

На правах рукописи



СОРОЧЕНКО СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ

**МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО
КОМБАЙНА ДЛЯ РАБОТЫ НА СКЛОНАХ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Барнаул - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научные консультанты:

Семёнов Владимир Филимонович,

доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки и техники РФ;

Ситников Александр Андреевич,

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Патрин Василий Александрович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», профессор кафедры техносферной безопасности и электротехнологий;

Сабиев Уахит Калижанович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина», профессор кафедры «Агроинженерия»;

Шенелёв Сергей Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», проректор по учебной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Защита диссертации состоится 17 мая 2018 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, тел/факс +7 (3852) 36-71-29, официальный сайт: <http://www.altstu.ru>; электронный адрес: epb_401@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и на сайте <https://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya-Sorochenko.pdf>.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Куликова Лидия Васильев-

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Российская Федерация является крупнейшим производителем зерна. В соответствии с Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 гг., валовой сбор зерновых и зернобобовых в хозяйствах всех категорий должен достичь 115 млн. т (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г., №717 – в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2014 г., №1421).

Основным способом уборки зерновых культур является комбайновый, в котором главная роль принадлежит зерноуборочному комбайну. При уборке зерновых культур на полях с уклоном более 5° производительность зерноуборочного комбайна снижается, причём лимитирующим рабочим органом, ограничивающим производительность комбайна, является система очистки, на которую приходится более 60 % от всех потерь зерна. Не принимая во внимание зарубежную уборочную технику, уборку зерновых культур на склонах выполняют комбайнами, предназначенными для работы на полях с уклоном не более 2°. Однако только в Алтайском крае, по данным Управления (Министерства) сельского хозяйства Алтайского края, из 3,8 млн. га, на которых возделываются зерновые культуры, третья часть пашни имеет уклон, а в СНГ – более 16 млн. га. В соответствии со Стратегией развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года, утверждённой Распоряжением Правительства Российской Федерации от 7 июля 2017 года, №1455-р, в область распространения которой входят зерноуборочные комбайны, необходимо создавать современную конкурентоспособную высокотехнологическую технику российского производства. Диссертационная работа направлена на разработку технологий и технических средств сепарации зернового вороха в системе очистки комбайна, предназначенного для работы на склонах.

Тема диссертации и выполненные исследования соответствуют:

- Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года (утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 7 июля 2017 г., №1455-р);

- Государственной программе Алтайского края «Развитие сельского хозяйства Алтайского края» на 2013-2020 годы, подпрограмме «Техническая и технологическая модернизация, инновационное развитие агропромышленного комплекса» (в редакции постановления Администрации края от 5 октября 2012 г., №523).

- межвузовской региональной научно-технической программе «Алтай», № ГР 01960001352 (ВНТИЦ);

- тематическому плану НИОКР ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» «Совершенствование машин для посева, уборки и послеуборочной обработки зерновых культур».

Степень разработанности темы исследования

Обоснованию пропускной способности и производительности зерноуборочных комбайнов, совершенствованию, разработке новых конструкций и обоснованию параметров системы очистки и сепараторов зернового вороха посвящены работы С.А. Алфёрова, В.Е. Бердышева, Э.В. Жалнина, Н.И. Косилова, С.Г. Ломакина, В.И. Машанова, В.А. Патрина, Ю.А. Пескова, А.И. Русанова, А.И. Ряднова, В.Ф. Семёнова, С.В. Тронева, Ю.А. Царева, Г.Е. Чепурина, С.Д. Шепелёва и многих других учёных.

Изучению вопросов, связанных с движением зернового вороха по колеблющейся поверхности, посвящены работы С.А. Алфёрова, М.И. Белова, Б.А. Берга, П.М. Василенко, С.Н. Васильева, В.А. Дрюка, И.И. Канеева, П.Н. Лапшина, И.П. Лапшина, М.Н. Летошнев, В.А. Патрина, Д.Н. Пирожкова, В.Н. Романенко, У.К. Сабиева, В.И. Славкина, Г.Д. Терскова, И.Я. Федоренко, Л.В. Шабановой и других учёных.

Сепарация зернового вороха отражена в работах М.Н. Летошнев, И.Ф. Василенко, С.А. Алфёрова, С.М. Барашева, М.И. Белова, Д.А. Блинова, П.Н. Гришкевича, М.Р. Думанского, Э.В. Жалнина, В.И. Зубкова, Н.И. Косилова, Г.А. Кузина, В.Н. Романенко, А.И. Русанова, В.И. Оробинского, Н.А. Смирнова, М.А. Ульяновко, Л.В. Шабановой, М.И. Эйгера и других учёных.

Исследованию технологических процессов в системе очистки зерноуборочного комбайна при наличии крена молотилки, обоснованию схемы и параметров системы очистки для указанных условий посвящены работы В.Е. Бердышева, А.В. Белинского, В.А. Дрюка, Э.В. Жалнина, Н.И. Косилова, С.Г. Ломакина, В.П. Лугового, В.Ф. Семёнова, Д.И. Уркинбаева и других учёных.

Указанные учёные внесли большой вклад в теорию и практику создания зерноуборочного комбайна. Однако вопросы функционирования системы очистки при уборке зерновых культур на склонах изучены недостаточно полно. В частности, требует дальнейшего изучения поведение зернового вороха на верхнем решете системы очистки, сепарация зернового вороха в условиях работы комбайна на склонах. Нет методики оценки новых конструктивно-технологических решений системы очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах.

Целью работы является повышение эффективности работы зерноуборочных комбайнов на склонах путём обоснования технологических и конструктивных решений системы очистки, направленных на снижение потерь зерна.

Объект исследования – сепарация зернового вороха в системе очистки зерноуборочного комбайна в условиях работы на склонах.

Предмет исследования – закономерности технологических процессов, технологические схемы, конструктивные решения, параметры системы очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах.

Задачи исследования:

1. Выявить и исследовать закономерности поведения зернового вороха на верхнем решете системы очистки в условиях работы комбайна на склонах.

2. Разработать математическую модель сепарации зернового вороха и методику оценки неравномерности его распределения на верхнем решете в условиях работы комбайна на склонах.

3. Обосновать технологические и конструктивные решения и параметры системы очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах.

4. Экспериментально определить качественные показатели функционирования разработанных систем очистки зерноуборочного комбайна, подтвердить полученные теоретические зависимости.

5. Определить технико-экономическую эффективность разработанных конструктивно-технологических решений системы очистки.

Научную новизну представляют:

- теоретические положения поведения зернового вороха на верхнем решете системы очистки в условиях работы комбайна на склонах;

- математическая модель сепарации зернового вороха в системе очистки и методика оценки неравномерности его распределения на верхнем решете в условиях работы комбайна на склонах;

- технологические решения сепарации и распределения зернового вороха и конструктивные решения системы очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах: предварительная сепарация, снижение неравномерности распределения в начале верхнего решета с последующей стабилизацией распределения на верхнем решете, реализованные в конструкциях решётно-винтового сепаратора, двухсекционного и самоустанавливающегося решёт; выравнивание толщины слоя на верхнем решете или в передней части верхнего решета с последующей стабилизацией распределения на верхнем решете, реализованные в конструкциях системы очистки с инерционными выравнивателями зернового вороха;

- результаты экспериментальных исследований разработанных технологических и конструктивных решений системы очистки для работы комбайна на склонах.

Новизна разработанных конструктивно-технологических решений подтверждена охранными документами: а.с. №1701165 СССР, патентами РФ №№2002401, 2038739, 2058710, 2073411, 2095965, 2101909, 2134503, 2137349, 2177683, 2195804, 2275787, 2343686, патентом на полезную модель №111964. Методика оценки неравномерности распределения зернового вороха на верхнем решете реализована в программе для ЭВМ, гос. регистрация №2015610315.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные математические модели движения зернового вороха по поверхности верхнего решета и программы для ЭВМ для их реализации позволяют оценить влияние параметров системы очистки на поведение зернового вороха на решете, определить рациональные значения параметров в условиях работы комбайна на склонах. Математическая модель сепарации зернового вороха на верхнем решете системы очистки в условиях работы комбайна на склонах, включающая переменный по длине решета дискретный коэффициент вариации толщины слоя зернового вороха, методика определения коэффициента вариации и разработанные программы для ЭВМ позволяют выполнить сравнительный анализ конструктивно-технологических решений системы очистки. Практическую значимость имеют разработанные конструктивно-технологические решения системы очистки, повышающие эффективность работы зерноуборочного комбайна на склонах, их параметры и результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Методология и методы исследования

В теоретических исследованиях применены положения классической механики, математического моделирования, численные методы математического анализа, вычислительные эксперименты. Экспериментальные исследования выполнены с применением методов планирования эксперимента, математической статистики обработки полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретические положения поведения зернового вороха на верхнем решете системы очистки в условиях работы комбайна на склонах;

- математическая модель сепарации зернового вороха в системе очистки и методика оценки неравномерности его распределения на верхнем решете в условиях работы комбайна на склонах;

- технологические решения сепарации и распределения зернового вороха и конструктивные решения системы очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах: предварительная сепарация, снижение неравномерности распределения в начале верхнего решета с последующей стабилизацией распределения на верхнем решете, реализованные в конструкциях решётно-винтового сепаратора, двухсекционного и самоустанавливающегося решёт; выравнивание толщины слоя на верхнем решете или в передней части верхнего решета с последующей стабилизацией распределения на верхнем решете, реализованные в конструкциях системы очистки с инерционными выравнивателями зернового вороха;

- результаты сравнительных экспериментальных исследований и технико-экономической оценки разработанных конструктивно-технологических решений системы очистки.

Достоверность результатов проведённых исследований обеспечивалась применением современных методов сбора и обработки информации, современных программных средств. Достоверность подтверждена сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, проведённых в лабораторных и полевых условиях, соответствием полученных результатов с результатами, представленными в независимых источниках.

Реализация результатов исследования. Результаты исследования приняты ООО «КЗ «Ростсельмаш» (г. Ростов-на-Дону) с целью использования на предприятии при разработке системы очистки зерноуборочных комбайнов для работы на склонах; конструкторская документация проекта «Адаптер системы очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах» (патент РФ на полезную модель №111964 и патенты на изобретение РФ №2275787, 2343686) принята АО «Алтайский завод сельскохозяйственного машиностроения» для изготовления опытной партии; заключен лицензионный договор 10.08.2010 г. с ООО «Малое инновационное предприятие сельскохозяйственного машиностроения АлтГТУ» о предоставлении права использования изобретения по патенту РФ №2343686 сроком на 10 лет; используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Апробация результатов исследований. Основные положения работы доложены на международных научно-технических конференциях: «Проблемы автоматизации и технологии в машиностроении» (г. Рубцовск, 1994), «Совершенствование рабочих органов сельхозмашин и агрегатов» (г. Барнаул, 1994 г.), «Вузовская наука на международном рынке научно-технической продукции» (г. Барнаул, 1995 г.); на всероссийской конференции «Продукция предприятий Алтайского края для АПК России» (г. Барнаул, 2003 г.); на научно-техническом семинаре «Проблемы и тенденции развития отечественного комбайностроения» (г. Ростов-на-Дону, 2005 г.); на ежегодных научно-технических конференциях ППС АлтГТУ (г. Барнаул, 1994-2014 гг.); на 5-й Юбилейной Международной научно-технической конференции «ИТНО-2017» (пос. Дивноморское, 2017 г.); на заседании НТС СКБ ОАО «Красноярский завод комбайнов» (г. Красноярск, 1996г.), на совещании Технического центра ООО «Комбайновый завод Ростсельмаш» (г. Ростов-на-Дону, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 56 работ, в том числе – 11 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК; получены 1 авторское свидетельство и 12 патентов на изобретения, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 258 наименований, в том числе 20 на иностранном языке. Общий объем работы составляет 325 страниц. Работа содержит 21 таблицу, 102 рисунка и 11 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, показана степень разработанности темы исследования, связь исследований с государственными программами, сформулирована цель исследования, определены объект, предмет и методы исследования, научная и практическая значимость исследования, методология и методы исследования, степень достоверности и апробация результатов, положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Современное состояние проблемы уборки зерновых культур на склонах» выполнен анализ и систематизированы схемные решения систем очистки зерноуборочных комбайнов, применяемых в нашей стране и за рубежом. Установлено, что с точки зрения эрозионной безопасности зерновые культуры целесообразно возделывать на склонах менее 10° . Уборка зерновых культур на склонах зерноуборочными комбайнами равнинного исполнения сопровождается повышенным уровнем потерь зерна, причём основная доля потерь приходится на систему очистки за счёт увеличения неравномерности распределения зернового вороха на верхнем решете при поперечном крене молотилки. Снижение потерь зерна до допустимого уровня приводит к уменьшению производительности зерноуборочного комбайна. Крутосклонные модификации комбайнов, имеющие устройства для выравнивания всей молотилки относительно горизонта, рентабельны при уборке зерновых культур на склонах более 10° . Так как по склоновой доступности равнинные комбайны могут работать на склонах до 10° , то повышение эффективности работы зерноуборочного комбайна на склонах целесообразно осуществить совершенствованием системы очистки.

Выполнен анализ известных математических моделей, описывающих поведение зернового вороха на верхнем решете системы очистки. На основании проведённого анализа работ и поставленной цели исследования сформулированы задачи исследования.

Во второй главе «Математические модели поведения зернового вороха на верхнем решете системы очистки в условиях работы комбайна на склонах» разработаны математические модели движения зернового вороха и его компонентов (зерна и соломистых частиц) по жалюзийному решету при продольном и поперечном наклонах молотилки.

Рассмотрены закономерности движения компонентов зернового вороха по лестку жалюзи решета и движения зернового вороха по поверхности жалюзийного решета. В первом случае компонент зернового вороха представлен в виде частицы, а сила сопротивления движению – сила трения. Во втором случае рассмотрено движение элемента, наделённого комплексом физико-механических свойств зернового вороха, с введением приведённого коэффициентов трения и приведённого коэффициента парусности зернового вороха.

Движение зернового вороха рассмотрено при допущении, что решето совершает гармонические колебания, а его кинематика одинакова по всей длине. Решето, совершающее колебания, движется в воздушном потоке, скорость которого постоянная.

Поэтому скорость воздушного потока, обдувающего решето, зависит от скорости движения решета, и сила воздействия воздушного потока на частицу также зависит от колебаний решета.

Введем подвижную систему координат XYZ , связанную с поверхностью: ось X направлена вдоль поверхности; ось Y – в поперечном направлении, противоположном уклону; ось Z – перпендикулярно поверхности; плоскость XOY – рассматриваемая поверхность (рисунок 1). На частицу, находящуюся на плоскости XOY , действуют следующие силы: $G = m \cdot g$ – сила тяжести (здесь m – масса частицы; g – ускорение свободного падения); $R_B = m \cdot k_{\Pi} \cdot U_0^2$ – сила воздействия воздушного потока (здесь k_{Π} – коэффициент парусности частицы; U_0 – относительная скорость частицы в воздушном потоке); R_{BY} – сила сопротивления воздушного потока при движении частицы в поперечном направлении; N – нормальная реакция поверхности; F – сила трения (сопротивления) при движении частицы по рассматриваемой поверхности; $P_{\text{ИН}} = m \times \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega \cdot t)$ – сила инерции частицы от продольных колебаний решета (здесь r – радиус кривошипа; ω – циклическая частота колебаний; t – время). Векторы сил \bar{R}_B и $\bar{P}_{\text{ИН}}$ находятся в плоскости XOZ . Отклонение вектора скорости частицы \bar{V}_B от продольного направления (оси X) определяется углом $\varepsilon = \arctg(\dot{y}/\dot{x})$ (здесь \dot{y}, \dot{x} – проекции скорости частицы на оси Y и X соответственно).

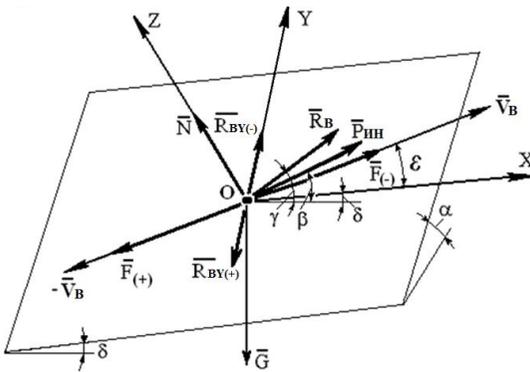


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на частицу, находящуюся на рассматриваемой поверхности

Обозначение углов: δ, α – соответственно угол продольного и поперечного наклона плоскости XOY относительно горизонта; β – угол направления колебаний решета относительно горизонта; γ – угол наклона воздушного потока относительно горизонта. При наклоне решета вместе с молотилкой комбайна в поперечном направлении на угол α появляется составляющая от силы тяжести, направленная в отрицательном направлении оси Y .

Дифференциальные уравнения движения частицы (или элемента) имеют следующий вид (верхние знаки - при движении частицы (или элемента) в положительном направлении осей):

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{\text{ИН}} \cdot \cos(\beta - \delta) + R_B \cdot \cos(\gamma - \delta) \mp F \cdot \cos\varepsilon - G \cdot \cos\alpha \cdot \sin\delta \\ m\ddot{y} = \mp F \cdot \sin\varepsilon \mp R_{BY} - G \cdot \sin\alpha \cdot \cos\delta \\ m\ddot{z} = N + P_{\text{ИН}} \cdot \sin(\beta - \delta) + R_B \cdot \sin(\gamma - \delta) - G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\delta. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) описывает движение частицы по лепестку жалюзи и элемента зернового вороха по поверхности жалюзийного решета.

Движение частицы по лепестку жалюзи. В этом случае угол δ определяет наклон лепестка относительно горизонта, сила трения частицы по поверхности решета $F = f \cdot N$ (здесь f – коэффициент трения частицы по поверхности жалюзи), воздушный поток направлен вдоль лепестка жалюзи ($\gamma = \delta$), а скорость частицы относительно воздушного потока зависит от скорости воздушного потока, скорости решета и скорости частицы по лепестку

$$U_0 = U - \dot{\xi} \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x} = U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x}. \quad (2)$$

Угол наклона лепестка относительно горизонта зависит от угла открытия жалюзи δ_J , угла наклона решета δ_r относительно молотилки комбайна, а при работе комбайна на склонах – также от угла продольного наклона молотилки комбайна δ_K . При движении комбайна вниз по склону $\delta = \delta_J + \delta_r + \delta_K$; вверх по склону – $\delta = \delta_J + \delta_r - \delta_K$. Продольный наклон молотилки комбайна также оказывает влияние на значение угла β , причём при отсутствии продольного наклона комбайна $\beta = \beta_0$ (здесь β_0 – угол направления колебаний решета относительно молотилки). При движении зерноуборочного комбайна вниз по склону $\beta = \beta_0 + \delta_K$, при движении вверх по склону $\beta = \beta_0 - \delta_K$.

Установлено, что частица, находящаяся на лепестке жалюзи, может скользить по лепестку в положительном (интервал 1+), отрицательном (1-) направлениях оси X или находиться в состоянии покоя (1п). Сила R_{By} не оказывает существенного влияния на параметры движения частицы, поэтому её можно не учитывать.

При движении частицы по лепестку жалюзи система уравнений (1) имеет следующий вид (верхние знаки - при движении частицы в положительном направлении осей X и Y):

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\beta - \delta) + k_{II} \cdot [U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x}]^2 \mp \\ \mp f \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos(\arctg \frac{\dot{y}}{x}) - g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ \ddot{y} = \mp f \cdot \frac{N}{m} \cdot \sin(\arctg \frac{\dot{y}}{x}) - g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\beta - \delta) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (3)$$

Начальные условия движения частицы ($\dot{x} = 0$, $x = 0$, $\dot{y} = 0$, $y = 0$): движение частицы в положительном направлении оси X начинается при $\varphi = \varphi_{H+}$, $t_1 = \varphi_{H+} / \omega$; в отрицательном – при $\varphi = \varphi_{H-}$, $t_2 = \varphi_{H-} / \omega$.

Движение компонентов зернового вороха по лепестку жалюзи целесообразно рассматривать за один период колебаний решета T_p , а среднюю скорость движения частицы в продольном V_{XCP} и поперечном V_{YCP} направлениях рассчитывать как среднее значение скоростей при начале движения частицы в положительном и отрицательном направлениях оси X:

$$V_{XCP} = \frac{X_{(+)} + X_{(-)}}{2 \cdot T_p}, \quad V_{YCP} = \frac{Y_{(+)} + Y_{(-)}}{2 \cdot T_p}, \quad (4)$$

где $X_{(+)}$, $X_{(-)}$, $Y_{(+)}$, $Y_{(-)}$ – проекции перемещения частицы на ось X и Y за один период колебаний решета при начале движения частицы в положительном и отрицательном направлениях оси X соответственно.

С использованием программы для ЭВМ «Движение компонентов зернового вороха по жалюзи решета», разработанной в среде Mathcad, определены средние скорости перемещения частицы по лепестку жалюзи за один период колебаний решета. Применение формулы (2) для определения относительной скорости частицы в воздушном потоке повышает точность вычислений от 12,0 до 20,6 %. Результаты расчёта скорости частицы при движении комбайна вверх и вниз по склону представлены на рисунке 2.

При движении комбайна вниз по склону условия прохода зерна сквозь решето улучшаются. Несмотря на то, что с увеличением угла продольного наклона молотилки средняя скорость сбойны снижается, однако её значение даже при угле наклона 10° достаточно велико. Таким образом, движение комбайна вниз по склону незначительно влияет на сепарацию зернового вороха на решете.

При движении комбайна вверх по склону условия прохода зерна сквозь решето значительно ухудшаются. При продольном наклоне молотилки 11° средняя скорость зерна по лепестку равна нулю, что означает возможный сход зерна с лепестка и, следовательно, с решета. Одним из способов снижения потерь зерна при движении зерноуборочного комбайна вверх по склону является увеличение угла открытия жалюзи δ_j и угла наклона решета δ_r (рисунок 2, в).

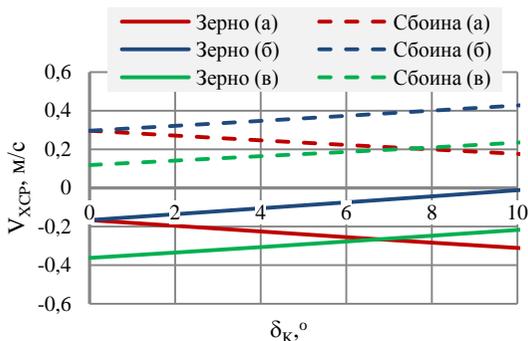


Рисунок 2 – Результаты расчёта ($U=4,5$ м/с):

а – движение комбайна вниз по склону ($\delta_j = 22^\circ$, $\delta_r = 5^\circ$);

б – движение комбайна вверх по склону ($\delta_j = 22^\circ$, $\delta_r = 5^\circ$);

в – движение комбайна вверх по склону ($\delta_j = 30^\circ$, $\delta_r = 7^\circ$)

Выявлены зависимости, определяющие рациональные углы открытия жалюзи решета при работе зерноуборочного комбайна на склонах с продольным наклоном при движении комбайна вверх по склону

$$\delta_j = \delta_{j0} + 0,7 \cdot \delta_k. \quad (5)$$

где δ_{j0} – угол открытия жалюзи при горизонтальном положении молотилки.

Движение зернового вороха по поверхности жалюзийного решета

В этом случае угол δ определяет наклон поверхности решета относительно горизонта – при движении комбайна вниз по склону $\delta = \delta_r + \delta_k$, при движении вверх – $\delta = \delta_r - \delta_k$. Движение зернового вороха рассматриваем в виде движения выделенного элемента, наделённого комплексом физико-механических свойств.

В этом случае, условия прохода зерна улучшаются и даже при угле продольного наклона молотилки 10° средняя скорость равна «минус» 0,21 м/с, т.е. зерно проходит сквозь решето. Обеспечить постоянство качественных показателей работы системы очистки при увеличении продольного наклона молотилки возможно за счёт изменения углов δ_j и δ_r .

При движении зернового вороха по решетке происходит сепарация зернового вороха, зерно сталкивается с солоmistыми примесями, поэтому при моделировании применён приведённый коэффициент парусности k_{Π} элемента зернового вороха, рассчитанный как средневзвешенное значение математических ожиданий коэффициентов парусности компонентов, входящих в его состав. Приведённый коэффициент парусности элемента зернового вороха пшеницы, находящегося на решетке, находится в интервале от 0,2 (в начале решета, зерновой ворох состоит из зерна, сбиины, половы и колосков) до 0,4 (в конце решета, зерновой ворох состоит в основном из сбиины и колосков). Коэффициент сопротивления движению элемента зернового вороха в прямом направлении (в положительном направлении оси X) примем равным приведенному коэффициенту трения $f_{\Pi P1} = 0,85$ солоmistой фракции вороха по решетке, в обратном направлении (отрицательном направлении оси X) – $f_{\Pi P2} = 1,19$, а при движении в поперечном направлении по поверхности решета $f_{\Pi P3} = 0,88$. При исследовании движения зернового вороха в поперечном направлении по плоским жалюзи, например, скруглённым ламельным жалюзи, коэффициент трения следует принять равным коэффициенту трения солоmistой фракции по стальной поверхности.

Скорость воздушного потока находится в интервале от 3,5 до 4,5 м/с. Сопротивление воздушного потока движению элемента в поперечном направлении мало.

Относительную скорость элемента в воздушном потоке с учётом колебаний решета и относительной скорости частицы по решетке определим по формуле

$$U_0 = U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x} \cdot \cos(\gamma - \delta). \quad (6)$$

Движение элемента по жалюзийному решетке описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\beta - \delta) + k_{\Pi} \cdot U_0^2 \cdot \cos(\gamma - \delta) \mp \\ \mp f_{\Pi P1, \Pi P2} \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) - g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ \ddot{y} = \mp f_{\Pi P3} \cdot \frac{N}{m} \cdot \sin(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) - g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\beta - \delta) - k_{\Pi} \cdot U_0^2 \cdot \sin(\gamma - \delta) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (7)$$

Выявлено, что зерновой ворох может перемещаться без отрыва от поверхности решета в положительных и отрицательных направлениях осей X и Y (интервалы движения $X_{(+)}$, $Y_{(+)}$, $X_{(-)}$, $Y_{(-)}$); находиться в состоянии покоя (X_{Π}); совершать полёт – $Z_{(+)}$.

Угол поворота кривошипа φ_0 , при котором зерновой ворох отрывается от поверхности решета

$$\varphi_0 \geq \arccos \left[\frac{\cos \alpha \cdot \cos \delta - \frac{U_0^2}{U_s^2} \cdot \sin(\gamma - \delta)}{k \cdot \sin(\beta - \delta)} \right], \quad (8)$$

где k – кинематический режим, $k = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}$.

Движение элемента после отрыва от поверхности решета происходит в воздушном потоке, направление которого зависит от наклона молотилки комбайна. Введём

систему координат $O_K X_K Y_K Z_K$, связанную с молотилкой комбайна. Силы, действующие на элемент вороха во время полёта, приведены на рисунке 3.

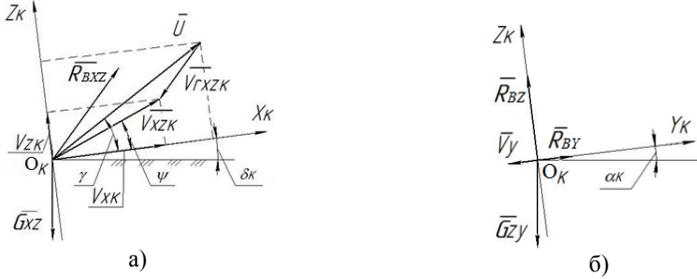


Рисунок 3 – Схемы к определению траектории полёта элемента вороха над решетом: а – в плоскости $X_K O_K Z_K$; б – в плоскости $Y_K O_K Z_K$

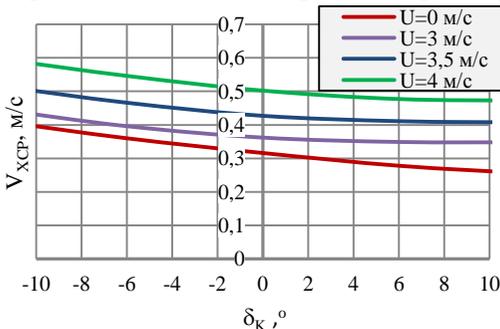
Проекции относительной скорости элемента на оси X_K и Z_K в соответствии с рекомендациями С.А. Алфёрова равны:

$$V_{iXK} = U \cos \gamma - V_{XK}, \quad V_{iZK} = U \sin \gamma - V_{ZK}. \quad (9)$$

Система дифференциальных уравнений полёта элемента зернового вороха над решетом имеет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}_K = k_{II} \cdot \left[\sqrt{V_{iXK}^2 + V_{iZK}^2} \right]^2 \cdot \frac{V_{iXK}}{\sqrt{V_{iXK}^2 + V_{iZK}^2}} - g \cdot \cos \alpha_K \cdot \sin \delta_K \\ \ddot{y}_K = \pm k_{II} \cdot V_{iYK}^2 - g \cdot \sin \alpha_K \cdot \cos \delta_K \\ \ddot{z}_K = k_{II} \cdot \left[\sqrt{V_{iXK}^2 + V_{iZK}^2} \right]^2 \cdot \frac{V_{iZK}}{\sqrt{V_{iXK}^2 + V_{iZK}^2}} - g \cdot \cos \alpha_K \cdot \cos \delta_K. \end{cases} \quad (10)$$

Начальные условия полёта элемента: $t = t_{ot}$, $x_K = x_{Kot}$, $y_K = y_{Kot}$, $z_K = z_{Kot}$, $\dot{x}_K = \dot{x}_{Kot}$, $\dot{y}_K = \dot{y}_{Kot}$, $\dot{z}_K = \dot{z}_{Kot}$ (здесь индекс «от» обозначает отрыв от поверхности решета, а переменные, обозначенные указанным индексом, – кинематические параметры движения элемента по решетку во время отрыва).



Решение систем дифференциальных уравнений (7) и (10) выполнили в программе «Движение зернового вороха по поверхности жалюзийного решета», разработанной в среде Mathcad. Время соударения элемента зернового вороха с решетом определяли по графикам перемещений по оси Z_K элемента зернового вороха и решета. На скорость зернового вороха в продольном направлении оказывают влияние скорость воздушного потока и продольный наклон комбайна (рисунок 4).

Рисунок 4 – Результаты расчёта ($f_{пр1}=0,85$, $f_{пр2}=1,19$, $k_{II} = 0,23$, отрицательные значения угла δ_K – движение комбайна вверх по склону)

Поперечный наклон молотилки комбайна способствует нежелательному перемещению зернового вороха в сторону уклона, причём на параметры движения оказывает влияние скорость воздушного потока (рисунок 5).

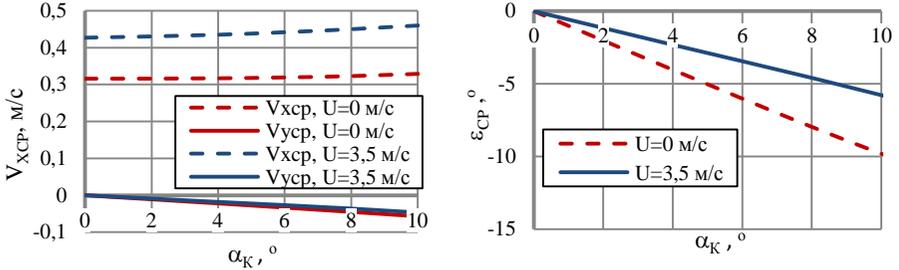


Рисунок 5 – Параметры движения зернового вороха по жалюзийному решетку при поперечном наклоне комбайна ($f_{np1}=0,95$, $f_{np2}=1,19$)

Установлено, что изменение поперечного наклона решета относительно молотилки, наклонённой в поперечном направлении, может способствовать перемещению зернового вороха в противоположную сторону уклона. Однако векторы сил инерции и воздействия воздушного потока остаются в плоскости, параллельной боковинам молотилки, что препятствует интенсивному смещению зернового вороха в сторону, противоположную уклону. Поэтому целесообразно изменить направление колебаний решета добавлением поперечной составляющей, обеспечивающей перемещение зернового вороха в сторону, противоположную уклону.

Движение зернового вороха при дополнительных колебаниях решета в поперечном направлении

Выравнивание толщины слоя зернового вороха на верхнем решете достигается за счёт введения дополнительных колебаний решета в поперечном направлении. Вектор силы инерции, возникающей от дополнительных колебаний решета, направлен по оси Y, а значение силы равно

$$F_{ин} = m \cdot \omega^2 \cdot r_{\Pi} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (11)$$

где r_{Π} – амплитуда колебаний решета в поперечном направлении.

Колебания решета в поперечном направлении в воздушном потоке приводят к появлению переменной силы сопротивления воздушного потока движению элемента, которая учтена зависимостью

$$R_{BY} = m \cdot k_{\Pi} \cdot (\omega \cdot r_{\Pi} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \dot{y})^2. \quad (12)$$

Система уравнений (7) для рассматриваемого случая имеет вид (значение U_0 определяется по формуле (6)):

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\beta - \delta) + k_{\Pi} \cdot U_0^2 \cdot \cos(\gamma - \delta) \mp f_{np1, np2} \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos(\arctg \frac{\dot{y}}{x}) - g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ \ddot{y} = \omega^2 \cdot r_{\Pi} \cdot \cos(\omega \cdot t) \mp f_3 \cdot \frac{N}{m} \cdot \sin(\arctg \frac{\dot{y}}{x}) \mp k_{\Pi} \cdot (\omega \cdot r_{\Pi} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \dot{y})^2 - g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \alpha \cdot \sin(\beta - \delta) - k_{\Pi} \cdot U_0^2 \cdot \sin(\gamma - \delta) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (13)$$

Решение системы уравнений (10) и (13) выполнили в программе «Движение зернового вороха по поверхности жалюзийного решета», разработанной в среде Mathcad. Результаты расчёта представлены на рисунке 6.

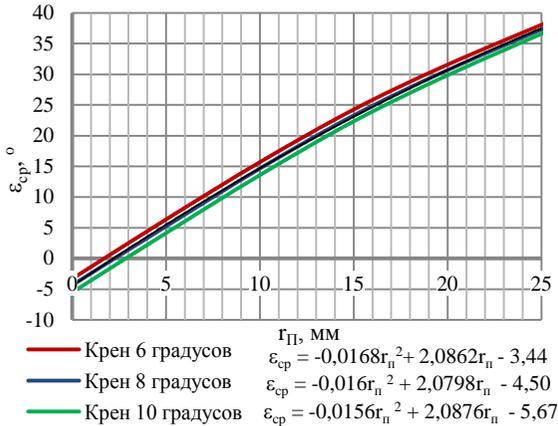


Рисунок 6 – Параметры движения зернового вороха при дополнительных колебаниях решета в поперечном направлении

При поперечном крене молотилки 6° зерновой ворох, контактирующий с решето, не смещается в сторону уклона ($\varepsilon_{ср} \geq 0^\circ$) при поперечных колебаниях решета с амплитудой более 1,7 мм, при крене 8° – более 2,2 мм, при крене 10° – более 2,8 мм (рисунок 6). Определены зависимости угла $\varepsilon_{ср}$ от амплитуды колебаний решета в поперечном направлении для рассматриваемого диапазона углов наклона молотилки в поперечном направлении.

Движение зернового вороха по пальцевому решету при изменении направления его колебаний в горизонтальной плоскости

При изменении направления колебаний решета в горизонтальной плоскости появляется поперечная составляющая колебаний, а амплитуда A_x колебаний решета в продольном направлении уменьшается: $A_x = r \cdot \cos(\nu)$; амплитуда колебаний решета в поперечном направлении $A_y = r \cdot \sin(\nu)$; угол $\nu = \arctg(A_y/A_x)$.

Уменьшение амплитуды колебаний решета в продольном направлении приводит к снижению скорости зернового вороха по решету, поэтому устройство, реализующее рассматриваемый способ, целесообразно использовать, например, для выравнивания зернового вороха перед его поступлением на верхнее решето. Предположим, решето устройства выполнено в виде гребёнок с соломозацепами, обеспечивающих более устойчивое движение зернового вороха при продольных наклонах комбайна, и соединено с молотилкой комбайна подвесками длиной l_n .

Угол продольного наклона поверхности гребёнки относительно горизонта определён в виде суммы углов $\delta = \delta_p + \delta_r \pm \delta_k$ (здесь δ_p – наклон поверхности гребёнки относительно решета (рисунок 7), при движении комбайна вниз по склону применяются верхние знаки, при движении комбайна вверх по склону – нижние). При движении элемента по решету большое значение имеет направление его скорости в момент отрыва, поэтому рассмотрено движение пальцевого решета по дуге окружности, имеющей радиус, равный длине подвесок l_n .

Угол β определён в виде функции от времени

$$\beta(t) = \beta_0 + \arcsin \frac{r \cdot \cos(\omega \cdot t)}{l_n}, \quad (14)$$

где β_0 – угол, определяющий центральное положение подвесок относительно молотилки.

Рассмотрим движение элемента, имеющего приведённый коэффициент парусности и фрикционные свойства соломистой фракции зернового вороха. Введём подвижную систему координат $OXYZ$, связанную с поверхностью гребёнки, и систему координат $O_K X_K Y_K Z_K$, связанную с молотилкой комбайна. На элемент, находящийся на пальцевом решете, действуют: сила тяжести G ; сила воздействия воздушного потока R_B ; сила сопротивления воздушного потока при движении элемента в поперечном направлении $R_{BY} = m \cdot k_{\Pi} \cdot (\omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \nu + \dot{y})^2$; N_X, N_Z – нормальные реакции гребёнок по осям X и Z ; сила инерции элемента от колебаний решётки $P_{ИН}$; сила трения F . Угол, определяющий наклон воздушного потока γ , задан относительно молотилки комбайна.

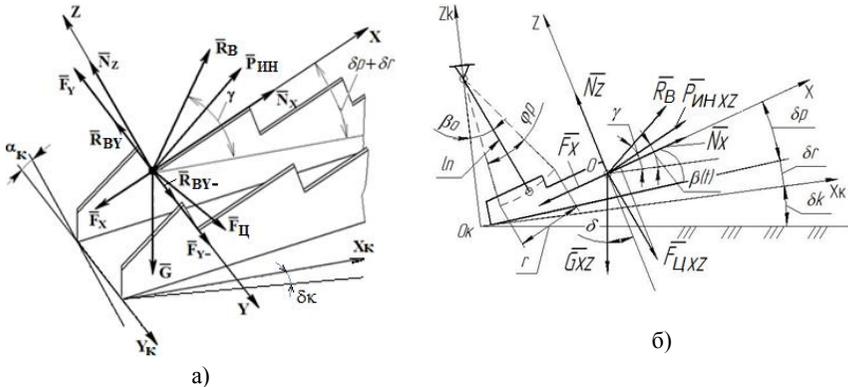


Рисунок 7 – Силы, действующие на элемент: а – пространственная схема; б – в плоскости XOZ ; N_X, N_Z – нормальные реакции гребёнки по осям X и Z ; $F_{Ц}$ – центробежная сила

Движение гребёнки происходит по дуге окружности с радиусом l_n , поэтому на элемент также действует центробежная сила

$$F_{Ц} = m \cdot \omega_e^2 \cdot l_n, \quad (15)$$

где ω_e – угловая скорость элемента, зависящая от угловой скорости подвески решета ω_a и \dot{x} – проекции относительной скорости элемента на ось X ,

$$F_{Ц} = m \cdot \frac{[-\omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) + \dot{x} \cdot \cos(\beta(t) - \delta_1)]^2}{l_n}, \quad (16)$$

где $\delta_1 = \delta_p + \delta_r$.

Относительная скорость элемента в воздушном потоке равна

$$U_0 = U + \omega \cdot r \cdot \cos(\nu) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta(t)) - \dot{x} \cdot \cos(\gamma - \delta_1). \quad (17)$$

Перемещению элемента в направлении оси Y препятствуют боковые поверхности гребёнок, а перемещению в отрицательном направлении оси X – соломозацепы на гребёнках. Отсюда принимаем коэффициенты трения при движении элемента по гребёнке: $f = 0,4$ – в положительном направлении оси X ; $f_{\Pi P2} = 2$ – приведённый коэффициент трения в отрицательном направлении оси X ; $f_{\Pi P3} = 2$ – приведённый коэффициент трения в направлении оси Y .

Дифференциальные уравнения относительного движения элемента по пальцевому решету имеют вид (верхние знаки – при движении элемента в положительном направлении осей):

$$\begin{cases}
 \ddot{x} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\beta(t) - \delta_1) \cdot \cos v + k_{II} \cdot U_0^2 \cdot \cos(\gamma - \delta_1) + \frac{F_{II}}{m} \cdot \sin(\beta(t) - \delta_1) \cdot \cos v \mp \\
 \mp f(f_{II2}) \cdot \frac{N_Z}{m} \cdot \cos(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) - g \cdot \cos \alpha_K \cdot \sin \delta \\
 \ddot{y} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\beta(t) - \delta_1) \cdot \sin v + \frac{F_{II}}{m} \cdot \sin(\beta(t) - \delta_1) \cdot \sin v \mp \\
 \mp f_{II3} \cdot \frac{N_Z}{m} \cdot \sin(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) \mp k_{II} \cdot (\omega \cdot r \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin v + \dot{y})^2 - g \cdot \sin \alpha_K \cdot \cos \delta \\
 \frac{N_Z}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\beta(t) - \delta_1) - k_{II} \cdot U_0^2 \cdot \sin(\gamma - \delta_1) + \frac{F_{II}}{m} \cdot \cos(\beta(t) - \delta_1) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta.
 \end{cases} \quad (18)$$

Полёт элемента над пальцевым решетом описывается системой уравнений (10). Расчёт движения зернового вороха по пальцевому решетку выполнен в программе «Движение зернового вороха по пальцевому решетку», разработанной в среде Mathcad. Результаты расчёта приведены на рисунке 8.

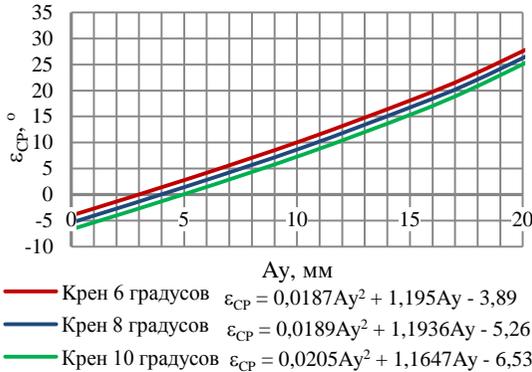


Рисунок 8 – График зависимости $\varepsilon_{ср}$ от амплитуды колебаний решета в поперечном направлении и угла поперечного наклона молотилки

Определены параметры колебаний решета в поперечном направлении, при которых зерновой ворох, контактирующий с гребёнками решета, не смещается в сторону уклона:

$$\alpha_K = 6^\circ - v \geq 5,5^\circ, A_Y \geq 0,003 \text{ м};$$

$$\alpha_K = 8^\circ - v \geq 7,5^\circ, A_Y \geq 0,004 \text{ м};$$

$$\alpha_K = 10^\circ - v \geq 9,5^\circ, A_Y \geq 0,005 \text{ м}.$$

Изменение направления колебаний пальцевого решета способствует перемещению зернового вороха по решетку в поперечном направлении в сторону, противоположную уклону.

В третьей главе «Сепарация зернового вороха в системе очистки в условиях работы комбайна на склонах» рассмотрены вопросы сепарации и распределения зернового вороха на верхнем решетке системы очистки.

Предположим, что вследствие текучести зернового вороха его поверхность на стрясанной доске и верхнем решетке горизонтальна при любом поперечном наклоне молотилки; наклон стрясанной доски и верхнего решета относительно молотилки не изменяется; при отсутствии поперечного наклона молотилки сечение зернового вороха представляет собой прямоугольник; толщина слоя зернового вороха, поступающего на верхнее решето, прямо пропорциональна подаче соломистой фракции q_C

$$h_B = \frac{q_C}{V_{XCP} \cdot B \cdot \gamma_C}, \quad (19)$$

где B – ширина рабочего органа (стрясной доски или верхнего решета); γ_C – объёмная масса соломистой фракции.

Обозначим m_{Π} количество продольных перегородок высотой $h_{\Pi T}$ на рабочем органе. Предположим, что при поперечном наклоне молотилки на угол α зерновой ворох поступает на рабочий орган равномерным слоем. Выделим объём зернового вороха, перемещающегося в продольном направлении за один период колебаний T на расстояние Δx ,

$$\Delta Q = B \cdot h_B \cdot \Delta x = B \cdot h_B \cdot V_{XCP} \cdot T. \quad (20)$$

При поперечном наклоне молотилки зерновой ворох объёмом ΔQ переместится в поперечном направлении на величину $\Delta y = V_{YCP} \cdot T$. Боковые стенки верхнего стана (или стрясной доски) ограничивают движение зернового вороха в поперечном направлении, поэтому участки у нижней боковой стенки увеличатся на элементарный объём $\Delta Q' = \Delta x \cdot \Delta y \cdot h_B = \Delta x \cdot \Delta S$ (здесь ΔS – площадь поперечного сечения элементарного объёма), а верхние участки уменьшатся на указанный объём. Так как верхняя граница зернового вороха стремится к горизонтальному положению, поперечное сечение элементарного объёма, переместившегося по рабочему органу в сторону уклона, преобразуется в прямоугольный треугольник со сторонами Δb_1 и Δh (рисунок 9) и площадью ΔS .

Если принять, что за один период колебаний решета перемещается один элементарный объём зернового вороха, то за p периодов переместится p элементарных объёмов зернового вороха

$$\Delta b_p = \sqrt{\frac{2 \cdot p \cdot \Delta S}{tg \alpha}}. \quad (21)$$

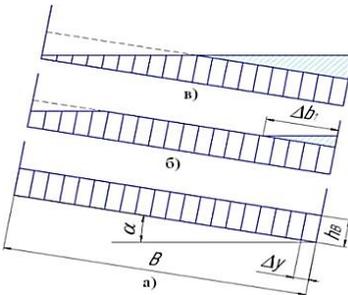


Рисунок 9 – Сечение зернового вороха при поперечном наклоне рабочего органа: а – начальное; б – после одного колебания; в – конечное

Определена длина участка рабочего органа, на котором происходит смещение зернового вороха в сторону уклона

$$X_p = \frac{B^2}{8 \cdot h_B} \cdot \frac{tg \alpha}{tg \varepsilon}. \quad (22)$$

При отсутствии на решетке продольных перегородок зерновой ворох смещается в сторону уклона практически по всей длине решета. Установка на решетке (или стрясной доске) продольных перегородок способствует более быстрому переходу зернового

вороха в установившееся состояние, при котором форма его поперечного сечения при его продольном перемещении по решетке не изменяется.

Неравномерность распределения зернового вороха по ширине рабочего органа оценивали с помощью коэффициента вариации $V_h = \sigma_h/h_B$ (здесь σ_h – среднеквадратическое отклонение толщины слоя зернового вороха)

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_B)^2}{n-1}}, \quad (23)$$

где h_i – толщина зернового вороха на i -ом участке рабочего органа; n – количество участков по ширине рабочего органа, на которых определяется толщина слоя вороха (рисунок 10).

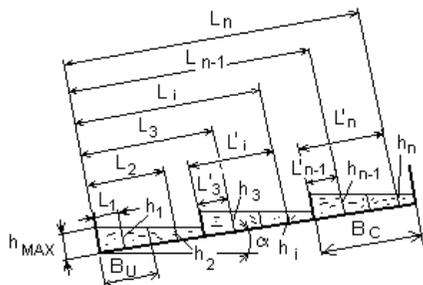


Рисунок 10 – Схема по определению h_i

Разработана методика определения коэффициента вариации толщины зернового вороха на верхнем решете системы очистки. В зависимости от угла поперечного наклона молотилки зерновой ворох может находиться в нескольких состояниях: оставаться в секции или переходить в другую секцию; поперечное сечение в секции может иметь вид трапеции или треугольника.

Определены предельные углы наклона молотилки, при которых зерновой ворох остаётся в секции, поперечное сечение которого имеет вид:

- трапеции

$$\alpha_{II} = \arctg \left[\frac{2 \cdot k_C \cdot (h_{III} - h_B)}{B} \right], \quad (24)$$

- треугольника

$$\alpha_{II} = \arctg \left[\frac{k_C \cdot h_{III}^2}{2 \cdot h_{BT} \cdot B} \right], \quad (25)$$

где k_C – количество секций на стрясной доске или верхнем решете, $k_C = m_{II} + 1$.

Определены значения h_i для каждого вида распределения вороха:

- вид 1,а – ворох не перераспределяется по секциям, в секциях ворох распределен по трапеции;

- вид 1,б – ворох не перераспределяется по секциям, в секции ворох распределен по треугольнику;

- вид 2,а(1) – часть вороха переходит в крайнюю секцию, которая становится более загруженной ворохом, в остальных секциях ворох распределен по трапеции;

вид 2,а(2) – минимальная высота вороха в крайней секции больше высоты перегорода, т.е. когда две крайние секции загружены ворохом вместе, остальные секции загружены по трапеции;

вид 2,б – часть вороха переходит в крайнюю секцию, которая становится более загруженной ворохом, в остальных секциях ворох распределен по треугольнику.

Разработанная методика расчёта коэффициента вариации толщины слоя зернового вороха V_h реализована в программе для ЭВМ «Расчет параметров системы очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна». Программа разработана на языке Java, среда разработки NetBeans 8.0.1.

Предположим, зерновой ворох в начале и в конце верхнего решета имеет одинаковое распределение по ширине, например, за счёт установки продольных перегородок. В этом случае коэффициенты вариации толщины слоя вороха в начале и в конце решета одинаковые или отличаются друг от друга незначительно, а модель сепарации имеет следующий вид:

$$P = 100 \cdot \exp(-L_p \mu_p e^{-k_1 V_h^{k_2}}) \quad (\%), \quad (26)$$

где P – потери зерна за системой очистки; L_p – длина решета; μ_p – коэффициент сепарации зернового вороха на верхнем решете; k_1, k_2 – коэффициенты.

Установлено, что модель сепарации (26) достаточно точно описывает сепарацию зернового вороха при поперечном наклоне молотилки при незначительно отличающихся друг от друга коэффициентах вариации толщины слоя в начале и в конце решета. Значения коэффициентов $k_1 = 1,15$, $k_2 = 1,3$]. Однако модель сепарации (26) не позволяет оценить работу системы очистки, если неравномерность распределения зернового вороха на различных участках верхнего решета разная. Принимая технологические параметры системы очистки при работе комбайна на склоне постоянными за определённый промежуток времени, в поведении зернового вороха можно выделить две фазы: первая – неустановившееся вынужденное движение, режим – динамический нестационарный, $V_h \neq const$; вторая – движение зернового вороха – установившееся вынужденное, режим – динамический стационарный, $V_h = const$.

Предположим, зерновой ворох, поступающий на верхнее решето неравномерным слоем ($V_h > 0$), выравнивающим устройством разравнивается по решету и при удалении от начала решета на расстоянии X_m $V_{hx} \cong 0$. При дальнейшем движении зернового вороха по решету он может сместиться в сторону уклона, при этом коэффициент вариации изменится, т. е. $V_h \neq const$, или при установке дополнительных устройств зерновой ворох не смещается, а коэффициент вариации $V_h = const$. Таким образом, в разрабатываемой математической модели необходимо учитывать три характерных поперечных сечения по длине решета: в начале – коэффициент вариации зернового вороха V_{hn} ; на удалении от начала решета на расстоянии X_m (или X_p) – V_{hx} ; в конце верхнего решета V_{hk} . Принимая, что технологические параметры очистки и режимы работы постоянны, можно предположить, что при перемещении зернового вороха от одного сечения к другому коэффициент вариации изменяется по линейной зависимости, причём за один период колебаний решета зерновой ворох переместится на расстояние Δx , а коэффициент вариации изменится на величину ΔV_h . При перемещении зернового вороха от начального сечения к промежуточному получим

$$\Delta V_{h1} = (V_{hn} - V_{hx}) / z, \quad (27)$$

где z – количество колебаний решета при перемещении зернового вороха на расстояние X_m (или X_p),

а при перемещении от промежуточного сечения к конечному

$$\Delta V_{h2} = (V_{hx} - V_{hk}) / (k - z), \quad (28)$$

где k – количество колебаний решета, при котором зерновой ворох находится на его поверхности.

Значение параметра Δx целесообразно принять кратным длине решета (принято $\Delta x = 0,1$ м), тогда параметры k и z – целые числа.

Располагая дискретными коэффициентами вариации зернового вороха на любом участке по длине решета, модель сепарации зернового вороха имеет вид:

$$P = 100 \cdot \prod_{i=0}^k \left(\exp(-\mu_P \cdot \Delta x \cdot e^{\begin{cases} V_{hn} + \Delta V_{h1} (-i) & \text{если } i \leq z \\ V_{hx} + \Delta V_{h2} (z-i) & \text{если } i > z \end{cases}}) \right). \quad (29)$$

Если зерновой ворох смещается в сторону уклона по всей длине верхнего решета, причём известны коэффициенты вариации толщины слоя зернового вороха в начале и в конце решета, то модель принимает вид:

$$P = 100 \cdot \prod_{i=0}^k \left(\exp(-\mu_P \cdot \Delta x \cdot e^{-(V_{hn} - \Delta V_{hi})}) \right), \quad (30)$$

где $\Delta V_h = (V_{hn} - V_{hk}) / k$.

Коэффициент сепарации зернового вороха определён с учётом коэффициента сепарации в эталонной (базовой) системе очистки (по И.Ф. Василенко и В.К. Максимчуку)

$$\mu_P = \mu_{P0} \cdot \left(\frac{h_{B0}}{h_B} \right)^c, \quad (31)$$

где μ_{P0} , h_{B0} – соответственно эталонные коэффициент сепарации зерна и толщина слоя зернового вороха; c – коэффициент, характеризующий условия работы системы очистки, зависящий от отношения толщины слоя зернового вороха при рассматриваемой подаче и эталонной толщины слоя вороха.

Параметры μ_{P0} , h_{B0} определяются по результатам испытаний базового комбайна на горизонтальном участке при номинальной подаче зернового вороха.

Разработанная математическая модель сепарации зернового вороха позволяет оценивать функционирование системы очистки при неравномерном распределении зернового вороха на верхнем решете, а также работу выравнивающих устройств при работе зерноуборочного комбайна на склонах. Для расчёта потерь зерна для указанных условий разработана программа для ЭВМ в среде Mathcad «Математическая модель сепарации зернового вороха».

Определены потери зерна за очисткой и распределение зернового вороха на грохоте при поперечном наклоне зерноуборочного комбайна с шириной молотилки 1200 мм. Расчёты проведены при следующих параметрах: ширина стрясной доски $B_T = 1,0$ м; количество продольных перегородок на стрясной доске 2 шт, на верхнем решете 3 шт; высота продольных перегородок на стрясной доске и верхнем решете $h_{ПТ} = 0,05$ м; ширина верхнего решета $B_p = 1,1$ м; длина верхнего решета $L_p = 1,3$ м; содержание солоистой фракции в зерновом ворохе $C = 30$ %; эталонный коэффициент сепарации $\mu_{P0} = 5,1 \text{ м}^{-1}$. На верхнее решето зерновой ворох поступает с неравномерностью, приобретенной на стрясной доске. Коэффициенты вариации толщины слоя зернового вороха в начале V_{hn} и в конце V_{hk} верхнего решета и вид распределения определены по программе для ЭВМ «Расчет параметров системы очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна», а потери зерна – по программе для ЭВМ «Математическая модель сепарации зернового вороха».

С увеличением угла α_K , как и ожидалось, распределение зернового вороха на решетке ухудшается (таблица 1), причём при наклоне решета более 8° сечение зернового вороха в секции имеет вид треугольника. Это приводит к нерациональному расходу воздушного потока. Средний коэффициент вариации зернового вороха с ростом α_K также увеличивается, как и потери зерна за системой очистки.

Таблица 1 – Теоретические значения коэффициентов вариации толщины слоя зернового вороха на верхнем решете и потерь зерна ($q_B = 2,9 \text{ кг/с}$)

$\alpha_K, ^\circ$	Конец стрясной доски		Конец решета		$V_{\text{нсп}}$	$P_{\text{рас}} \%$
	Вид распределения	$V_{\text{нм}}$	Вид распределения	$V_{\text{нк}}$		
4		0,230		0,292	0,261	0,40
6		0,345		0,423	0,384	0,76
8		0,462		0,519	0,491	1,25
10		0,579		0,619	0,599	1,96
12		0,684		0,718	0,701	2,87

Выявлено, что количество и высота продольных перегородок, установленных на стрясной доске, влияют на равномерность подачи зернового вороха на верхнее решето при поперечном крене зерноуборочного комбайна. С целью исключения перебрасывания вороха в соседние секции стрясной доски и повышения равномерности подачи вороха по ширине верхнего решета целесообразно применять для зерноуборочных комбайнов третьего класса – три перегородки высотой 0,14 м, четвертого класса – три перегородки высотой 0,17 м, пятого класса (ширина молотилки 1500 мм) – пять перегородок высотой 0,16 м.

В четвертой главе «Обоснование конструктивно-технологических решений и параметров системы очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах» рассмотрены конструктивно-технологические решения системы очистки зерноуборочного комбайна, обеспечивающие снижение потерь зерна при работе комбайна на склонах.

Анализ проведён с помощью разработанной математической модели сепарации зернового вороха и методики определения коэффициента вариации зернового вороха. Сравнение проводили с системой очистки комбайна третьего класса при поперечном наклоне молотилки 8° . Рассмотрены следующие технологии сепарации и распределения зернового вороха на верхнем решете при поперечном наклоне молотилки комбайна:

- 1) предварительная сепарация (снижение потерь зерна в 2,5 раза);
- 2) предварительная сепарация, снижение неравномерности подачи на верхнее решето (в 4,3 раза);
- 3) предварительная сепарация, снижение неравномерности подачи на верхнее решето, стабилизация распределения на верхнем решете (в 6 раз);

- 4) предварительная сепарация, снижение неравномерности подачи на верхнее решето, выравнивание на верхнем решете (13,9 раз);
- 5) выравнивание к концу верхнего решета (в 2,8 раза);
- 6) выравнивание перед верхним решетом (в 2,5 раза);
- 7) выравнивание перед верхним решетом и стабилизация распределения на верхнем решете (в 8,3 раза);
- 8) выравнивание в передней части решета и стабилизация распределения на верхнем решете (в 5,4 раза).

Таким образом, перспективными технологическими операциями, обеспечивающими снижение потерь зерна при работе комбайна с поперечным креном молотилки являются: предварительная сепарация зернового вороха; снижение неравномерности подачи зернового вороха на верхнее решето; стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете; выравнивание зернового вороха в начале и на всей поверхности верхнего решета. Наибольший эффект может быть достигнут при совмещении перечисленных технологических операций – снижение потерь зерна за системой очистки при поперечном крене молотилки более чем в 5 раз.

Предварительная сепарация зернового вороха, снижение неравномерности подачи на верхнее решето достигается в системе очистки с решётно-винтовым сепаратором (РВС). Система очистки с РВС защищена авторским свидетельством № 1701165 и патентами РФ №№2002401, 2038739, 2101909 (рисунок 11).

В предлагаемой системе очистки предварительная сепарация зернового вороха, поступающего с молотильно-сепарирующего устройства, происходит в решётно-винтовом сепараторе (РВС) за счет активного воздействия на зерновой ворох воздушного потока и перемешивающих устройств, установленных на шнеках. Перемешивающие устройства могут быть выполнены в виде сплошных лопаток, а также в виде гребёнок с шагом элементов 20 мм.

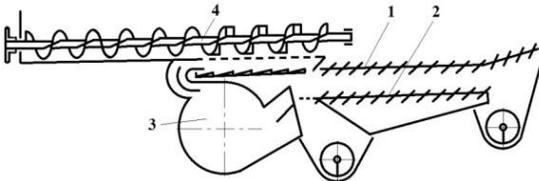


Рисунок 11 – Очистка с решётно-винтовым сепаратором:
1 – верхнее решето; 2 – нижнее решето; 3 – двухрукавный вентилятор; 4 – решётно-винтовой сепаратор

Зерно с частью примесей затем поступает на нижнее решето, а на верхнем решете разделяется зерновой ворох, который поступает с соломотряса и решета РВС. Для определения параметров системы очистки проведены теоретические и экспериментальные исследования решётно-винтового сепаратора (РВС) и всей системы очистки.

Определены параметры решётно-винтового сепаратора и экспериментальной системы очистки для зерноуборочных комбайнов 3 и 4 классов (ширина молотилки 1200 мм): количество шнеков 4; диаметр и шаг шнека 0,15 м; частота вращения шнеков 330 мин⁻¹; диаметр отверстий решета 12 мм; ширина и шаг перемешивающих устройств – 60 и 100 мм; скорость воздушного потока на решете 3,7 м/с. Регулируемые параметры экспериментальной очистки при содержании соломистых примесей в бункерном зерне 2 %: частота вращения крыльчатки вентилятора 660 мин⁻¹; отношение расстояния от дна патрубка до направлятеля к высоте патрубка вентилятора 0,3; зазоры между жалюзи верхнего решета 12,5 мм, нижнего – 9,5 мм.

Осевая скорость зернового вороха V_{XS} , перемещаемого шнеком, зависит от угловой скорости вращения шнека ω_0 , радиуса шнека R_S , угла подъёма винтовой поверхности шнека α_B и угла ε_S между вектором абсолютной скорости вороха и осью шнека (по А.М. Григорьеву)

$$V_{XS} = \frac{\omega_0 \cdot R_S \cdot \sin \alpha_B \cdot \cos \varepsilon_S}{\cos(\alpha_B - \varepsilon_S)}. \quad (32)$$

Получено уравнение движения частицы по решетке РВС

$$\varepsilon_S = \arcsin \left[\frac{\left(\frac{U_o^2}{U_S^2} \cdot \sin \gamma \cdot \sin v_S + \sin \delta \cdot \operatorname{tg}(\alpha_B + \varphi_B) - \frac{U_o^2}{U_S^2} \cdot \cos \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha_B + \varphi_B) \right) - \frac{f_{\text{ПР}} \cdot (\cos v_S \cdot \cos \delta + \omega_{as}^2 \cdot \frac{R_S}{g} \cdot \frac{U_o^2}{U_S^2} \cdot \sin \gamma \cdot \cos v_S)}{-\sin v_S \cdot \cos \delta} \cdot \cos(\alpha_B + \varphi_B)}{\cos(\alpha_B - \varepsilon_S)} \right] + \alpha_B + \varphi_B, \quad (33)$$

где v_S – угол, определяющий положение частицы относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось шнека; φ_B – угол трения частицы о спираль шнека; $f_{\text{ПР}}$ – приведённый коэффициент трения вороха с решетом сепаратора; ω_{as} – угловая скорость абсолютного движения частицы в РВС.

Параметры движения зернового вороха в зависимости (33) определены по формулам:

- угловая скорость абсолютного движения (по А.М. Григорьеву)

$$\omega_{as} = \frac{\omega_0 \cdot \sin \alpha_B \cdot \sin \varepsilon_S}{\cos(\alpha_B - \varepsilon_S)}; \quad (34)$$

- относительная скорость зернового вороха в воздушном потоке

$$U_o = U \cdot \frac{\omega_0 \cdot R_S \cdot \sin \alpha_B \cdot \cos \varepsilon_S \cdot \cos \gamma}{\cos(\alpha_B - \varepsilon_S)}. \quad (35)$$

Определено влияние продольного угла наклона комбайна на скорость зернового вороха в решётно-винтовом сепараторе. Расчёт проведён для частицы при $v=0^\circ$. При частоте вращения шнека 330 мин^{-1} при движении комбайна вверх по склону изменение угла продольного наклона молотилки от 0 до 10° приводит к увеличению скорости зернового вороха с 0,72 до 0,76 м/с, т. е. на 5,6 %, а при движении вниз – уменьшается до 0,68 м/с, т. е. на 5,6 %. Таким образом, применение РВС в конструкции зерноуборочного комбайна способствует равномерной по времени подаче зернового вороха в систему очистки при уборке зерновых культур при движении зерноуборочного комбайна вверх по склону.

Под действием винтовой поверхности зерновой ворох смещается в сторону вращения шнека на угол v_S . Расчётный коэффициент вариации зернового вороха при ходе с решета РВС при поперечном наклоне комбайна на угол 8° и подаче 2,9 кг/с равен 0,237, но на верхнем решете зерновой ворох смещается в сторону уклона, что приводит к увеличению коэффициента вариации до 0,378. Таким образом, в очистке с

решётно-винтовым сепаратором улучшается распределение зернового вороха на поверхности решета. Учитывая, что в очистке происходит предварительное (до поступления на верхнее решето) отделение зерна, то сочетание указанных двух факторов способствует повышению эффективности очистки зерна при работе зерноуборочного комбайна на склонах с поперечным и продольным наклоном корпуса комбайна.

Стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете реализована в конструкции двухсекционного верхнего решета по патенту РФ №2058710 (рисунок 12), в конструкции самоустанавливающегося верхнего решета по патенту №2095965 (рисунок 13) и в очистке с выравниванием решет в двух плоскостях по патенту РФ №2137349 (рисунок 14).

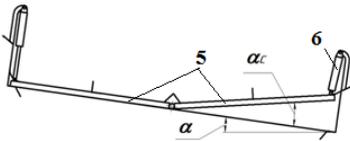


Рисунок 12 – Очистка с двухсекционным решетом по патенту №2058710: 1 – секции верхнего решета; 2 – гидроцилиндр

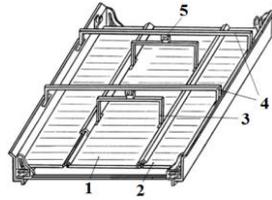


Рисунок 13 – Очистка с самоустанавливающимся решетом по патенту №2095965: 1 – средняя секция решета; 2 – крайняя секция решета; 3 – подвеска; 4 – поперечные балки; 5 – шарнир с компенсирующим механизмом

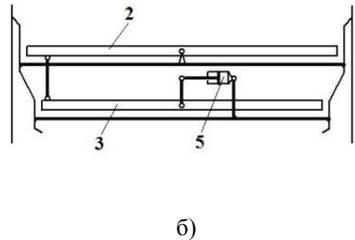
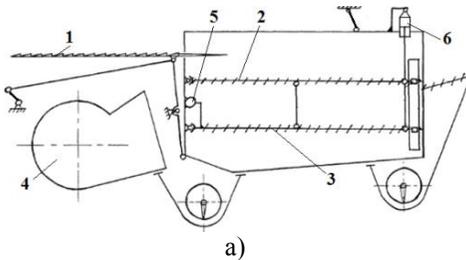


Рисунок 14 – Очистка с выравниванием решёт в поперечной и продольной плоскостях по патенту РФ №2137349: а – продольное сечение; б – поперечное сечение; 1 – стрясная доска; 2 – верхнее решето; 3 – нижнее решето; 4 – вентилятор; 5 – гидроцилиндр поперечного выравнивания решёт; 6 – гидроцилиндр продольного выравнивания решёт

Так как зерновой ворох при поперечном крене молотилки смещается в сторону уклона, то применение двухсекционного решета, конструкция которого позволяет изменять наклон секций, уменьшает неравномерность распределения вороха. Выполним анализ распределения зернового вороха при $\alpha_K = 8^\circ$, $q_B = 2,9 \text{ кг/с}$. На начало решета зерновой ворох поступает с транспортной доски, поэтому предположим, что распределение такое же, как в базовой очистке. При установке нижней секции под углом $\alpha_{CK} = 12^\circ$, предотвращающей смещение зернового вороха в сторону уклона, коэффициент вариации в конце решета $V_{hk} = 0,383$, при этом средний коэффициент равен $V_{hCP} = 0,423$. Таким образом, применение двухсекционного решета незначительно

(в 1,16 раза) уменьшает средний коэффициент вариации толщины слоя вороха в сравнении с базовой очисткой, но распределение зернового вороха стабилизируется.

Применение самоустанавливающегося решета по патенту №2095965, крайнее положение которого в поперечном сечении ограничено наклоном его поверхности относительно молотилки в 6° , также не может значительно снизить коэффициент вариации вороха к концу решета из-за воздушного потока и колебаний решета, направления которых не изменились относительно молотилки. Поэтому предположим, что коэффициент вариации по всему решету имеет постоянное значение, а средний коэффициент вариации равен 0,462, т. е. ниже, чем в базовой очистке в 1,06 раза.

Выравнивание всей поверхности решета относительно линии горизонта достигается в устройстве по патенту РФ №2137349. Применение предлагаемого устройства усложняет конструкцию комбайна и для эффективной работы системы очистки необходима установка перед решетом выравнивателей вороха. На движение зернового вороха по решету так же, как и в предыдущих случаях, оказывают влияние направление воздушного потока и направление колебаний решета. Поэтому для рассматриваемой очистки большое значение имеет распределение зернового вороха в начале решета. Предположим, что и в этом случае коэффициент вариации толщины зернового вороха постоянен по всей длине решета, т. е. средний коэффициент равен 0,462.

Установка на стрясной доске двух продольных перегородок высотой 130 мм исключает перераспределение зернового вороха между секциями, при этом необходимо учитывать большую загрузку нижней секции (по отношению к уклону). Коэффициент вариации вороха в начале решета снизился до $V_{hn}=0,223$. При установке трёх перегородок высотой 130 мм с учётом большей загрузки нижней секции коэффициент вариации зернового вороха в конце решета $V_{hk}=0,243$.

Предварительная сепарация зернового вороха, снижение неравномерности подачи на верхнее решето и стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете происходят в комбинированных системах очистки с РВС и с двухсекционным верхним решетом и с РВС и самоустанавливающимся верхним решетом. При оптимальных параметрах РВС (диаметр отверстий решета 12 мм, ширина лопаток 60 мм, скорость воздушного потока 3,7 м/с) сход зерна с решета сепаратора не превышает 10,0 %. Таким образом, на начало верхнего решета, учитывая зерно, поступающее с соломотряса, поступает около 40 % от всего зерна, поступающего на очистку. В таблице 2 приведены результаты расчёта коэффициентов вариации толщины слоя зернового вороха и потерь зерна для рассматриваемых схем очисток.

Таблица 2 – Результаты расчёта

Наименование очистки	V_{hn}	V_{hk}	V_{hCP}	$P_{рас.} \%$
ВРО с двухсекционным решетом	0,462	0,383	0,422	0,92
ВРО с самоустанавливающимся решетом	0,462	0,462	0,462	1,10
ВРО с тремя продольными перегородками на стрясной доске высотой 130 мм и двухсекционным решетом	0,243	0,383	0,313	0,53
ВРО с двумя продольными перегородками на стрясной доске высотой 130 мм и самоустанавливающимся решетом	0,223	0,223	0,223	0,33
Очистка с РВС и двухсекционным решетом	0,237	0,383	0,310	0,21
Очистка с РВС и самоустанавливающимся решетом	0,237	0,237	0,237	0,14

Выравнивание толщины слоя зернового вороха на верхнем решете обеспечивается колебаниями решета в поперечном направлении (при движении к концу решета – движение в сторону, противоположную уклону). Направление реализовано в устройствах по патентам РФ №№2134503, 2177683.

Инерционный выравниватель зернового вороха по патенту №2177683 состоит из верхнего решетного стана, включающего решето 1, установленное в каркасе 2 с возможностью перемещений в поперечном направлении, и приводного вала 3 (рисунок 15).

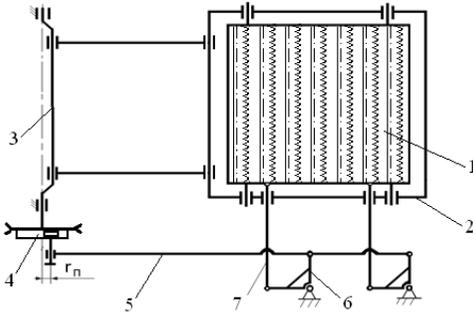


Рисунок 15 – Схема инерционного выравнивателя с механическим приводом по патенту №2177683

Изменение направления и амплитуды поперечных колебаний осуществляется гидроцилиндром двустороннего действия 4, который закреплен на приводном валу, шатуна 5, двуплечего рычага 6 и тяги 7, шарнирно соединенной с решетом 1. Выравнивание толщины слоя зернового вороха на верхнем решете по патенту №2134503 достигается перемещением решета в поперечном направлении за счёт применения гидропривода.

При определении параметров колебаний решета в поперечном направлении предположили, что за один период колебаний решета поперечное сечение зернового вороха изменяется за счёт перемещения порции зернового вороха, контактирующей с поверхностью решета. Указанная порция зависит от поперечного угла наклона молотилки, направления перемещения зернового вороха относительно продольной оси молотилки, ширины решета, толщины зернового вороха. Исходя из этого, преобразуя зависимость (22), определён требуемый угол направления перемещения зернового вороха относительно оси X

$$\varepsilon_T = \arctg \left[\frac{B^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{8 \cdot h_B \cdot X_P} \right]. \quad (36)$$

Результаты расчёта для зерноуборочного комбайна при ширине решета $B=1,1 \text{ м}$, длине решета $L_P=1,0 \text{ м}$ (без удлинителя верхнего решета), принятой толщине слоя зернового вороха, контактирующего с поверхностью решета $h_B=0,035 \text{ м}$, приведены в таблице 3.

Таблица 3

$\alpha, ^\circ$	$\varepsilon_T, ^\circ$	$r_{II}, \text{м.м}$
6	24,4	15
8	31,3	20
10	37,3	25

Амплитуда колебаний решета в поперечном направлении, обеспечивающая перемещение слоя зернового вороха под заданным углом, определена по полученным аппроксимирующим уравнениям (см. рисунок 6).

Выравнивание толщины слоя зернового вороха также можно обеспечить **изменением направления колебаний решета в горизонтальной плоскости**, при этом появляется поперечная составляющая колебаний, а амплитуда колебаний решета в продольном направлении уменьшается. Изменение направления колебаний решета применено в устройствах по патентам №2073411 и №2275787.

При уменьшении продольной составляющей колебаний снижается скорость зернового вороха по решету в продольном направлении, поэтому рассматриваемый способ целесообразно использовать для выравнивания зернового вороха перед его поступлением на верхнее решето. На пальцевой решётке стрясной доски происходит выделение части зерна, а остальной зерновой ворох идёт сходом с решётки и поступает на верхнее решето. Придав поперечные колебания пальцевой решётке, не нарушая технологического процесса сепарации зерна, можно выровнять толщину зернового вороха, поступающего на верхнее решето. Устройство, устанавливаемое вместо пальцевой решётки и предназначенное для выравнивания толщины зернового вороха, названо адаптером для склонов (полезная модель №111964). Для обеспечения устойчивого движения зернового вороха по поверхности адаптера вместо пальцев установлены продольные гребёнки с соломозацепами (рисунок 16).

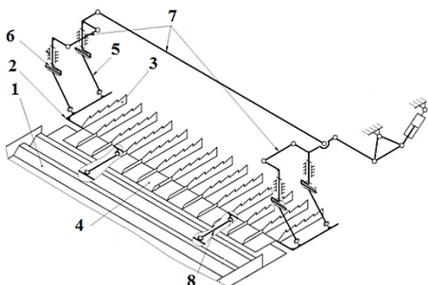


Рисунок 16 – Адаптер очистки для склонов: 1 – стрясная доска; 2 – рама; 3 – продольная гребёнка; 4 – надставка решета; 5 – подвеска; 6 – поворотные рычаги; 7 – механизм изменения направления и амплитуды колебаний решета

Для изменения направления колебаний решета адаптера при поперечном наклоне молотилки комбайна вправо или влево целесообразно применять электрической привод с использованием винтового механизма, шагового двигателя, датчика крена, датчиков положения, пьезодатчиков и контроллера (патент РФ №2343686).

Требуемый угол перемещения зернового вороха в поперечном направлении определим по зависимости (36), приняв ширину решета адаптера 0,9 м, длину решета адаптера 0,4 м, ширину надставки решета 4, равной 0,1 м. Результаты расчёта сведены в таблицу 4.

Таблица 4

$\alpha, ^\circ$	$\varepsilon_T, ^\circ$	$\nu, ^\circ$	$Ay, м$
6	16,9	28,1	15
8	22,1	36,8	18
10	27,0	44,9	21

Угол ν и амплитуда колебаний решета адаптера в поперечном направлении, обеспечивающие перемещение слоя вороха под заданным углом, определены по аппроксимирующим уравнениям, полученным по графикам, представленным на рисунке 8.

В пятой главе «Экспериментальные исследования» приведены программа экспериментальных исследований, методика проведения экспериментов и обработки полученных данных, результаты экспериментов. Исследования работы системы очистки проведены на лабораторной установке, изготовленной на базе молотилки зерноуборочного комбайна третьего класса СК-5М «Нива». Исследования проводили на зерновом ворохе пшеницы. Имитировалась подача зернового вороха с молотильно-сепарирующего устройства и сепаратора грубого вороха двумя транспортёрами-питателями при соотношении потоков зернового вороха 0,7/0,3. Работу очистки оценивали по потерям зерна P (%), засоренности бункерного зерна Z (%), сходу вороха $q_{ВК}$ (%) и зерна P_K (%) в колосовой шнек, определяемым по общепринятой методике.

Установлено, что с увеличением угла поперечного наклона молотилки за счёт смещения зернового вороха в сторону уклона качественные показатели работы *базовой воздушно-решётной системы* очистки ухудшаются. При увеличении угла наклона от 0 до 10° средний коэффициент вариации массы зернового вороха по ширине верхнего решета возрастает с 0,091 до 0,570 %. При поперечном наклоне молотилки 8° потери зерна превышают установленный уровень 0,5 % при подаче зернового вороха более 1,6 кг/с. При подаче зернового вороха 2,9 кг/с и поперечном наклоне молотилки 8° потери зерна составили 1,17 %. Установлена сходимост теоретических и экспериментальных результатов. Относительные отклонения между теоретическими и экспериментальными данными не превышают 10 %: при определении потерь зерна при изменении угла поперечного наклона от 0 до 10° ($q_B = 2,9$ кг/с) и при изменении подачи зернового вороха от 1,5 до 4,3 кг/с ($\alpha_K = 8^\circ$); между средними значениями коэффициента вариации вороха при поперечном наклоне молотилки от 4 до 12°.

Увеличение высоты продольных гребёнок до 130 мм, увеличение их количества до трёх и установка продольных перегородок на верхнем решете позволили улучшить качественные показатели работы очистки: при подаче зернового вороха 2,9 кг/с потери зерна в сравнении с базовой очисткой снизились до 0,75 %, что меньше в 1,6 раза.

Исследованиями работы системы очистки *с устройствами, стабилизирующими распределение зернового вороха*, установлено: применение двухсекционного решета, нижняя секция которого по отношению к уклону установлена под углом 12°, в сочетании с тремя продольными перегородками высотой 130 мм на стрясной доске, позволило при поперечном наклоне комбайна 8° и подаче зернового вороха 2,9 кг/с снизить потери зерна до 0,6 %, т. е. в 1,9 раза в сравнении с базовой очисткой; применением в системе очистки самоустанавливающегося решета в сочетании с двумя продольными гребёнками высотой 130 мм на стрясной доске достигнута при уровне потерь зерна 0,5 % подача зернового вороха 3,6 кг/с, что в 2,25 раза больше базовой.

Предварительная сепарация, снижение неравномерности в начале верхнего решета и стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете привели к значительному улучшению показателей работы системы очистки: подача зернового вороха в систему очистки с РВС и самоустанавливающимся решетом при уровне потерь зерна 0,5 % составила 3,9 кг/с, что в 2,4 раза больше базовой; в комбинированной системе очистки, сочетающей решётно-винтовой сепаратор и двухсекционное решето, при наклоне молотилки до 12° подача зернового вороха при установленном уровне потерь зерна 0,5 % превышает 2,9 кг/с, что в 1,8 раза больше базовой.

Выравнивание толщины слоя зернового вороха на верхнем решете при поперечном наклоне молотилки достигается *сообщением решету дополнительных колебаний в поперечном направлении*. Установлена рациональная амплитуда колебаний

решета при поперечном наклоне молотилки 8° $r_{\text{п}}=20$ мм. При подаче зернового вороха 2,9 кг/с потери зерна составили 0,12 %, что ниже по сравнению с базовой очисткой в 9,8 раза. При уровне потерь зерна 0,5 % подача зернового вороха на очистку равна 3,4 кг/с, что в 2,1 раза больше в сравнении с базовой очисткой.

Выравнивание толщину слоя зернового вороха в начале верхнего решета происходит в системе молотилки с адаптером для склонов. Определён рациональный шаг гребёнок адаптера для склонов, влияющий на загрузку верхнего решета зерновым ворохом, и предварительное выделение зерна – от 50 до 75 мм. Выявлено, что установка адаптера очистки интенсифицирует сепарацию зерна при горизонтальном положении молотилки – при подаче зернового вороха 3,6 кг/с потери зерна в сравнении с базовой очисткой уменьшились с 0,5 до 0,42 %, обеспечивая увеличение пропускной способности системы очистки с 3,6 до 3,9 кг/с, т. е. в 1,08 раза.

Оптимизацию параметров адаптера очистки проводили методом планирования эксперимента. Основываясь на теоретических исследованиях, а также результатах однофакторных и отсеивающих экспериментов, при планировании учтены следующие факторы: x_1 – подача зернового вороха (нижний уровень 2,2 кг/с, средний – 2,9 кг/с, верхний – 3,6 кг/с); x_2 – угол поперечного наклона комбайна (4° , 8° , 12°); x_3 – размах поперечных колебаний решета адаптера (0, 16, 36 мм). За выходные параметры (отклики) приняты: P , Z и P_K . Постоянные входные параметры: длина решета – 400 мм; шаг гребёнок – 75 мм; содержание солоистой фракции – 30 %; влажность зернового вороха поддерживалась в интервале от 10 до 12 %. Принят композиционный симметричный трехуровневый план. В результате проведённых дисперсионного и регрессионного анализов получена эмпирическая математическая модель, адекватно описывающая сепарацию зерна в системе очистки зерноуборочного комбайна с адаптером (расчётные значения критериев Фишера равны: для параметра P $F_{pP} = 1,26$; для параметра Z $F_{pZ} = 1,75$; для параметра P_K $F_{pZ} = 1,75$ при табличном значении $F_T = 2,2$). После раскодирования получены следующие зависимости (размерность размаха поперечных колебаний – $[S_{\text{п}}]=\text{м}$):

$$P=1,717+0,326 \cdot q_B^2+0,006 \cdot \alpha^2+462,963 \cdot S_{\text{п}}^2-1,267 \cdot q_B-0,101 \cdot \alpha+29,365 \cdot S_{\text{п}}+0,020 \cdot q_B \cdot \alpha-20,317 \cdot q_B \cdot S_{\text{п}}-0,722 \cdot \alpha \cdot S_{\text{п}}, \quad (37)$$

$$Z=2,325+0,322 \cdot q_B^2-0,006 \cdot \alpha^2-1030,864 \cdot S_{\text{п}}^2-1,547 \cdot q_B+0,144 \cdot \alpha+31,032 \cdot S_{\text{п}}-0,011 \cdot q_B \cdot \alpha-2,540 \cdot q_B \cdot S_{\text{п}}+1,681 \cdot \alpha \cdot S_{\text{п}}, \quad (38)$$

$$P_K=-12,596-1,410 \cdot q_B^2-0,049 \cdot \alpha^2+2327,160 \cdot S_{\text{п}}^2+9,542 \cdot q_B+0,752 \cdot \alpha-110,333 \cdot S_{\text{п}}+1,472 \cdot \alpha \cdot S_{\text{п}}. \quad (39)$$

Определены рациональные параметры колебаний решета адаптера в поперечном направлении: при крене 6° – размах 30 мм (амплитуда 15 мм); при крене 8° – размах 36 мм (амплитуда 18 мм), что согласуется с полученными теоретическими значениями. При крене молотилки 10° минимальные потери зерна также получены при размахе колебаний 36 мм, который являлся предельным для исследуемой конструкции очистки. Определены подачи зернового вороха при минимальных потерях зерна: для диапазона углов от 4 до 6° – 2,9 кг/с; от 7 до 10° – 2,8 кг/с. Засоренность бункерного зерна в рассматриваемом диапазоне подач и углов поперечного наклона молотилки не превышала 2 %, сход зерна в колосовой шнек – от 3 до 6 %.

Потери зерна в очистке с адаптером при подаче зернового вороха 2,9 кг/с составили 0,21 %, т. е. уменьшились в 5,6 раза. При уровне потерь зерна 0,5 % в сравнении с базовой очисткой подача зернового вороха в систему очистки с адаптером увеличилась с 1,6 до 3,9 кг/с, т. е. в 2,4 раза.

Адекватность математической модели сепарации зернового вороха подтверждает хорошая сходимость теоретических и экспериментальных значений потерь зерна за базовой и экспериментальными системами очистки, полученных в лабораторных и полевых условиях. Количество сравниваемых значений – 17. Коэффициент корреляции, рассчитанный в программе М. Excel, равен $r_{xy} = 0,97 \pm 0,014$.

Выполнена проверка адекватности математической модели сепарации зернового вороха сравнением теоретических и экспериментальных значений потерь зерна за базовой и экспериментальными системами очистки, полученных в лабораторных условиях. Оценку сходимости результатов проводили по F-критерию.

Проверка однородности дисперсий проведена по общепринятой методике. С увеличением средних значений потерь зерна дисперсии увеличиваются, поэтому для выполнения условия однородности дисперсий проведены преобразования вида $P_1 = \sqrt{P - 0,1}$.

Результаты проверки однородности дисперсий: дисперсия ошибки эксперимента $\sigma_p^2 = 0,0583$; дисперсия ошибки эксперимента после преобразований $\sigma_{\sqrt{P-0,1}}^2 = 0,01084$; расчётное значение критерия Кохрена $G_p = 0,220$; табличное значение $G_{0,05} = 0,223$ при уровне значимости 0,05. Гипотеза однородности дисперсий при уровне значимости 0,05 подтверждена.

Расчёт дисперсии неадекватности σ_{LF}^2 математической модели и F-критерия проводили по общепринятой методике. Результаты расчёта: дисперсия неадекватности математической модели $\sigma_{LF}^2 = 0,02114$; расчётное значение критерия $F_{рас} = 1,95$; табличное значение критерия $F_{0,05} = 2,27$ для уровня значимости 0,05. Гипотеза об адекватности модели сепарации зернового вороха подтверждена.

В шестой главе «Сравнительная технико-экономическая оценка предлагаемых технических решений» выполнен, основываясь на результатах лабораторных исследований, сравнительный анализ разработанных очисток зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах. Сравнительный анализ выполнен для следующих очисток: с решётно-винтовым сепаратором; с двухсекционным верхним решетом; с самоустанавливающимся верхним решетом; комбинированной очистки с решётно-винтовым сепаратором и самоустанавливающимся верхним решетом; с инерционным выравнивателем зернового вороха на верхнем решете; с адаптером для склонов. Сравнительную оценку очисток выполнили с помощью интегрального показателя конкурентоспособности машины k_M в соответствии с ГОСТ Р 53057-2008 «Машины сельскохозяйственные. Методы оценки конкурентоспособности». Выявлены наиболее конкурентоспособные системы очистки – комбинированная очистка с решётно-винтовым сепаратором и самоустанавливающимся верхним решетом (интегральный показатель конкурентоспособности машины равен 1,75) и очистка с адаптером для склонов (1,76).

Очистка с решётно-винтовым сепаратором испытана в хозяйстве «Санниковский» Алтайского края и на Алтайской машиноиспытательной станции. Сравнительные лабораторно-полевые испытания проведены на зерноуборочном комбайне третьего класса СК-5М, в котором вместо серийной очистки установлена очистка с решётно-

винтовым сепаратором. Испытаниями установлено: дробление и содержание сорной примеси в бункерном зерне находятся в одних пределах как на испытываемом, так и на сравниваемом комбайне; показатели потерь зерна за очисткой по испытываемому комбайну ниже, чем у сравниваемого, при оптимальной загрузке в 3,4 раза.

Сравнительные лабораторно-полевые испытания системы очистки с адаптером для склонов проведены в фермерском хозяйстве Калманского района Алтайского края. Испытания проводили на зерноуборочном комбайне «Енисей 1200-1». На рисунке 17 показан адаптер очистки, установленный в зерноуборочный комбайн. Среднее содержание соломиистой фракции в зерновом ворохе при проведении полевых испытаний $S=53,0\%$ ($\sigma_C=4,5\%$). Испытания проведены при движении комбайна преимущественно вверх по склону с одновременным креном вправо. Характеристика поля: при испытаниях сравниваемого комбайна – уклон поля $\alpha_M=5,1^\circ$, среднеквадратическое отклонение $\sigma_\alpha=0,8^\circ$; испытания с адаптером для склонов – $\alpha_M=5,3^\circ$, $\sigma_\alpha=0,8^\circ$.

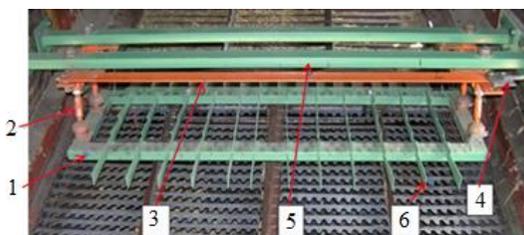


Рисунок 17 – Адаптер системы очистки, установленный в зерноуборочном комбайне «Енисей 1200-1»: 1 – рама решета; 2 – подвеска; 3 – поперечная тяга; 4 – тяга механизма изменения амплитуды и направлений колебаний решета; 5 – поперечная балка; 6 – гребенка решета

Испытания проведены на одном комбайне в следующих комплектациях и настройках: 1 – серийная очистка; 2 – очистка с адаптером, решето которого совершало только продольные колебания (амплитуда поперечных колебаний решета $A_Y=0$ мм); 3 – очистка с адаптером, решето которого совершало продольные и поперечные колебания ($A_Y=15$ мм).

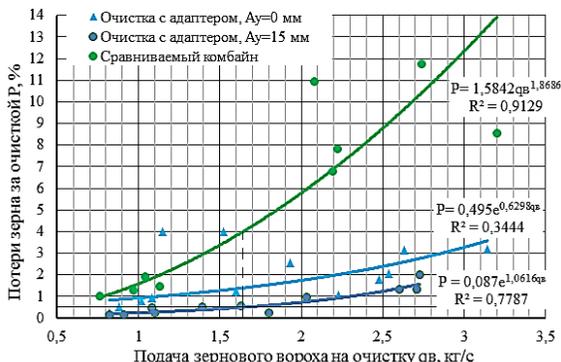


Рисунок 18 – Результаты сравнительных полевых испытаний зерноуборочного комбайна с адаптером для склонов

Установленный уровень потерь зерна (0,5 %) за системой очистки с адаптером для склонов достигнут при подаче зернового вороха на очистку 1,64 кг/с. При этой же

Испытаниями выявлено, что дробление и содержание сорной примеси в бункерном зерне находились в одних пределах как на испытываемом, так и на сравниваемом комбайне. Использование адаптера для склонов в зерноуборочном комбайне позволило значительно снизить потери зерна в сравнении с базовой конструкцией (рисунок 18).

подаче зернового вороха потери зерна за системой очистки сравниваемого комбайна составили 4,0 %.

Годовая экономия совокупных затрат денежных средств от эксплуатации комбайна с адаптером для склонов за счёт снижения потерь зерна равна 65,6 тыс. руб, а срок окупаемости – 0,12 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уборка зерновых культур на склонах зерноуборочными комбайнами равнинного исполнения сопровождается повышенным уровнем потерь зерна, причём основная доля потерь приходится на систему очистки, а основной причиной является увеличение неравномерности распределения зернового вороха на верхнем решете при поперечном наклоне молотилки. Система очистки в этих условиях становится лимитирующим рабочим органом, нарушается принцип гармоничности конструкции комбайна. Повышение эффективности работы комбайна на склонах до 10° путём снижения потерь зерна целесообразно осуществить за счет совершенствования предварительной сепарации зернового вороха и снижения неравномерности его распределения на верхнем решете системы очистки.

2. Разработанные математические модели движения зернового вороха по решетку в условиях работы комбайна на склонах и программы для ЭВМ для их реализации позволили определить:

- кинематические параметры движения зернового вороха по поверхности жалюзийного решета: при изменении угла продольного наклона от 0 до 10° при движении комбайна вверх по склону скорость зернового вороха увеличивается с 0,43 до 0,50 м/с (на 16,3 %), а при движении вниз – уменьшается на 4,7 %; при изменении поперечного наклона молотилки от 0 до 10° угол отклонения вектора скорости зернового вороха от продольного направления при скорости воздушного потока 3,5 м/с увеличивается до $5,8^\circ$, при отсутствии воздушного потока – до $9,8^\circ$;

- возможность сохранения условий для прохода зерна и схода солоmistых примесей, находящихся на жалюзи решета, путём изменения угла открытия жалюзи при изменении продольного наклона молотилки при движении комбайна вверх по склону – $\delta_J = \delta_{J0} + 0,7 \cdot \delta_K$ (здесь δ_{J0} – угол открытия жалюзи при горизонтальном положении молотилки; δ_K – угол продольного наклона молотилки);

- зависимости угла отклонения вектора скорости зернового вороха от продольного направления от амплитуды поперечных колебаний жалюзийного решета и параметров колебаний жалюзийного решета в поперечном направлении, при которых зерновой ворох, контактирующий с решетом, не смещается в сторону уклона: при поперечном наклоне молотилки 6° – 1,7 мм, при наклоне 8° – 2,2 мм, при наклоне 10° – 2,8 мм;

- зависимости угла отклонения скорости зернового вороха от продольного направления от амплитуды поперечных колебаний пальцевого решета; параметры колебаний пальцевого решета в поперечном направлении, при которых зерновой ворох, контактирующий с гребёнками решета, не смещается в сторону уклона: при поперечном наклоне молотилки 6° – угол между направлением колебаний решета и продольной осью комбайна $5,5^\circ$, амплитуда – 3 мм; при наклоне 8° – $7,5^\circ$ и 4 мм; при наклоне 10° – $9,5^\circ$ и 5 мм.

3. Разработанная математическая модель сепарации зернового вороха на верхнем решете системы очистки в условиях работы комбайна на склонах, включающая переменный по длине решета дискретный коэффициент вариации толщины слоя зернового вороха, методика оценки неравномерности распределения зернового вороха на верхнем решете и программы для ЭВМ для их реализации позволили выполнить сравнительный анализ конструктивно-технологических решений системы очистки. Перспективными технологическими операциями, обеспечивающими снижение потерь зерна при работе комбайна с поперечным наклоном молотилки, являются: предварительная сепарация зернового вороха; снижение неравномерности подачи зернового вороха на верхнее решето; стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете; выравнивание зернового вороха в начале и на всей поверхности верхнего решета. Наибольший эффект при поперечном наклоне молотилки может быть достигнут при совмещении технологических операций – снижение потерь зерна за системой очистки более чем в 5 раз.

4. Разработаны конструктивные решения системы очистки, обеспечивающие выполнение перспективных технологических операций, обоснованы параметры для зерноуборочных комбайнов 3 и 4 классов:

- решётно-винтовой сепаратор, обеспечивающий предварительную сепарацию зернового вороха и снижение неравномерности подачи на верхнее решето: количество шнеков – четыре; шаг и диаметр шнеков – 0,15 м; частота вращения шнеков 330 мин⁻¹; диаметр отверстий решета 12 мм; ширина и шаг перемешивающих устройств – 60 и 100 мм; скорость воздушного потока на решете 3,7 м/с;

- устройства, обеспечивающие стабилизацию распределения зернового вороха на верхнем решете – двухсекционное решето, нижняя секция которого при поперечном наклоне комбайна может быть повернута относительно оси молотилки на угол 12°, и самоустанавливающееся верхнее решето;

- система очистки с инерционным выравниванием толщины зернового вороха за счёт дополнительных колебаний верхнего решета в поперечном направлении: рациональная амплитуда поперечных колебаний решета, обеспечивающая выравнивание толщины слоя зернового вороха к концу решета при поперечном наклоне молотилки 6° – 15 мм; 8° – 20 мм; 10° – 25 мм;

- адаптер для склонов, устанавливаемый вместо пальцевой решётки стрясной доски и предназначенный для инерционного выравнивания зернового вороха в передней части верхнего решета: длина пальцевого решета – 0,4 м; амплитуда поперечных колебаний решета при поперечном наклоне молотилки 6° – 15 мм, 8° – 18 мм, 10° – 21 мм.

5. Сравнительными лабораторными испытаниями установлено, что в разработанных системах очистки уровень потерь зерна ниже в сравнении с базовой очисткой. При поперечном наклоне молотилки 8° и подаче зернового вороха 2,9 кг/с потери зерна в базовой очистке составили 1,17 %. Наибольшее снижение потерь зерна при указанных условиях достигнуто:

- в комбинированной системе очистки с решетно-винтовым сепаратором и самоустанавливающимся решето – 0,20 %;

- в системе очистке с выравниванием зернового вороха путём дополнительных колебаний решета в поперечном направлении с амплитудой 20 мм – 0,12 %;

- в системе очистки с адаптером для склонов, при шаге гребёнок 75 мм, длине пальцевого решета 0,4 м и амплитуде поперечных колебаний решета 18 мм – 0,21 %.

При уровне потерь зерна 0,5 % и поперечном наклоне молотилки 8° подача зернового вороха в сравнении с базовой очисткой превышает:

- в системе очистки с инерционным выравнивателем зернового вороха – в 2,1 раза;

- в комбинированной очистке с решётно-винтовым сепаратором и самоустанавливающимся решетом – в 2,4 раза;

- в системе очистки с адаптером для склонов – в 2,4 раза.

В сравнении с результатами лабораторных исследований математическая модель сепарации зернового вороха адекватна по F-критерию при уровне значимости 0,05. Коэффициент корреляции между теоретическими и экспериментальными значениями потерь зерна, полученных в лабораторных и полевых условиях, равен $0,97 \pm 0,014$.

6. Выявлены наиболее конкурентоспособные системы очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах – комбинированная очистка с решётно-винтовым сепаратором и самоустанавливающимся верхним решетом (показатель конкурентоспособности машины равен 1,75) и очистка с адаптером для склонов (1,76).

Сравнительными лабораторно-полевыми испытаниями зерноуборочного комбайна с решётно-винтовым сепаратором, проведёнными на равнине, установлено, что при оптимальной загрузке потери зерна за экспериментальной очисткой ниже, чем у сравниваемого, в 3,4 раза.

Сравнительными лабораторно-полевыми испытаниями системы очистки с адаптером для склонов установлено, что потери зерна при оптимальной загрузке ниже, чем у сравниваемого, более чем в 6 раз. Годовая экономия совокупных затрат денежных средств от эксплуатации одного комбайна с адаптером для склонов равна 66,9 тыс. руб. при сроке окупаемости менее одного сезона.

Рекомендации производству

При разработке новых конструктивно-технологических решений системы очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах, использовать разработанные модели движения и сепарации зернового вороха и программы для ЭВМ для их реализации.

При разработке новых конструкций зерноуборочных комбайнов для устойчивого выполнения технологического процесса сепарации зернового вороха целесообразно установить вместо стрясной доски решётно-винтовой сепаратор и предусмотреть возможность установки в виде опции самоустанавливающегося решето для уборки зерновых культур на склонах.

Для снижения потерь зерна при уборке зерновых культур на склонах в базовых конструкциях зерноуборочных комбайнов предусмотреть возможность установки адаптера для склонов.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Выполнить имитационное моделирование системы очистки при работе зерноуборочного комбайна на склонах с применением разработанных математических моделей движения и сепарации зернового вороха, результатов экспериментальных исследований.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Сороченко, С.Ф.** Математическая модель сепарации зерна в системе очистки косогорного зерноуборочного комбайна / С.Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – №12 (158). – С. 134-140.
2. **Сороченко, С.Ф.** Математическая модель движения зернового вороха по решетку 3D-очистки зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко / Научная жизнь. – 2017. – №8. – С. 6-14.
3. Ситников, А.А. Сравнительный анализ систем очистки косогорного зерноуборочного комбайна / А. А. Ситников, **С.Ф. Сороченко**, В.А. Дрюк // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31. – №3. – С. 35-38.
4. **Сороченко, С.Ф.** Математическая модель движения зернового вороха по решетку адаптера очистки зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – №12(146). – С.131-138.
5. **Сороченко, С.Ф.** Конкурентоспособность зерноуборочных комбайнов, предназначенных для работы на склонах / С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – №9 (143). – С. 158-164.
6. **Сороченко, С.Ф.** Исследование движения компонентов зернового вороха по решетку зерноуборочного комбайна при уборке зерновых культур на склонах / С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – №8 (142). – С. 162-168.
7. **Сороченко, С.Ф.** Модель сепарации зерна в системе очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко // Ползуновский вестник, 2014. – №4/2. – С. 64-69.
8. **Сороченко, С.Ф.** Результаты лабораторных исследований адаптера системы очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах / С. Ф. Сороченко, А. В. Рязанов // Ползуновский вестник. – 2012. – №1/1. – С. 282-285.
9. **Сороченко, С.Ф.** Адаптер для работы на склонах / С. Ф. Сороченко, А. В. Рязанов // Сельский механизатор. – 2010. – №5. – С. 6.
10. **Сороченко, С.Ф.** Устройство для равномерного распределения зернового вороха на решетке зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко, А. В. Рязанов, В. А. Дрюк // Ползуновский вестник. – 2009. – №1-2. – С. 179-182.
11. **Сороченко, С.Ф.** Результаты лабораторно-полевых испытаний комбайна СК-5М «Нива» с экспериментальной очисткой / С. Ф. Сороченко, В. Ф. Семёнов, С. В. Терёхин // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 1992. – №3. – С. 129-131.

Авторское свидетельство, патенты и свидетельства на программу для ЭВМ

12. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2015610315. Расчёт параметров системы очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Самойлов С.С.; правообладатель АлтГТУ. – дата гос. регистрации: 12.01.2015.
13. Пат. на полезную модель 111964 РФ, МПК А01F 12/44. Система очистки зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Рязанов А.В.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №2011133975/13; заявл. 12.08.2011; опубл. 10.01.2012.

14. Пат. 2343686 РФ, МПК A01F 12/44. Устройство для распределения зернового вороха на решетке зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Дрюк В.А., Рязанов А.В.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №2007123018/12; заявл. 19.06.2007; опубл. 20.01.2009, Бюл. №2.

15. Пат. 2275787 РФ, МКИ A01F 12/44. Решетный стан очистки зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Рязанов А.В.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №2004125547/12; заявл. 20.08.2004; опубл. 10.05.2006, Бюл. №13.

16. Пат. 2195804 РФ, МКИ⁷ A01F12/44. Решетный стан очистки зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Коптев А.А.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №2001100607/13; заявл. 09.01.2001; опубл. 10.01.2003, Бюл. №1.

17. Пат. 2177683 РФ, МКИ⁷ A01F12/44. Решетный стан очистки зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Дрюк В.А.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №2000114100/13; заявл. 02.06.2000; опубл. 10.01.2002, Бюл. №1.

18. Пат. 2137349 РФ, МКИ⁶ A01F12/44. Очистка зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Антропов А.Н.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №98111124/13; заявл. 08.06.98; опубл. 20.09.99, Бюл. №26.

19. Пат. 2134503 РФ, МКИ⁶ A01F12/44. Решетный стан очистки зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Киреев И.В., Кулаков А.Ю.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №98103605/13; заявл. 27.02.98; опубл. 20.08.99, Бюл. №23.

20. Пат. 2101909 РФ, МКИ⁶ A01F12/44. Сепаратор зернового вороха / **Сороченко С.Ф.**; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №96102625/13; заявл. 13.02.96; опубл. 20.01.98, Бюл. №2.

21. Пат. 2095965 РФ, МКИ⁶ A01F12/44. Решетный стан очистки зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Фролов А.М.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №95118986/13; заявл. 09.11.95; опубл. 20.11.97, Бюл. №32.

22. Пат. 2073411 РФ, МКИ⁵ A01F12/44. Решетный стан очистки зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Фролов А.М., Семенов В.Ф., Колесников А.Г.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №94028920/15; заявл. 01.08.94; опубл. 20.02.97, Бюл. №5.

23. Пат. 2058710 РФ, МКИ⁵ A01F12/44. Решетный стан очистки зерноуборочного комбайна / **Сороченко С.Ф.**, Семенов В.Ф., Эбель В.А., Терехин С.В.; заявитель и патентообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – №93037767/15; заявл. 22.07.93; опубл. 27.04.96, Бюл. №12.

24. Пат. 2038739 РФ, МКИ⁵ A01F12/44. Сепаратор зернового вороха / **Сороченко С.Ф.**, Семенов В.Ф.; заявитель и патентообладатель Алт. политехн. ин-т им. И.И. Ползунова. – №5048109/15; заявл. 16.06.92; опубл. 09.07.95, Бюл. №19.

25. Пат. 2002401 РФ, МКИ⁵ A01F12/44. Молотилка / **Сороченко С.Ф.**, Семенов В.Ф.; заявитель и патентообладатель Алт. политехн. ин-т им. И.И. Ползунова. – №4906170/15; заявл. 28.01.91; опубл. 15.11.93, Бюл. №41-42.

26. а.с. 1701165 СССР, МКИ⁵ A01F12/44. Зерноуборочная машина / **С.Ф. Сороченко**, В.Ф. Семенов, С.В. Терехин, Р.В. Черняев, В.П. Шадрин. – №4711747/15; заявл. 29.06.89; опубл. 30.12.91; Бюл. №48.

**Публикации в журналах, сборниках научных трудов,
материалах конференций**

27. **Сороченко, С.Ф.** Система очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах / С.Ф. Сороченко // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2017): материалы V Международной научно-практической конференции (с. Дивноморское, 11-15 сентября 2017 г.); ред. Д. В. Рудой[и др.]; Донской гос. техн. ун-т.– Ростов-на-Дону: ДГТУ-Принт, 2017. – С. 285-289.
28. Самойлов, С.С. Оценка конструкции системы очистки зерноуборочного комбайна, работающего на склонах / С.С. Самойлов, **С.Ф. Сороченко** // Горизонты образования. Научно-образовательный журнал АлтГТУ. – 2015. – Вып. 17 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2015.pdf.
29. Рязанов, А.В. Параметры адаптера системы очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах / А. В. Рязанов, **С.Ф. Сороченко** // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы I всероссийской науч.-техн. конференции; под ред. к.т.н., профессора А. Н. Площаднова. – Рубцовск : Рубцовский индустриальный ин-т, 2011. – С. 482-486.
30. **Сороченко, С.Ф.** Адаптер системы очистки для работы зерноуборочного комбайна на склонах / С.Ф. Сороченко, А.В. Рязанов // Модернизация сельскохозяйственного производства: проблемы, задачи и пути их решения: сб. науч. тр.; под общ. ред. С. В. Белоусова, С. Ф. Сороченко, В. И. Беляева. – Барнаул : Изд-во АНИТИМ, 2010. – Вып. 1. – С. 79-81.
31. Рязанов, А.В. Адаптер системы очистки для работы зерноуборочного комбайна на склонах / А. В. Рязанов, **С.Ф. Сороченко** // Ползуновский альманах. – 2009. – №3. – Т. 2. – С. 65-67.
32. Дрюк, В.А. Математическое моделирование движения зернового вороха с динамическим разравниванием по решетку системы очистки зернокомбайна / В.А. Дрюк, **С.Ф. Сороченко** // Вестник ДГТУ. – 2008. – Т. 8. – №2. – С. 113-119.
33. Рязанов, А. В. Результаты полевых испытаний адаптера очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах / А. В. Рязанов, **С. Ф. Сороченко** // 5-я Всероссийская науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Наука и молодежь – 2008. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/publication/5/release/27/attachment/2/>.
34. Рязанов, А.В. Результаты предварительных испытаний зерноуборочного комбайна с адаптером очистки для работы на склонах / А.В. Рязанов, **С.Ф. Сороченко** // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей; под ред. С. А. Коростелева // Российская Академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 22-24.
35. **Сороченко, С.Ф.** Уборка зерновых на склонах без потерь / С.Ф. Сороченко, А. В. Рязанов // Земля и бизнес. – 2007. – №11. – С. 52-53.
36. **Сороченко, С.Ф.** Один из способов повышения производительности зерноуборочных комбайнов / С.Ф. Сороченко // Мой Алтай: село и город; журнал агропромышленного комплекса Алт. края. – 2006. – №1. – С. 29.
37. **Сороченко, С.Ф.** К определению параметров устройства динамического разравнивания зернового вороха системы очистки зернокомбайна / С.Ф. Сороченко // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей; под ред. С. А. Коростелева; Российская Академия транспорта; АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 81-85.

38. **Сороченко, С.Ф.** Система очистки косогорного зерноуборочного комбайна / С.Ф. Сороченко, В.О. Ганжа // Мой Алтай: село и город; журнал агропромышленного комплекса Алт. края. – 2005. – №11. – С. 35-36.
39. **Сороченко, С.Ф.** Система очистки косогорного зерноуборочного комбайна с решётно-винтовым сепаратором и самоустанавливающимся верхним решетом / С.Ф. Сороченко // Ползуновский вестник. – 2005. – №2. – С. 170-172.
40. **Сороченко, С.Ф.** Влияние поперечного крена молотилки зерноуборочного комбайна на неравномерность подачи зернового вороха / С.Ф. Сороченко // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей; под ред. В.А. Дружинина; Российская Академия транспорта; АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2004. – С. 66-78.
41. **Сороченко, С.Ф.** Система очистки косогорного зерноуборочного комбайна / С.Ф. Сороченко // Мой Алтай: село и город. – 2004. – №26, 27. – С. 27.
42. **Сороченко, С.Ф.** Определение приведенного коэффициента трения движения соломистых частиц зернового вороха по решетку / С.Ф. Сороченко, В. А. Дрюк, А. Г. Подлеснов // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей; под ред. В. А. Дружинина; Российская Академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2004. – С. 62-65.
43. **Сороченко, С.Ф.** Повышение эффективности работы косогорного зернокомбайна за счет выравнивания системы очистки / С.Ф. Сороченко // Ползуновский альманах. – 2004. – №4. – С. 140-141.
44. Дрюк, В. А. Возможности увеличения намолота зерна в Алтайском крае / В. А. Дрюк, **С.Ф. Сороченко** // Мой Алтай: село и город; журнал агропромышленного комплекса Алт. края. – 2004. – №5. – С. 17.
45. **Сороченко, С.Ф.** Повышение эффективности работы зерноуборочных комбайнов на склонах / С.Ф. Сороченко // Продукция предприятий Алтайского края для АПК России: тезисы докл. всероссийской конференции. – Барнаул : Администрация Алтайского края, 2003. – С. 31-33.
46. **Сороченко, С.Ф.** Повышение пропускной способности очистки за счет перераспределения воздушного потока при наличии поперечного крена зернокомбайна / С.Ф. Сороченко // Ползуновский Альманах. – 2003. – №3-4. – С. 95-97.
47. Семенов, В. Ф. Повышение эффективности работы зерноуборочного комбайна / В.Ф. Семенов, **С.Ф. Сороченко** // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей; под ред. В. А. Дружинина; Российская Академия транспорта; АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2003. – С. 140-142.
48. **Сороченко, С.Ф.** Распределение зернового вороха по решетку системы очистки зернокомбайна при наличии поперечного крена / С.Ф. Сороченко, В.А. Дрюк // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей, Ч. II; под ред. А. Л. Новоселова; Академия транспорта РФ, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 105-109.
49. **Сороченко, С.Ф.** Математическая модель сепарации зерна в модернизированной системе очистки комбайна, работающего на склонах / С.Ф. Сороченко, В.А. Дрюк // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штампового производств: сб. науч. тр.; под ред. В. А. Маркова и А. М. Гурьева. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 317-318.
50. **Сороченко, С.Ф.** Экспериментальные исследования движения вороха по наклонённому решетку зернокомбайна при наложении продольных и поперечных ко-

лебаний / С.Ф. Сороченко, В.А. Дрюк // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей; Ч.2; Академия транспорта РФ, АлтГТУ им. И.И. Ползунова – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2001. – С. 57-59.

51. **Сороченко, С.Ф.** К определению режимов движения вороха по решетку зернокомбайна при наложении продольных и поперечных колебаний / С.Ф. Сороченко, В. А. Дрюк // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Приложение к журналу Ползуновский альманах. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2001. – С. 124-126.

52. **Сороченко, С.Ф.** Исследование системы очистки зернокомбайна с самоустанавливающимся решетом и решётно-винтовым сепаратором для работы на склонах / С. Ф. Сороченко, А. М. Давыдов, Е. Е. Костоглодов // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: сб. статей; под ред. А. Л. Новоселова; Академия транспорта РФ, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – С. 96-101.

53. **Сороченко, С.Ф.** Определение параметров дополнительных колебаний решета зернокомбайна, работающего при поперечном крене / С.Ф. Сороченко, С.В. Белашев, В.А. Дрюк // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. статей; Ч.1; под ред. А. Л. Новоселова; Академия транспорта РФ, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. – С. 120-125.

54. Семенов, В.Ф. Очистка зернокомбайна для работы на пологих склонах / В.Ф. Семенов, **С.Ф. Сороченко**, А.М. Фролов // Труды Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова; Вып. 6; Техника и технология зерна и плодов Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1996. – С. 168-174.

Публикации в других изданиях

55. Сороченко, С.Ф. Эмпирическое моделирование объектов сельскохозяйственного машиностроения: учеб. пособие / С.Ф. Сороченко. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2010. – 95 с.

56. Исследование процессов двухпоточной очистки зерна и разработка оборудования, обеспечивающего снижение потерь зерна на пологих склонах (заключительный): отчет о НИР / В.Ф. Семенов, **С.Ф. Сороченко**, Ф.И. Салеев, А.М. Фролов. – Барнаул, 1995. – 54 с. – ВНИЦентр, №ГР 01960001352, инв. №0296000907.

Подписано в печать 14.02.2018. Формат 60×84 1/16.

Печать - ризография. Усл.п.л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 19/2018.

**Издательство Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.**

Лицензии: ЛР № 020822 от 21.09.98 года, ПЛД № 28-35 от 15.07.97

Отпечатано в ЦОП АлтГТУ 65638, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46



