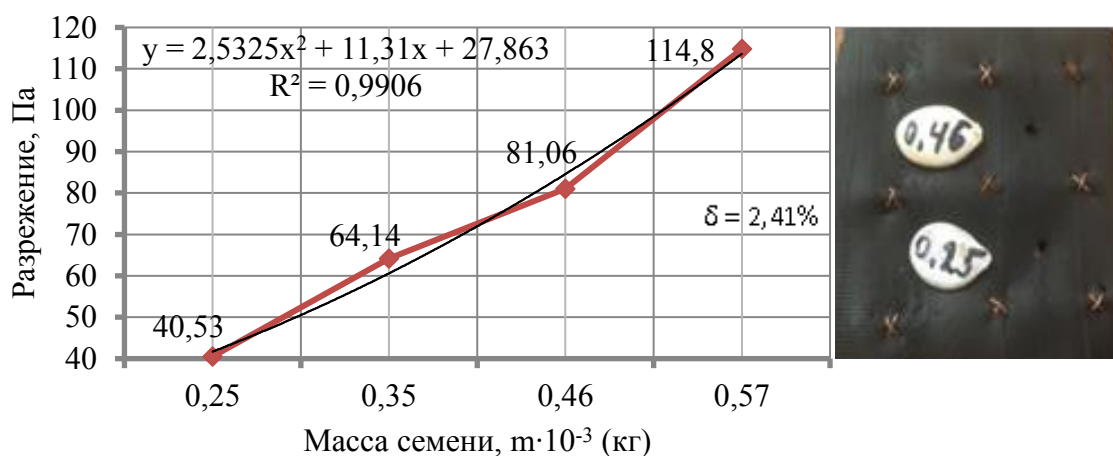
По результатам исследования решета с ячейками под семена, разрежение изменялось с 47,32 Па до 124,93 Па (рисунок 10). Данная сепарирующая поверхность показала себя наименее эффективной, так как даже незначительная разница в форме и размере семени влияла на положение его в ячейке, поэтому показатель отрыва недостаточно зависел от массы семени.



а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

Рисунок 10 – Зависимость разрежения от массы семени при отрыве от решета с ячейками ($d = 4$ мм, $t = 20$ мм)

Наиболее рациональным оказалось резиновое решето с ячейками. Разрежение изменялось с 40,53 Па до 114,80 Па, что является наиболее качественным результатом, поскольку разрежение возрастало наиболее стабильно относительно массы семени (рисунок 11), а показатели в разных повторах имели минимальный разброс. Исходя из показателей, данная поверхность лучше остальных удерживает семена, требуя при этом меньше силы вакуумного присасывания.



а) график зависимости; б) фото удержания семени поверхностью

Рисунок 11 – Зависимость разрежения от массы семени при отрыве от резинового решета с ячейками ($d = 4$ мм, $t = 20$ мм)

Согласно результатам исследования, применение разработанной камеры разрежения в сепараторе обеспечивает более равномерное распределение вакуума по сравнению с исходной конструкцией (рисунок 12). При переходе на разработанную камеру, среднеквадратическое отклонение разрежения на рабочей поверхности уменьшилось в три раза, с 7,20 Па до 2,40 Па.

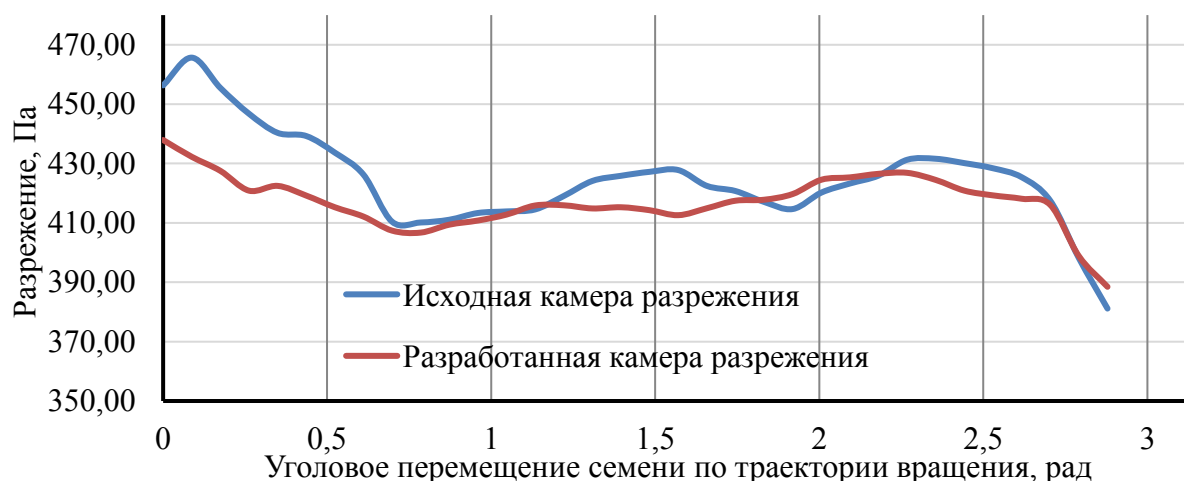


Рисунок 12 – Зависимость вакуумметрического воздействия на семя от его углового перемещения по траектории вращения

Проведены однофакторные эксперименты по сепарации, выбраны рациональные рабочие зоны параметров сепаратора. Наилучшее качество разделение семян происходит 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 $7,14 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

Для проведения многофакторного эксперимента выбраны три основных фактора: x_1 – частота вращения барабана, с^{-1} ; x_2 – разрежение в воздушной камере, Па; x_3 – угол наклона барабана, градусы. Уравнение математической модели в кодированных переменных полученных результатов имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y = & (276,072) + (-8,882) \cdot x_1 + (12,597) \cdot x_2 + (-11,314) \cdot x_3 + \\
 & + (-8,584) \cdot x_2^2 + (-1,424) \cdot x_3^2 + (0,793) \cdot x_1 \cdot x_2 + \\
 & + (-1,523) \cdot x_1 \cdot x_3 + (-5,978) \cdot x_2 \cdot x_3
 \end{aligned} \quad (9)$$

Найденные значения факторов соответствуют глобальному максимуму целевой функции – массы 1000 семян посевной фракции. Частота вращения барабана $x_1 = 0,418 \text{ с}^{-1}$ обеспечивает достаточную частоту контакт семян с отверстиями сепарирующей поверхности для своевременного отбора легких фракций, но не вызывает проскальзывания семян по ним. Разрежение $x_2 = 268,20 \text{ Па}$ 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.

Графическая визуализация поверхности отклика выполнена в виде трехмерных поверхностей и диаграмм изолиний при фиксации одного из факторов на оптимальном уровне (рисунки 13 – 15). На всех графиках отмечена точка глобального оптимума, а также нанесены экспериментальные данные, подтверждающие адекватность модели.

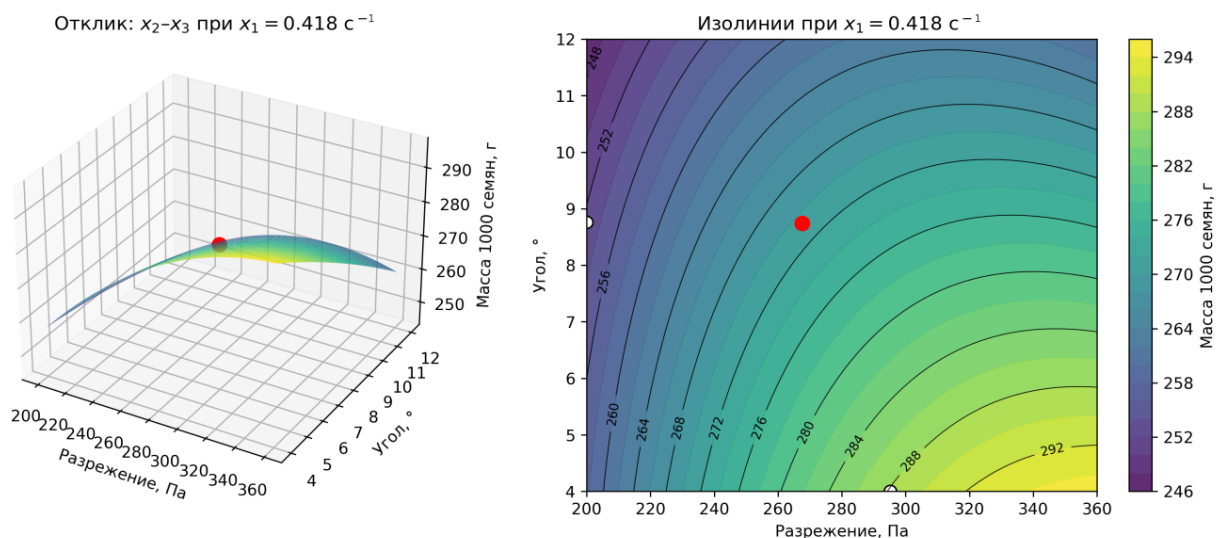


Рисунок 13 – Графическое отображение поверхности отклика и изолиний при постоянном значении частоты вращения барабана

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.

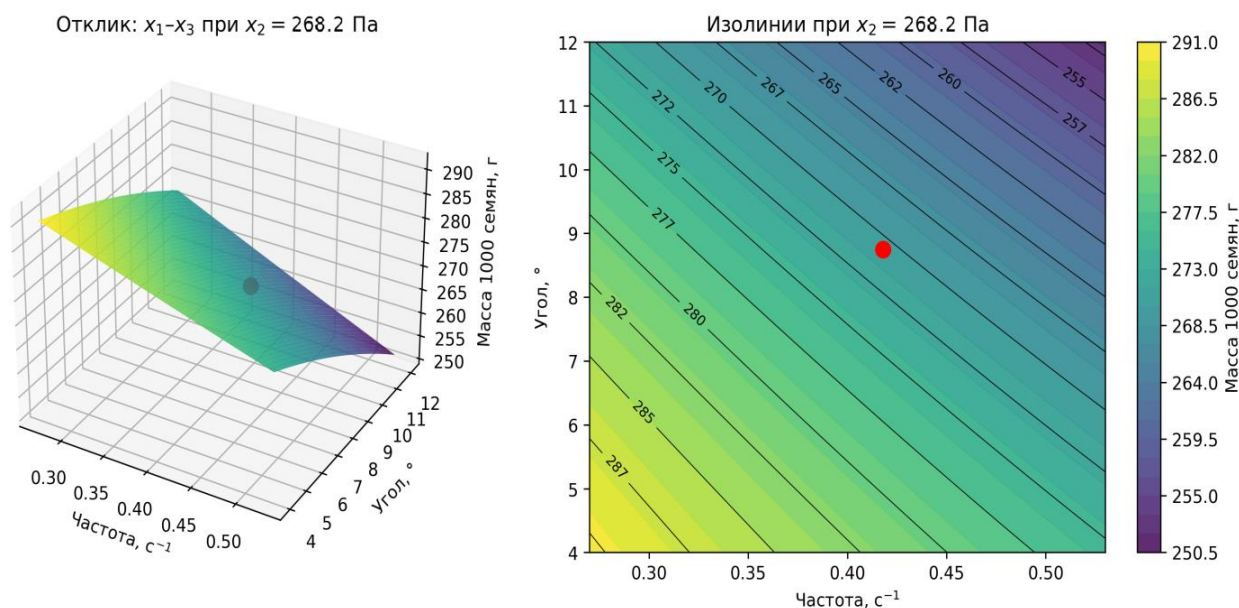


Рисунок 14 – Графическое отображение поверхности отклика и изолиний при постоянном значении разрежения

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

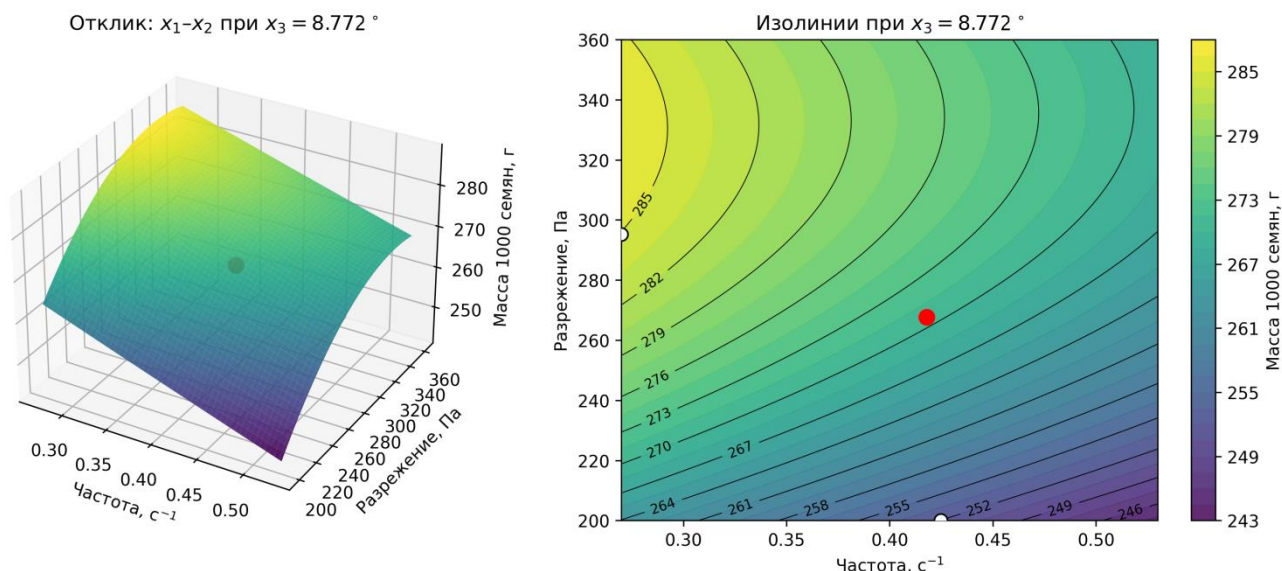


Рисунок 15 – Графическое отображение поверхности отклика и изолиний при постоянном значении угла наклона барабана

По результатам разделения семян разными рабочими 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 результат аналогичен.

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

В пятой главе «Практическая реализация и экономическая эффективность результатов исследований» описан изготовленный опытный образец пневматического сепаратора, получивший условное название ССБ-0,1 на базе лабораторной установки согласно заключенному договору № 19279ГУ/2024 от 14.05.2024. Опытный образец сепаратора используется для внедрения в сельскохозяйственный рынок. Проанализированы перспективы внедрения сепаратора на сельскохозяйственный рынок на основе оценки объема рынка на примере Ростовской области и стоимости услуг по сепарации. Параметры опытного образца сепаратора представлены в таблице 1.

Таблица 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

Внешний вид сепаратора ССБ-0,1 представлен на рисунке 16.



а) вид спереди; б) вид сзади
Рисунок 16 – Внешний вид сепаратора ССБ-0,1

Определена годовая экономическая эффективность внедрения в фермерское хозяйство пневматического сепаратора ССБ-0,1 вместо пневматического сортировального стола ПСС-1. 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.

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 во внутренней цилиндрической сепарирующей поверхности 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 цилиндрической опорной сепарирующей поверхностью, в которой семена прижимаются к внутренней поверхности перфорированного цилиндра под действием центробежной силы и вакуумного присасывания. За счет действия разного разрежения в зонах сепарирующей поверхности, семена разделяются на три фракции.

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. Подтверждено преимущество предложенной формы камеры разрежения, обеспечивающей равномерное распределение разрежения по всей рабочей зоне. Теоретически рассчитаны параметры необходимого вентилятора, выбрана рациональная марка необходимого вентилятора.

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

- обоснован выбор основной сепарирующей поверхности (ровное решето, $d = 4$ мм, $t = 20$ мм) на основе сравнительных испытаний сил вакуумного присасывания, коэффициента трения и эффективности сепарации;

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

- экспериментально определены рабочие диапазоны параметров сепаратора при разделении семян тыквы, после чего они были рационализированы методом многофакторного эксперимента, получены значения: частота вращения барабана – $0,42 \text{ с}^{-1}$ (≈ 25 об/мин), разрежение на рабочей поверхности – 268,20 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;

- 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 сепараторе 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.

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ

1. 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.

2. Круглых, Н. А. Математическое моделирование работы пневматического сепаратора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 11 (253). С. 71–76. – <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-253-11-71-76>.

3. 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.

Сборники, материалы конференций и другие научные издания

1. Круглых, Н. А. Методика проведения экспериментов по разделению семян тыквы на разработанном аэродинамическом сепараторе / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. – 2022. – № 3(16). – С. 334-340. – EDN VONGKF.

2. 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. – EDN LQDSSX.

3. Круглых, Н. А. Анализ машин для сепарации семян овощных и бахчевых культур, обоснование конструктивно-технологической схемы / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Аграрная наука в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельских территорий : Сборник материалов III международной научно-практической конференции, Луганск, 25 января – 08 2022 года. – Луганск: Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова, 2022. – С. 82-84. – EDN ONDMNC.

4. 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.

5. 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 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 525-527. – EDN VCRXNO.

6. Круглых, Н. А. Модернизация сепаратора семян бахчевых и овощных культур / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Молодые ученые в аграрной науке : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Луганск, 25–26 апреля 2023 года. – Луганск: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования "Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова", 2023. – С. 42-44. – EDN ZGXCZR.

7. Круглых, Н. А. Методика проведения экспериментов по исследованию рабочей поверхности нового аэродинамического сепаратора / Н. А. Круглых // Наука и молодёжь: новые идеи и решения : материалы XVII Международной научно-практической конференции молодых исследователей, Волгоград, 30–31 марта 2023 года. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2023. – С. 306-313. – EDN SHNICA.

8. 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 года. – Луганск: Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова, 2023. – С. 286-287. – EDN IAYZZX.

9. Круглых, Н. А. Разработка и создание экспериментальной модели нового аэродинамического сепаратора семян сельскохозяйственных культур с цилиндрической опорной поверхностью / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Аграрная наука в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельских территорий : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ IV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Луганск, 17 января – 08 2023 года. – Луганск: Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова, 2023. – С. 124-126. – EDN QTNDRT.

10. 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 года / Под общей редакцией А.Л. Севостьянова. – Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2023. – С. 116-121. – EDN HQNHCZ.

11. Круглых, Н. А. Проведение экспериментов по разделению семян на разрабатываемом пневматическом сепараторе / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Молодые ученые в аграрной науке : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Луганск, 17–18 апреля 2024 года. – Луганск: Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова, 2024. – С. 22-24. – EDN ENNSVJ.

12. Круглых, Н. А. Исследование разделения семян тыквы рабочими поверхностями на пневматическом сепараторе / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко // Молодёжная наука для решения актуальных задач АПК : Всероссийский молодёжный научный форум, посвященный 45-летию юбилею Студенческого конструкторского бюро ФГБОУ ВО РГАТУ, Рязань, 20–21 февраля 2025 года. –

Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2025. – С. 68-74. – EDN OGORTL

13. 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 года. – Балашиха: Российский государственный университет народного хозяйства им. В.И. Вернадского, 2025. – С. 296-299. – EDN TQZNED.

Патенты

1. Патент № 2822527 C1 Российская Федерация, МПК B07B 4/00. Сепаратор семян овощных и бахчевых культур : № 2024104114 : заявл. 16.02.2024 : опубл. 08.07.2024 / Н. А. Круглых, А. А. Ильченко, С. Ф. Вольвак [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина". – EDN BCRSNC.

2. Патент на полезную модель № 237751 U1 Российская Федерация, МПК A01C 1/00. Сепаратор семян овощных и бахчевых культур : заявл. 26.03.2025 : опубл. 03.10.2025 / Н. А. Круглых, В. И. Шаповалов, А. А. Ильченко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова". – EDN IQJMBT.

Подписано в печать 24.09.2026 г. Формат бумаги 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,0. Заказ № 153. Тираж 100 экз.

Отпечатано в

ИП Пальчак Андрей Владимирович

291016, г. Луганск, ул. Ленина, 38, + 7 959 144 88 46,

e-mail: elton2lug@mail.ru