

На правах рукописи

ЯКИМОВ

Андрей Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
СЕПАРАТОРА ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА ПУТЁМ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
И ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕШЁТ**

Специальность 05.20.01 – технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киров - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия»

Научный руководитель: **Жолобов Николай Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», доцент кафедры эксплуатации и ремонта машинно-тракторного парка.

Официальные оппоненты: **Галкин Василий Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова», профессор кафедры сельскохозяйственных машин и оборудования;

Симонов Максим Васильевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», старший научный сотрудник лаборатории зерно- и семяочистительных машин.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита состоится 19 апреля 2017 года в 13 часов 30 минут на заседании объединенного диссертационного совета ДМ 006.048.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» по адресу: 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166а, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» и на официальном сайте института: niish-sv.narod.ru

Автореферат разослан " ____ " февраля 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,

Глушков Андрей Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из приоритетных задач работы агропромышленного комплекса России является обеспечение потребителей качественным зерном. Решение данной задачи прямо зависит от того насколько эффективны и совершенны те технические средства, которые используются в процессе послеуборочной обработке зерна. В связи с этим разработка и использование новых машин и нового оборудования, обладающих высокими показателями энерго- и ресурсосбережения имеет важное значение для народного хозяйства.

Степень разработанности темы. Вопросом повышения эффективности работы сепараторов зернового материала занимались исследователи: Н.Е. Авдеев, А.В. Алёшкин, В.Л. Андреев, В.И. Анискин, В.Н. Афанасьев, В.И. Беляев, З.Ш. Блох, Н.Б. Бок, А.И. Бурков, П.М. Василенко, В.Д. Галкин, Е.С. Гончаров, С.М. Григорьев, Ю.В. Гриньков, Ю.Н. Грушин, А.В. Димитриев, В.М. Дринча, Ю.И. Ермольев, Р.А. Зверков, Н.М. Иванов, И.Я. Изаков, М.В. Киреев, В.С. Коваль, В.А. Кубышев, М.В. Кузьмин, С.В. Леканов, М.Н. Летошнев, В.Н. Макаров, Р.Г. Муллаянов, А.А. Орлов, В.М. Осецкий, И.И. Попко, Д.А. Пустынный, М.Я. Резниченко, Н.И. Стрикунов, А.В. Сухов, А.А. Сухопаров, Н.П. Сычугов, Ю.В. Сычугов, Б.Т. Тарасов, Г.Д. Терсков, В.В. Ткачёв, В.Р. Торопов, Б.Г. Турбин, А.Ф. Ульянов, А.И. Файнберг, Н.А. Фетисов, А.А. Хижников, С.А. Черкашин, А.В. Черняков, В.Ю. Чурюмов, А.А. Языкова, и другие.

Не смотря на высокую степень исследованности темы работы цилиндрических решёт, следует отметить, что в трудах перечисленных авторов не затрагивается рассмотрение вопроса рабочего процесса цилиндрических решёт, расположенных одно в другом.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является повышение эффективности функционирования сепаратора зернового материала путём совершенствования технологического процесса и параметров цилиндрических решёт.

В связи с поставленной целью, определены следующие задачи исследования:

- разработать конструктивно-технологическую схему сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами;
- провести теоретические исследования по определению оптимальных режимов совместной работы внутреннего и наружного цилиндрических решёт сепаратора зернового материала;
- определить оптимальные конструктивные параметры и режимы работы сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами;
- получить модели регрессии технологического процесса очистки зернового материала сепаратором зернового материала с цилиндрическими решётами;
- исследовать влияние влажности зернового материала на качественные и количественные показатели работы сепаратора с цилиндрическими решётами;
- провести производственные испытания сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами;

- оценить экономическую эффективность работы сепаратора зерна с цилиндрическими решётами.

Объект исследования. Объектами исследования выбраны механика движения зерновки по внутренней поверхности решета, необходимые условия для прохождения зерновки сквозь отверстие решета, технологический процесс очистки зерна на двух, расположенных одно в другом, цилиндрических решётах, вращающихся в противоположные стороны и имеющих смещение осей, опытный образец сепаратора зернового материала.

Методология и методы исследований. Методика исследований предусматривала проведение теоретических изысканий по согласованию работы внутреннего и наружного решёт. При этом оптимальные значения параметров и режимов работы сепаратора зернового материала определяли в ходе экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях. Теоретические изыскания и экспериментальные исследования проводились с использованием стандартных методик и методик, разработанных самостоятельно. При обработке результатов экспериментов применялись методы математической статистики и теории планирования эксперимента.

Научная новизна работы. Разработан сепаратор зернового материала (патент РФ на полезную модель № 86502), применение которого позволяет повысить эффективность очистки зернового материала от примесей за счёт более эффективного использования площади рабочей поверхности цилиндрического решета.

Теоретически определены области оптимальных частот вращения внутреннего и наружного цилиндрических решёт, обеспечивающие свободное прохождение частиц сквозь отверстия внутреннего и наружного цилиндрических решёт.

Определено рациональное сочетание параметров и режимов работы сепаратора для различных величин подачи обрабатываемого материала, влияющих на величину полноты выделения мелких примесей и потребление энергии.

Теоретическая и практическая значимость работы. Получены модели, достоверно описывающие технологический процесс работы сепаратора зернового материала. Создан сепаратор зернового материала, обеспечивающий выделение крупных и мелких примесей из зерновой смеси при высокой пропускной способности, удовлетворяющий агротехническим требованиям, предъявляемым к машинам предварительной и первичной очистки зернового материала. Опытный образец сепаратора зернового материала был установлен в технологической линии зерноочистительно-сушильного комплекса отделения «Русское» ЗАО «Агрофирма «Дороничи» г. Кирова.

На защиту выносятся следующие положения:

- конструктивно-технологическая схема сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами;

- теоретическое обоснование области оптимальных режимов совместной работы внутреннего и наружного цилиндрических решёт сепаратора зернового материала;

- рациональные конструктивные параметры и режимы работы сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами;
- модели регрессии технологического процесса очистки зернового материала сепаратором зернового материала с цилиндрическими решётами;
- результаты исследования влияния влажности и подачи зернового материала на качественные и количественные показатели работы сепаратора с цилиндрическими решётами;
- результаты производственных испытаний сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами;
- расчётный экономический эффект от применения сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность основных выводов подтверждена экспериментальными исследованиями, положительными результатами предварительных и производственных испытаний и эксплуатации сепаратора зернового материала.

Основные положения работы доложены, обсуждены и одобрены на I, III, V международных научно-практических конференциях «Наука-Технология - Ресурсосбережение» ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА г. Киров (2009, 2011, 2013 гг.), на VIII, IX международных научно-практических конференциях аспирантов и молодых ученых «Знания молодых: наука, практика и инновации» ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА г. Киров (2008, 2009 гг.) и на XI, XIII, XIV международных научно-практических конференциях «Мосоловские чтения» ФГБОУ ВПО Марийский государственный университет (2009, 2011, 2012 г.)

По материалам исследований опубликовано 10 научных работ, в том числе две работы в изданиях, рекомендованных ВАК и получен патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 165 страниц, 12 приложений, 59 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 113 источников.

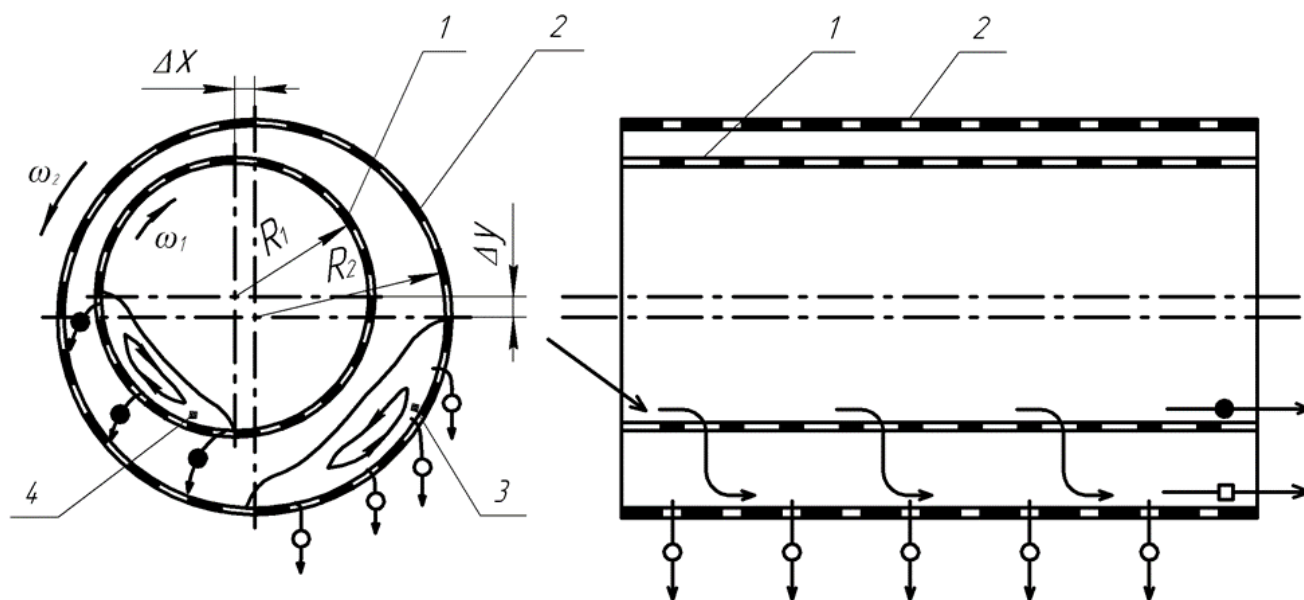
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая ценность работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Состояние вопроса и задачи исследования» проведён анализ свойств зернового материала, поступающего на пункт послеуборочной обработки зерна, анализ существующих зерноочистительных машин, имеющих решётную очистку. На основе анализа существующих зерноочистительных машин, проведённого нами обзора патентной информации, а также работ таких учёных как З.Ш. Блох, Н.Б. Бок, П.М. Василенко, В.Д. Галкин, Е.С. Гончаров, С.М. Григорьев, Ю.В. Гриньков, И.Я. Изаков, М.В. Киреев, В.А. Кубышев, М.В. Кузьмин, М.Н. Летошнев, В.Н. Макаров, Р.Г. Муллаянов, В.М. Осецкий, И.И. Попко, М.Я. Резниченко, Н.И. Стрикунов, Г.Д. Терсков, А.Ф. Ульянов, А.И. Файнберг, Н.А. Фетисов и других, установлено, что цилиндрические решёта, по

сравнению с плоскими решётами имеют следующие преимущества: простота конструкции, безвибрационность движения, более высокая надёжность. Кроме того, при своей работе цилиндрические решёта обеспечивают безотрывность перемещения зернового слоя, повышая этим эффективность просеивания. Установлено, что в цилиндрических решётах с горизонтальной осью вращения для рабочего процесса используется лишь примерно 1/4 - 1/6 часть конструктивной поверхности решета, что снижает эффективность работы сепаратора. Поставлены задачи исследования.

Во втором разделе «Теоретическое обоснование области оптимальных режимов совместной работы внутреннего и наружного цилиндрических решёт сепаратора зернового материала» на основании проведённого в первой главе анализа существующих зерноочистительных машин, а также проведённого обзора патентной информации была предложена схема сепаратора зернового материала с цилиндрическими решетами, представленная на рисунке 1.



—□→ — очищаемый материал; —○→ — мелкие примеси; —●→ — очищенное зерно; —●→ — крупные примеси

Рисунок 1 – Схема сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами: 1 - внутреннее цилиндрическое решето; 2 - наружное цилиндрическое решето; 3,4 - подвижный зерновой слой

Предлагаемый нами сепаратор зернового материала работает следующим образом. Очищаемый материал поступает на внутреннюю поверхность внутреннего цилиндрического решета, где в результате его вращения образует подвижный слой очищаемого материала. Перемещение материала в осевом направлении происходит за счёт наклона оси вращения цилиндрического решета. При этом частицы, имеющие размер меньший, чем размер отверстий внутреннего решета (а именно зерно и мелкие примеси) проходят сквозь эти отверстия и попадают на внутреннюю поверхность наружного решета. Крупные примеси,

не способные пройти сквозь отверстия внутреннего цилиндрического решета, идут сходом с его поверхности. На наружном решете, имеющем размер отверстий меньший, чем у внутреннего решета, происходит отделение мелких примесей. Очищенное зерно идет сходом с поверхности наружного решета. Благодаря смещению осей наружного и внутреннего цилиндров, достигается уменьшение габаритов наружного решета. Кроме того, благодаря вращению решёт в противоположные стороны, область, на которую попадает материал, прошедший сквозь отверстия внутреннего цилиндрического решета, оказывается свободной от циркулирующего на наружном цилиндрическом решете зернового слоя. В результате этого происходит увеличение площади сепарации, и как следствие – увеличение пропускной способности сепаратора.

Рассмотрим движение зерновки, попавшей на внутреннюю поверхность равномерно вращающегося цилиндра, имеющего радиус $R_в$, как материальной точки, обладающей массой m (рисунок 2).

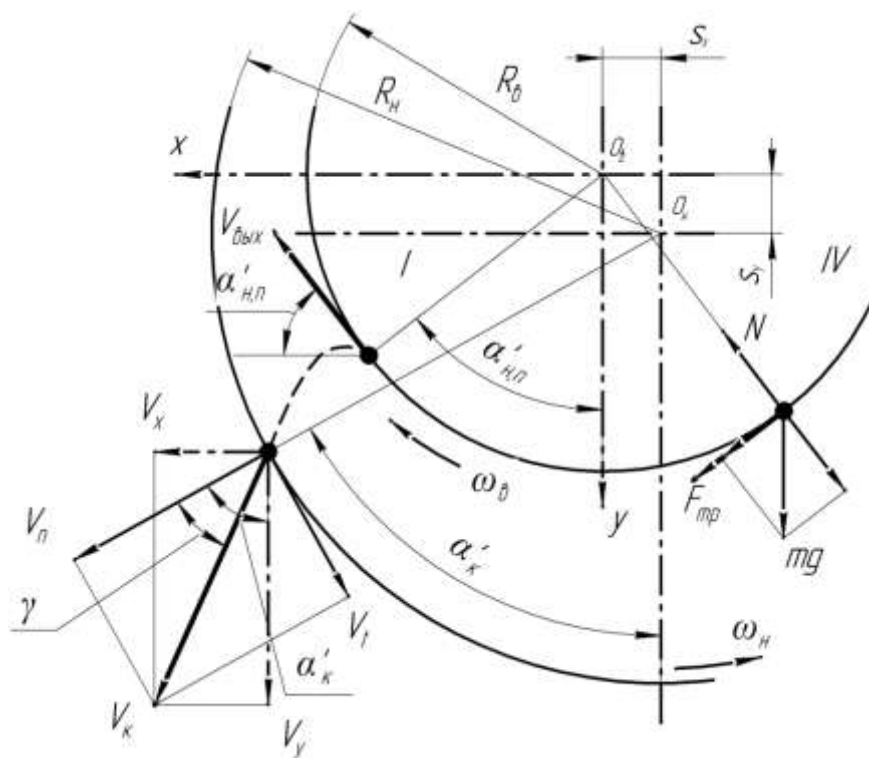


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на зерновку, и составляющие скорости движения зерновки в сепараторе

Уравнение движения материальной точки в IV квадранте в соответствии со вторым законом Ньютона можно записать как:

$$m\bar{g} + \bar{N} + \bar{F}_{тр} = m\bar{a}, \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

m – масса зерновки, кг;

N – сила нормальной реакции поверхности цилиндра, Н;

\bar{F}_{mp} - сила трения, Н;

\bar{a} – ускорение, м/с².

Решая уравнение (1) в I и IV четвертях, получим:

$$\Omega_{\epsilon}^2 = \frac{2g \cdot \cos E}{R_{\epsilon} \cdot \cos \varphi_{mp}} \left[\cos(\alpha' - \varphi_{mp} - E) - \cos(\alpha'_0 - \varphi_{mp} - E) \cdot \exp(2tg \varphi_{mp} \cdot (\alpha' - \varphi_{mp})) \right], \quad (2)$$

где φ_{mp} – угол трения зерновки о поверхность решета;

α' - угол текущего положения зерновки на поверхности цилиндра, рад;

α'_0 - угол начального положения зерновки на поверхности цилиндра, рад.

Причём

$$E = \operatorname{arctg}(2tg \varphi_{mp}). \quad (3)$$

Формула (2) определяет зависимость изменения угловой скорости Ω_{ϵ} зерновки, попавшей на поверхность внутреннего цилиндра от угла α' положения зерновки. После попадания зерновки на поверхность цилиндра её угловая скорость начинает возрастать. Это возрастание продолжается до того момента, пока угловые скорости цилиндра и зерновки не сравняются. После этого зерновка продолжит своё движение, вращаясь вместе с цилиндром без относительного движения. Данный вид движения будет продолжаться до тех пор, пока зерновка не поднимется на определённый угол, после которого угловая скорость зерновки начнёт уменьшаться. Величину этого угла определим исходя из того, что торможение начнётся, когда касательная составляющая силы тяжести зерновки станет равна силе трения.

Тогда угол $\alpha_{н.м}$ начала торможения зерновки определится как:

$$\alpha_{н.м} = \varphi_{mp} + \arcsin(k \cdot \sin \varphi_{mp}). \quad (4)$$

Здесь k - показателем кинематического режима работы цилиндрического решета. Показатель k определяется:

$$k = \frac{\omega_{\epsilon}^2 \cdot R_{\epsilon}}{g}, \quad (5)$$

где ω_{ϵ} - угловая скорость внутреннего цилиндра, рад/с; является.

После прохождения границы, определяемой углом $\alpha_{н.м}$, начинается замедление зерновки, которое описывается уравнением:

$$\Omega_{\epsilon}^2 = \omega_{\epsilon}^2 + \frac{2g \cdot \cos E}{R_{\epsilon} \cdot \cos \varphi_{mp}} \cdot \cos(\alpha - \varphi_{mp} - E) - \frac{2g \cdot \cos E}{R_{\epsilon} \cdot \cos \varphi_{mp}} \cdot (\cos(\alpha_{н.м} - \varphi_{mp} - E) \cdot \exp(2tg \varphi_{mp} \cdot (\alpha - \alpha_{н.м}))) \quad (6)$$

С помощью представленных выше формул были получены значения угловых скоростей Ω_g зерновок, попавших на внутреннюю поверхность внутреннего цилиндра, в зависимости от угла попадания и угла поворота цилиндра.

Разность угловых скоростей зерновки и решета ещё не гарантирует, что эта зерновка сможет пройти сквозь его отверстие. Условия прохода зерновки определим, используя следующие допущения. Зерновка имеет форму эллипса (рисунок 3). Продольная ось эллипса c соответствует длине зерновки, а поперечная b – ширине. Пусть в начальный момент времени такая зерновка находится на внутренней поверхности решета, имеющего радиус R , и вращающегося с угловой скоростью ω_g .

Положение центра зерновки A в момент начала прохождения зерновки сквозь отверстие определяется углом $\alpha_{н.п}$, отсчитываемым от вертикального диаметра решета в сторону, соответствующую направлению его вращения. Угловая скорость зерновки Ω_g меньше угловой скорости решета, поэтому в определённый момент времени зерновка соскальзывает с кромки отверстия. Далее зерновка летит свободно как тело, брошенное под углом $\alpha_{н.л}$ к горизонту со скоростью

$$V_{\text{вых.}} = \Omega_g (R_g - b/2) . \quad (7)$$

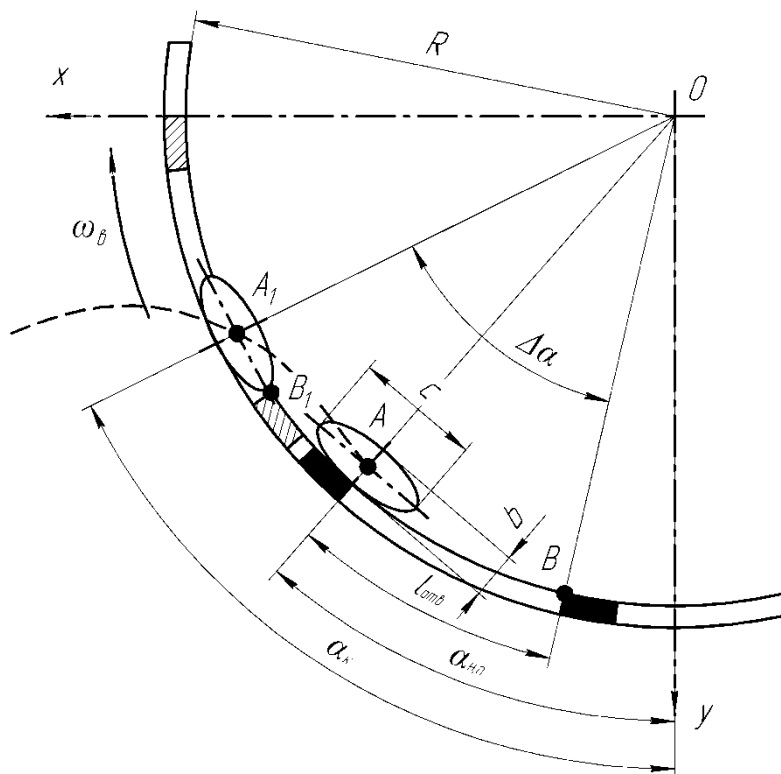


Рисунок 3 – Схема определения условий для прохода зерновки в отверстие цилиндрического решета

Считаем, что зерновка пройдет сквозь отверстие решета если в момент её встречи с кромкой отверстия B_1 центр зерновки A_1 будет находиться не выше

точки пересечения окружности внутренней поверхности цилиндра и параболы, представляющей собой траекторию движения центра зерновки.

Параметрические уравнения движения центра зерновки A при свободном полёте можно записать:

$$\begin{cases} x = (R_g - b/2) \cdot \sin \alpha_{н.н} + \Omega_g \cdot t \cdot (R_g - b/2) \cdot \cos \alpha_{н.н} \\ y = (R_g - b/2) \cdot \cos \alpha_{н.н} + \Omega_g \cdot t \cdot (R_g - b/2) \cdot \sin \alpha_{н.н} + \frac{g \cdot t^2}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

где b - толщина зерновки, м;

$\alpha_{н.н}$ - угол начала прохождения зерновки сквозь отверстие решета, рад;

t - время полёта зерновки, с.

Уравнение внутренней поверхности цилиндрического решета запишется в следующем виде:

$$x^2 + y^2 = R_g^2. \quad (9)$$

Решая совместно уравнения (8) и (9), получим координаты центра зерновки x_k и y_k в момент пересечения внутренней поверхности цилиндрического решета.

Далее определяем угол α_k , который будет занимать зерновка в этот момент времени:

$$\alpha_k = \arctg \frac{x_k}{y_k}, \quad (10)$$

где x_k и y_k - координаты центра зерновки.

Тогда угол $\Delta\alpha$, на который повернётся кромка отверстия B за время t полёта зерновки, определится из следующего выражения

$$\Delta\alpha = \alpha_k - \alpha_{н.н} + \frac{l_{омг} - c/2}{R_g}, \quad (11)$$

где $l_{омг}$ - длина отверстий цилиндрического решета, м.

Соответственно максимальная угловая скорость цилиндра при которой кромка отверстия B_1 достигнет зерновки за время её полёта может быть найдена из следующего выражения

$$\omega_{г.маx} = \frac{\Delta\alpha}{t}. \quad (12)$$

Используя приведённый выше алгоритм, нами были определены значения $\omega_{г.маx}$ для различных угловых скоростей зерновок при различных углах начала прохождения зерновки в отверстие внутреннего решета $\alpha_{н.н}$. На основе полученных данных была построена поверхность N , представленная на рисунке 4.

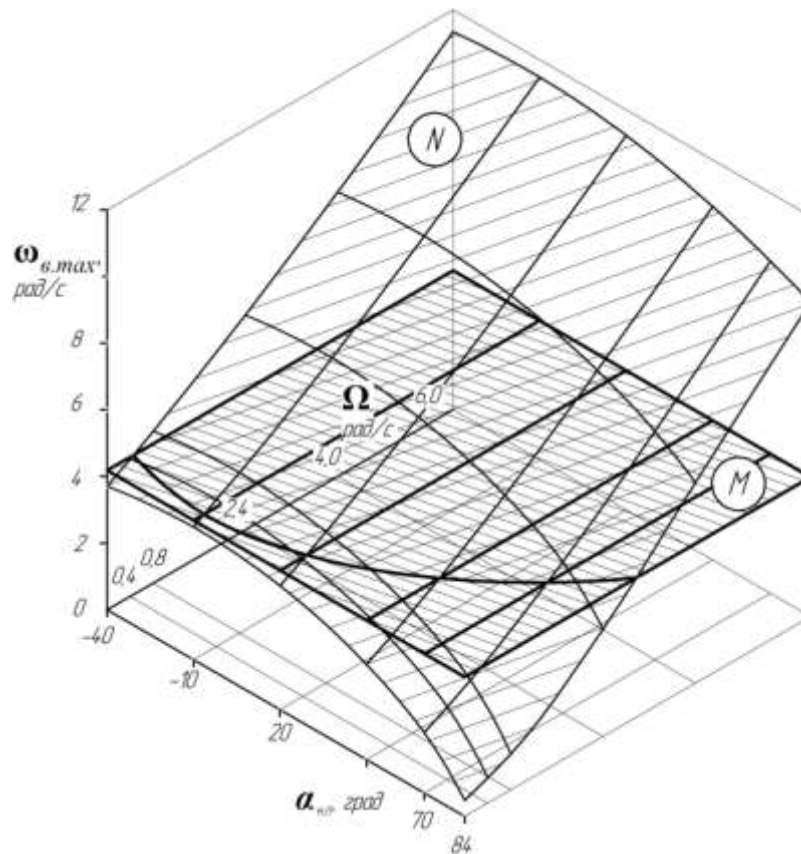


Рисунок 4 – Результат сечения поверхности N горизонтальной плоскостью M , соответствующей частоте вращения внутреннего цилиндра $n_g = 50 \text{ мин}^{-1}$

С целью определения минимальных значений угловых скоростей зерновок Ω_{min} , при которых возможен проход зерновки сквозь отверстие решета, поверхность N рассечена горизонтальными плоскостями M , соответствующими принятым нами частотам вращения цилиндра. Проецируя полученные в результате пересечения плоскости и поверхности линии на горизонтальную координатную плоскость, мы получаем зависимости значений минимальных угловых скоростей зерновок Ω_{min} от угла $\alpha_{н.п}$.

Накладывая полученные зависимости на графики изменения угловых скоростей зерновок, рассчитанным по выражениям (2) – (6), мы получаем области D , возможных скоростей выхода зерновок из отверстий цилиндрического решета. На рисунке 5 представлены области для частоты вращения $n_g = 50 \text{ мин}^{-1}$.

Для согласования работы внутреннего и наружного цилиндрических решёт нами были рассчитаны угловые скорости зерновок, в момент касания поверхности наружного решета Ω_n . Найдём тангенциальную составляющую V_t скорости движения зерновки $V_{вых}$ в момент касания (рисунок 2).

Зерновка, прошедшая сквозь отверстие внутреннего решета движется как тело, брошенное со скоростью $V_{вых}$ под углом $\alpha_{н.п}$. Пренебрегая размерами зерновки, выразим из второго уравнения системы (8) переменную t :

$$t = \frac{\Omega_n \cdot R \cdot \sin \alpha_g + \sqrt{(\Omega_n \cdot R \cdot \sin \alpha_g)^2 - 4 \cdot g / 2 \cdot (R \cdot \cos \alpha_g - y)}}{g}. \quad (13)$$

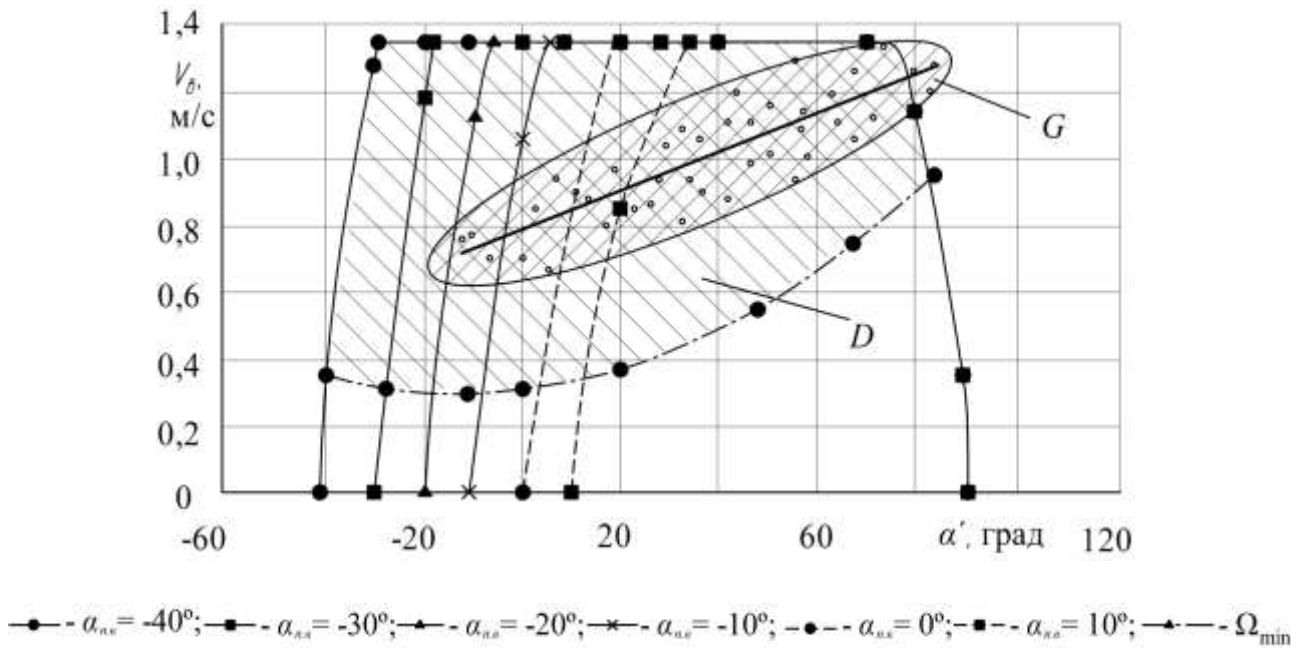


Рисунок 5 – Области теоретических и фактических скоростей зерновок:
D – область теоретических скоростей зерновок; *G* – область фактических скоростей зерновок

Решая уравнение (13), получаем время полёта зерновки t до момента касания с наружным решетом. Составляющие скорости зерновки будут изменяться, подчиняясь уравнениям системы:

$$\begin{cases} V_x = V_{\text{блх}} \cdot \cos \alpha_\theta \\ V_y = g \cdot t - V_{\text{блх}} \cdot \sin \alpha_\theta \end{cases} \quad (14)$$

Подставляем в (12) полученное значение t . Находим величину скорости зерновки в момент касания, V_κ зная что:

$$V_\kappa = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (15)$$

Как следует из рисунка 2:

$$V_t = V_\kappa \cdot \sin \gamma. \quad (16)$$

Причём

$$\gamma = \alpha_\kappa - \arctg \frac{V_x}{V_y}. \quad (17)$$

Зная V_t , определяем значение угловой скорости зерновки $\Omega_{\kappa,н}$ в момент её касания с поверхностью наружного решета:

$$\Omega_{к.н} = \frac{V_t}{R_n}. \quad (18)$$

Используя описанный выше алгоритм, были рассчитаны величины $\Omega_{к.н}$ при различных частотах вращения внутреннего цилиндра и построены графики, отражающие зависимость величины угловой скорости зерновки в момент её касания с внутренней поверхностью наружного решета $\Omega_{к.н}$. На рисунке 6 представлен график для частоты вращения $n_в = 50 \text{ мин}^{-1}$.

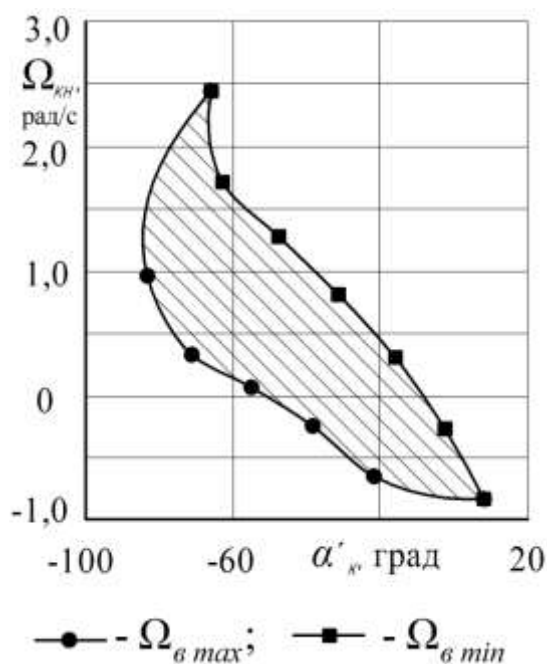


Рисунок 6 - Область угловой скорости зерновки в момент её касания с внутренней поверхностью наружного решета $\Omega_{к.н}$ при частоте вращения внутреннего цилиндра $n_в = 50 \text{ мин}^{-1}$

Как следует из этих графиков, максимальная площадь взаимодействия зерновок с поверхностью наружного решета достигается при частотах вращения внутреннего цилиндра $n_в = 50 \dots 60 \text{ мин}^{-1}$. Поэтому, в качестве оптимального будем считать именно данный диапазон частот вращения внутреннего решета.

Далее согласно описанной выше методике мы получаем области возможных скоростей выхода зерновок из отверстий наружного цилиндрического решета. На графике рисунка 7 представлена область возможных скоростей прохода зерновок сквозь отверстия наружного цилиндрического решета для частоты его вращения $n_n = 48 \text{ мин}^{-1}$.

Путём наложения графиков (рисунки 6 и 7) друг на друга, были найдены теоретически области оптимальных частот вращения внутреннего и наружного цилиндров исходя из максимальной площади совмещения заштрихованных областей графиков. Не смотря на то, что с увеличением частоты вращения наружного решета n_n уменьшается площадь совмещения заштрихованных областей,

большие частоты вращения наружного цилиндра n_n всё же являются более предпочтительными. Это объясняется следующим. Не смотря на то, что частица, попавшая на внутреннюю поверхность наружного цилиндра, не будет в момент касания иметь скорость, обеспечивающую её свободный проход, тем не менее, она достаточно быстро ускоряется и достигает скорости, при которой возможен её проход, за относительно малый угол поворота цилиндра $\Delta\alpha' = 3 \dots 5^\circ$. При этом, чем больше частота вращения решета, тем больше число циклов взаимодействия частицы и решета за одинаковый промежуток времени. Исходя из этих соображений, полагаем, что целесообразно считать оптимальными наибольшие частоты вращения наружного цилиндрического решета, а именно $n_n = 40 \dots 48 \text{ мин}^{-1}$.

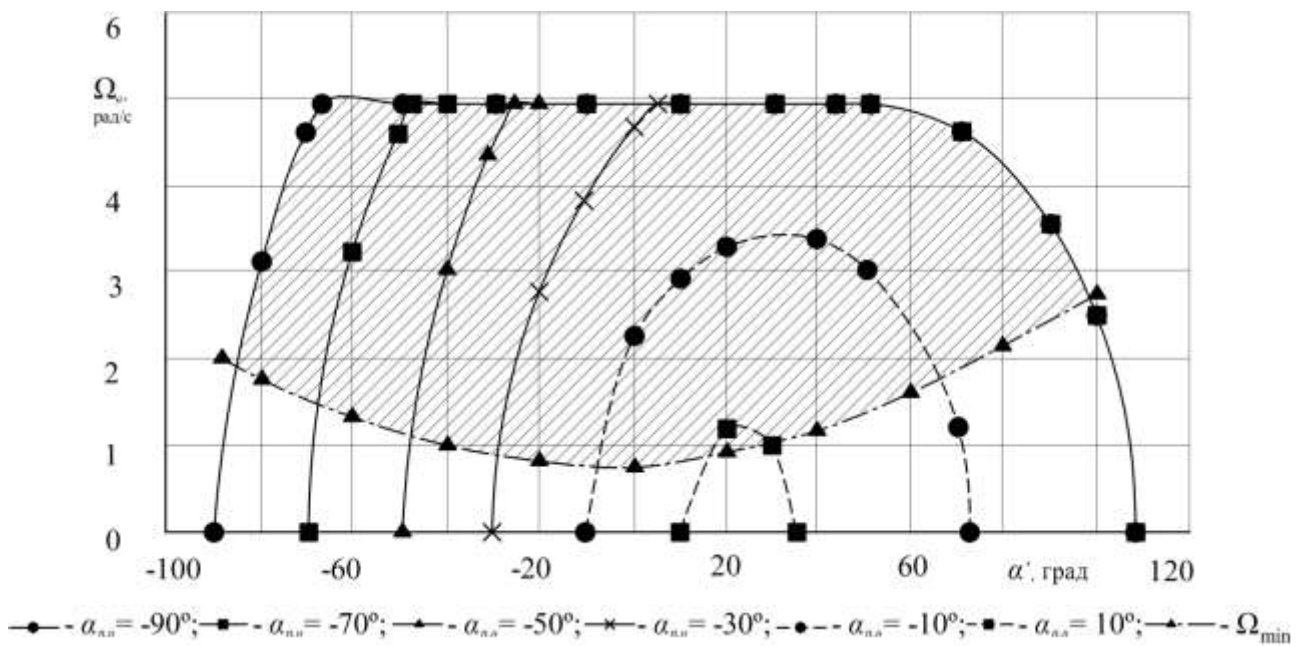
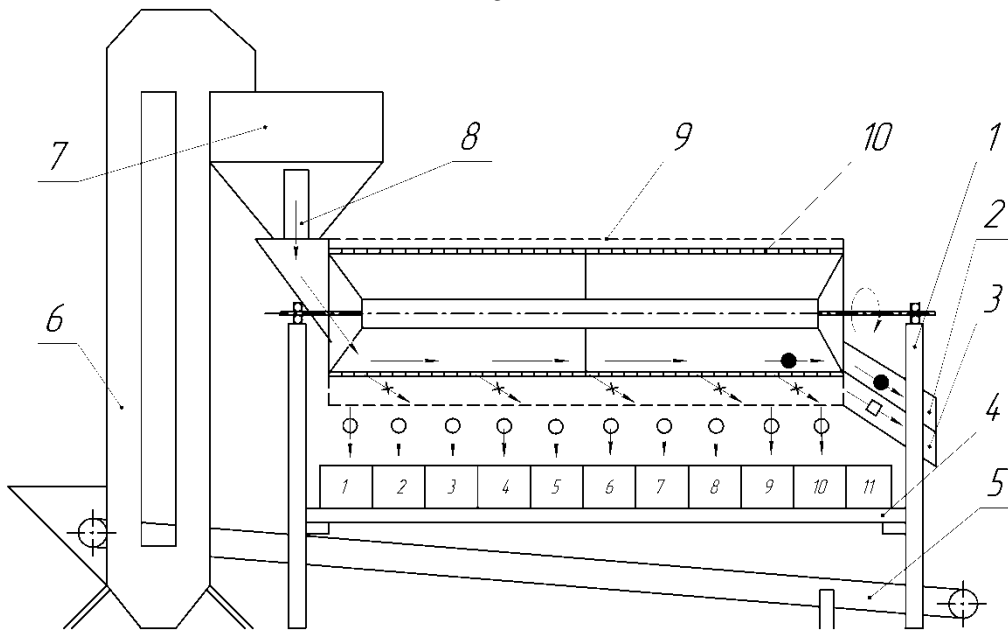


Рисунок 7 - Области возможных скоростей прохода зерновок сквозь отверстия наружного цилиндрического решета при частоте его вращения $n_n = 48 \text{ мин}^{-1}$

В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлены программа экспериментальных исследований, общепринятые и частные методики, описана экспериментальная установка, используемые приборы и оборудование. Исследования проводились на испытательном стенде (Рисунок 8).

Размеры цилиндров вращающихся решет были согласованы с размером существующих пробивных решёт, и составляют соответственно: внутреннее – диаметр 503 мм, длина 1980 мм, размер отверстий 3,8 мм; наружное – диаметр 755 мм, длина 1980 мм, размер отверстий 1,7 мм. Для проведения опытов использовали искусственно приготовленную зерновую смесь влажностью 14 %, состоящую из зерна пшеницы «Иргина» и примесей, полученных при предварительной её очистке на пункте послеуборочной обработки. Фракционный состав смеси в процентах представлен в таблице 1.



—> - очищаемый материал; —*> - проходная фракция внутреннего цилиндра (зерновой материал, очищенный от крупных примесей); —○> - мелкие примеси; —□> - очищенное зерно; —●> - крупные примеси

Рисунок 8 – Общий вид (а) и технологическая схема (б) стенда для испытания экспериментальной установки: 1 – рама; 2,3 – лотки; 4 – пробоотборник; 5 – ленточный транспортёр; 6 – нория; 7 – бункер-накопитель; 8 – регулировочная заслонка; 9 – наружное решето; 10 – внутреннее решето

Таблица 1 – Фракционный состав смеси

№ класса	Границы класса	Средний размер семян, мм	Частость
1	4,0...4,5	4,0	0,1150
2	4,0...3,5	3,5	0,0196
3	3,5...3,0	3,0	0,0791
4	3,0...2,5	2,5	0,5564
5	2,5...2,0	2,0	0,1623
6	2,0...1,5	1,5	0,0497
7	1,5...1,0	1,0	0,0089
8	1,0...0,5	0,5	0,0090

Рабочий процесс станда для испытания экспериментальной установки происходил следующим образом. Зерновая смесь из бункера-накопителя поступает на внутреннюю поверхность внутреннего решета 10, где происходит её разделение на две фракции: сходовую, представляющую собой крупные примеси не прошедшие сквозь отверстия решета и проходовую, представляющую собой зерновой материал, очищенный от крупных примесей.

Фракция крупных примесей попадает по лотку 2 на ленточный транспортёр, а проходовая - на внутреннюю поверхность наружного решета, где в свою очередь происходит её разделение на фракцию мелких примесей, прошедших сквозь отверстия внутреннего решета и фракцию очищенного зерна, идущего сходом. Все фракции в итоге попадают на ленточный транспортёр. При этом в процессе перемещения транспортером и норией компоненты зерновой смеси перемешиваются и возвращаются в бункер-накопитель. Затем цикл повторяется. Подача материала регулировалась с помощью заслонки 8 и принимала значения от 8 т/ч до 20 т/ч. В процессе исследования определялся характер распределения зернового материала по длине цилиндрического решета, для чего использовали пробоотборник 4 (Рисунок 8б), состоящий из десяти ящиков, равномерно распределенных по длине решета.

Одиннадцатый ящик был установлен для взятия проб фракции, идущей сходом с решета. Все ящики закреплялись на общей подвижной рамке. При исследовании характера распределения зёрен очищаемого материала по толщине изменялись такие факторы как частота n_g вращения цилиндрического решета и угол α_g наклона оси решета к горизонту. Частота вращения менялась с помощью вариатора и принимала значения $n_g = 30 \dots 60 \text{ мин}^{-1}$. Угол наклона изменялся через 1,5 градуса от 0° до $4,5^\circ$. При исследовании влияния подачи материала, параметров и режимов работы внутреннего цилиндрического решета на распределение прохода, потери полноценного зерна в отходы и энергопотребление на привод внутреннего цилиндра изменялись частота вращения n_g цилин-

дрического решета, подача материала Q и угол α_6 наклона оси решета к горизонту.

Обработку полученных в результате проведённых экспериментов данных проводили на персональном компьютере с использованием программ *Statgraphics Plus 5.1* и *Microsoft Excel*.

В четвертом разделе «Результаты экспериментальных исследований» были изучены закономерности влияния на характер распределения зёрен очищаемого материала по толщине таких параметров сепаратора как угол наклона оси вращения цилиндрического решета к горизонту α_6 , частота его вращения n_6 и подача материала Q , закономерности влияния перечисленных выше факторов на распределение прохода сквозь решето по длине цилиндра, а также влияние этих факторов на потери полноценного зерна в отходы и потребление энергии на привод внутреннего цилиндрического решета. В результате обработки полученных данных были построены графики в виде изолиний потерь полноценного зерна в отходы Π и изолиний энергопотребления на выполнение технологического процесса очистки зерна от крупных примесей \mathcal{E} в координатах «частота вращения – угол наклона». На рисунке 9 представлены графики для подач материала $Q = 14$ т/ч и $Q = 20$ т/ч.

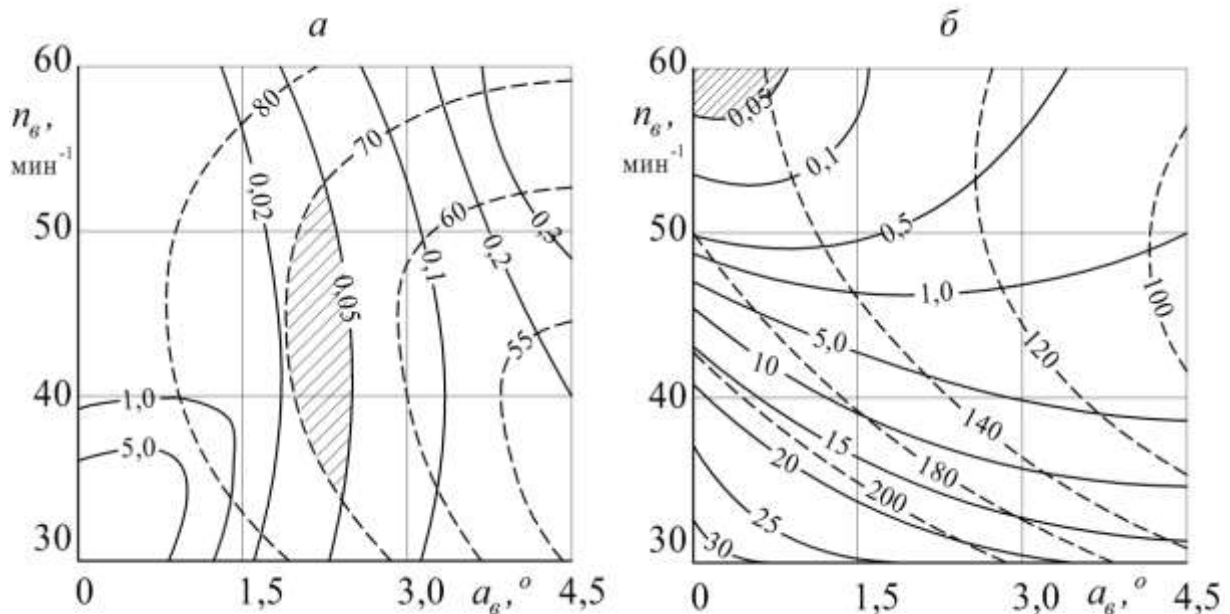


Рисунок 9 - Закономерности потерь полноценного зерна в отходы Π в зависимости от подачи материала Q , угла α_6 наклона оси решета и частоты вращения n_6 : a - при $Q = 14$ т/ч; b - при $Q = 20$ т/ч; ——— - изолинии потерь полноценного зерна в отходы Π , %; - - - - - изолинии энергопотребления \mathcal{E} , Вт

В результате анализа графиков, построенных для подач $Q = 8$ т/ч, $Q = 14$ т/ч и $Q = 20$ т/ч было принято компромиссное решение и выбраны следующие рабочие параметры для всех подач материала Q : частота вращения $n_6 = 50 \dots 60$ мин⁻¹, угол наклона $\alpha_6 = 0 \dots 2,0^\circ$.

Для проверки адекватности теоретической модели технологического процесса были экспериментально изучены закономерности движения зерновок после выхода из отверстий внутреннего решета. Исследование выполнялось фотографированием траекторий зерновок (рис. 10).



Рисунок 10 – Совмещение расчётных и экспериментальных траекторий

В ходе исследования зоны выпадения и характера движения семян, прошедших сквозь отверстия внутреннего цилиндрического решета, были получены фактические значения абсолютных скоростей выхода зерновок из отверстия V_A в зависимости от угла $\alpha_{вых}$ при различной частоте вращения цилиндра. Значения этих скоростей в виде области B были наложены на область A теоретических скоростей зерновок. Сравнивая расчётную A и фактическую B области скоростей, можно отметить, что область B практически вписывается в область A .

Исходя из этого, делаем вывод, что проведённые теоретические изыскания подтверждаются экспериментальными исследованиями и могут быть использованы при определении параметров зерновок, прошедших сквозь отверстия цилиндрического решета.

С целью изучения совместного влияния на работу сепаратора таких факторов как частота вращения внутреннего цилиндра $n_в$, частота вращения наружного цилиндра $n_н$, угол наклона оси вращения наружного цилиндра $\alpha_н$, а также для нахождения оптимальных сочетаний факторов, был реализован план эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для этих трёх факторов при трёх значениях подачи обрабатываемого материала Q . В качестве критериев оптимизации были выбраны значение полноты E выделения мелких примесей и величина энергопотребления \mathcal{E} наружного решета. Экспериментальные исследо-

вания проводили при постоянном значении угла $\alpha_6 = 1^\circ$ наклона оси вращения внутреннего решета. Получены адекватные модели регрессии.

Для $Q = 8$ т/ч:

$$E = -388,65 + 33,33\alpha_n + 8,33n_n + 6,0n_6 - 2,85\alpha_n^2 - 0,25\alpha_n n_n - 0,07n_n^2 - 0,04n_6^2, \% ; \quad (19)$$

$$\mathcal{E} = 3140,02 - 96,88\alpha_n - 86,22n_n - 21,61n_6 + 1,06\alpha_n n_n + 0,88n_n^2 + 0,18n_6^2, \text{Вт} . \quad (20)$$

Для $Q = 14$ т/ч:

$$E = -516,28 + 33,1833\alpha_n + 12,88n_n + 5,93n_6 - 2,94\alpha_n^2 - 0,23\alpha_n n_n - 0,12n_n^2 - 0,04n_6^2, \% ; \quad (21)$$

$$\mathcal{E} = 1506,11 - 67,875\alpha_n - 39,065n_n + 0,46n_n^2, \text{Вт} . \quad (22)$$

Для $Q = 20$ т/ч:

$$E = -514,12 + 22,61\alpha_n + 12,67n_n + 5,765n_6 - 1,81\alpha_n^2 - 0,18\alpha_n n_n - 0,11n_n^2 - 0,04n_6^2, \% ; \quad (23)$$

$$\mathcal{E} = 748,4 - 187,875\alpha_n + 12,2813n_n, \text{Вт} . \quad (24)$$

Анализ математических моделей проводили с помощью наложения двумерных сечений поверхностей отклика. На рисунке 11 представлены двумерные сечения поверхностей отклика для $Q = 14$ т/ч.

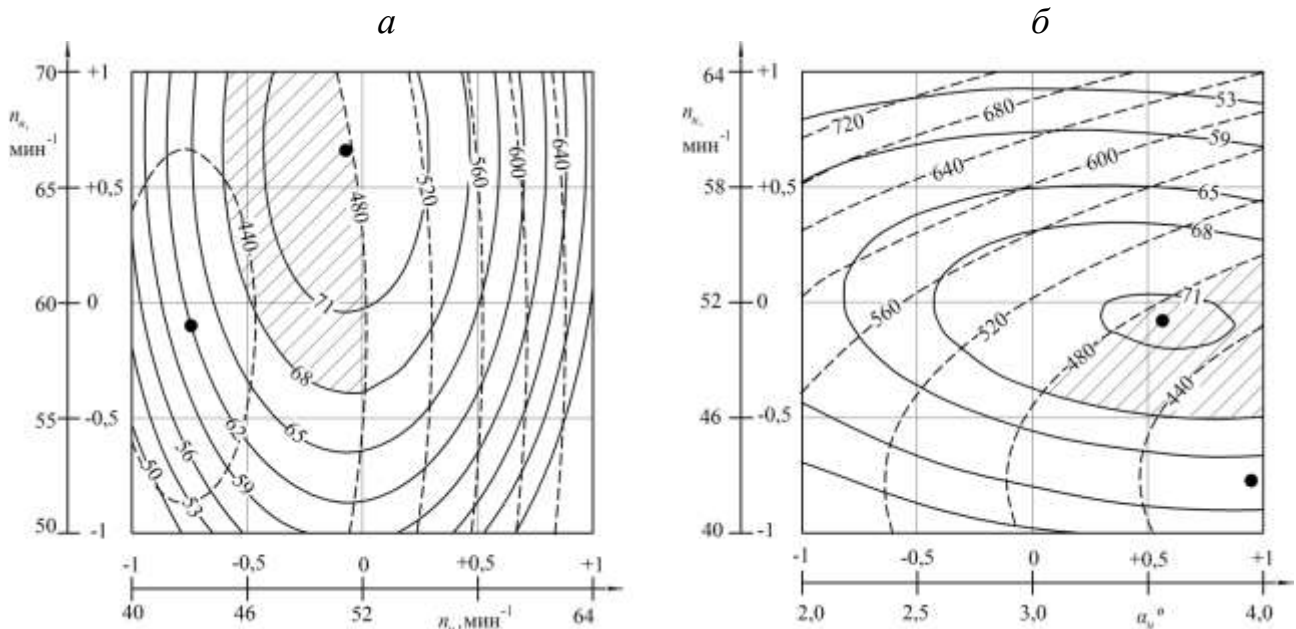


Рисунок 11 - Двумерные сечения поверхностей отклика, характеризующие полноту выделения мелких примесей E , % (—) и величину энергопотребления \mathcal{E} , Вт (---): a – при $\alpha_n = 3,6^\circ$; b – при $n_6 = 60$ мин⁻¹

На основании проведенного анализа моделей определены рациональные значения изучаемых факторов в исследованном диапазоне подачи материала Q : $\alpha_n=3 \dots 4^\circ$; $n_n=50 \dots 53 \text{ мин}^{-1}$; $n_e=50 \dots 60 \text{ мин}^{-1}$.

Исследования влияния влажности W обрабатываемого материала на величину коэффициента E полноты выделения мелких примесей и величину потребления энергии \mathcal{E} проводились при различной подаче обрабатываемого материала $Q = 8 \dots 20 \text{ т/ч}$ и фиксированных значениях параметров работы сепаратора, определённых в качестве оптимальных в предыдущих исследованиях. После обработки результатов опытов были получены зависимости полноты выделения E и величины \mathcal{E} от влажности W для различных величин подачи обрабатываемого материала Q . Исследованиями установлено, что при подачах $Q = 8 \dots 20 \text{ т/ч}$ зернового материала увеличение влажности W от 15% до 35% не приводит к снижению полноты выделения примесей. При этом потребление энергии возрастает в 1,19 ... 1,36 раза.

В пятом разделе. «Результаты испытания экспериментального образца сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётками» приведены результаты производственных испытаний опытного образца сепаратора зернового материала в отделении «Русское» ЗАО «Агрофирмы «Дороничи» г. Кирова.

В уборочном сезоне 2011 года решётным сепаратором зернового материала в режиме предварительной очистки было обработано: пшеницы «Тризо» влажностью 16...24% и засорённостью до 11% в количестве 87 тонн; ячменя «Нур» влажностью 25...33% и засорённостью до 15% в количестве 137 тонн. При пропускной способности 20 т/ч и потерях полноценного зерна в отходы не более 0,05% полнота выделения примесей в режиме предварительной очистки составила: пшеница «Тризо» - 51,2 ... 52,8%; ячмень «Нур» - 50,8 ... 52,5 %. При этом величина мгновенной потребляемой мощности составила 2,2 ... 2,5 кВт. В режиме первичной очистки при влажности 12 ... 15% обработано: ячменя «Нур» засорённостью до 7% - 93 тонны; овса «Кречет» засорённостью до 8% - 79 тонн. При пропускной способности 14 т/ч и потерях полноценного зерна в отходы не более 0,5% полнота выделения примесей равнялась: ячмень «Нур» - 70,2 ... 73,8%, овёс «Кречет» - 67,3 ... 69,9%. При этом величина мгновенной потребляемой мощности составила 1,6 ... 2,0 кВт.

Таким образом, проведённые производственные испытания показывают, что качество работы сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётками удовлетворяет агротехническим требованиям, предъявляемым к машинам предварительной и первичной очистки зернового материала.

Годовой экономический эффект от применения сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётками составил 36140 рублей, а срок окупаемости 3,6 года, что обеспечивается более низкой базовой стоимостью, а также меньшим энергопотреблением в сравнении с машиной ОЗМ-20.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана конструктивно-технологическая схема сепаратора зернового материала с двумя цилиндрическими решётами, расположенными одно в другом со смещением осей и вращающимися в противоположные стороны (патент на полезную модель RU 86502 U1).

2. Теоретическими исследованиями обоснована математическая модель движения зернового материала в сепараторе, позволяющая оптимизировать режимы совместной работы внутреннего и наружного цилиндрических решёт. Предложенная модель согласуется с результатами экспериментальных исследований.

3. На основании результатов экспериментальных исследований установлены рациональные значения параметров и режимов работы сепаратора: для внутреннего решета диаметром $d_в = 505$ мм частота вращения $n_в = 50 \dots 60$ мин⁻¹, угол наклона $\alpha_в = 0 \dots 2^\circ$; для наружного решета диаметром $d_н = 755$ мм частота вращения $n_н = 50 \dots 53$ мин⁻¹, угол наклона $\alpha_н = 3 \dots 4^\circ$.

4 По результатам экспериментальных исследований получены модели регрессии полноты E выделения примесей и энергопотребления \mathcal{E} от влажности W зернового материала. Установлено, что при подачах $Q = 8 \dots 20$ т/ч зернового материала увеличение влажности W от 15% до 35% не приводит к снижению полноты выделения примесей. При этом потребление энергии возрастает в 1,19 ... 1,36 раза.

5. Проведены производственные испытания опытного образца сепаратора зернового материала. При пропускной способности $Q = 20$ т/ч и потерях $П$ полноценного зерна в отходы не более 0,05% полнота выделения примесей в режиме предварительной очистки составила: пшеница «Тризо» – 51,2 ... 52,8%; ячмень «Нур» – 50,8 ... 52,5 %. При этом величина потребляемой мощности составила 2,2 ... 2,5 кВт.

В режиме первичной очистки при пропускной способности 14 т/ч и потерях полноценного зерна в отходы не более 0,5% полнота выделения примесей равнялась: ячмень «Нур» – 70,2 ... 73,8%, овёс «Кречет» – 67,3 ... 69,9%. При этом величина потребляемой мощности составила 1,6 ... 2,0 кВт.

6 Расчётный экономический эффект от применения сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами составил 5,56 руб/т, что при приведении к годовой нормативной нагрузке зерноочистительного пункта составит 36140 рублей в год, а срок окупаемости составит 3,6 года.

По результатам производственных исследований установлено, что применение сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами позволяет повысить уровень интенсификации производства продукции по сравнению с машиной ОЗМ-20 на 34%.

Перспективы дальнейшей разработки темы. При дальнейших исследованиях планируется определить параметры сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами при подачах $Q = 30$ т/ч и 50 т/ч в режиме предварительной очистки. Также планируется провести исследования параметров и режимов работы сепаратора при очистке семян рапса и дать рекомендации по

использованию сепаратора зернового материала с цилиндрическими решётами при очистке этой культуры.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, входящих в «Перечень ВАК Минобразования и науки РФ»:

1. Жолобов, Н.В. Согласование работы цилиндрических решет сепаратора зерна / Н.В. Жолобов, В.Г. Фарафонов, А.В. Якимов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2012. - № 9. - С. 34-36.

2. Жолобов, Н.В. Исследование рабочего процесса сепаратора зерна с цилиндрическими решетками / Н.В. Жолобов, А.В. Якимов // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - № 12. - С. 22-26.

Статьи:

3. Якимов, А.В. Анализ сепараторов зернового материала с цилиндрическими решетками / Науке нового века – знания молодых: Сборник статей 8-й научной конференции аспирантов и соискателей: в 2 ч. – Киров: Вятская ГСХА, 2008.- Ч. 2- С.95 – 98.

4. Жолобов, Н.В. Исследование работы цилиндрического решета / Н.В. Жолобов, А.В. Якимов // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики / Материалы международной научно-практической конференции: Сб. научных трудов.- Киров: Вятская ГСХА, 2009.- Вып. 9.- С. 118-123.

5. Жолобов, Н.В. Траектории движения зернового материала при выходе из цилиндрического решета / Н.В. Жолобов, А.В. Якимов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения. Вып. XI. / Материалы международной научно-практической конференции.- Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2009. Кн.2.- С. 193-195.

6. Жолобов, Н.В. Определение параметров траекторий зерновок при работе цилиндрического решета / Н.В. Жолобов, А.В. Якимов // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики / Материалы III международной научно-практической конференции: Сб. научных трудов.- Киров: Вятская ГСХА, 2011.- Вып. 12.- С. 35-39.

7. Жолобов, Н.В. Исследование характера распределения зерен, очищаемых на цилиндрическом решете по толщине / Н.В. Жолобов, А.В. Якимов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения. Материалы международной научно-практической конференции. Вып. XIII / Мар. гос. ун-т . - Йошкар-Ола, 2011. – С. 206-208.

8. Жолобов, Н.В. Определение параметров зерновок при работе цилиндрического решета / Н.В. Жолобов, А.В. Якимов // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики / Материалы V междуна-

родной научно-практической конференции: Сб. научных трудов.- Киров: Вятская ГСХА, 2012.- Вып. 13.- С. 39-43.

9. Жолобов, Н.В. Определение характера движения зерновки, находящейся на внутренней поверхности вращающегося цилиндрического решета / Н.В. Жолобов, В.Г. Фарафонов, А.В. Якимов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения. Материалы международной научно-практической конференции. Вып. XIV / Мар. гос. ун-т. - Йошкар-Ола, 2012. – С. 175-179.

Патенты на изобретения и полезные модели:

10. Пат. № 86502, МПК А01F12/44, В07В1/22. Сепаратор зернового вороха / Н.В. Жолобов, А.В. Якимов, К.В. Маишев; № 2008110266/22; заявл. 17.03.2008; опубл. 10.09.2009.

Заказ № 66. Подписано к печати 15.02.2017 г.

Тираж 90 экз. Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная. Усл. п.л. 1,0

ФГБОУ ВО Вятская ГСХА

610017 г. Киров, Октябрьский пр-т, 133

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО Вятская ГСХА