

*На правах рукописи*



**НИКИТИН Виктор Васильевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ  
ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА И ПАРАМЕТРОВ ЕГО  
РАБОЧИХ ОРГАНОВ**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**доктора технических наук**

**Брянск – 2021**

Работа выполнена на кафедре технического сервиса федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

**Научный консультант**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор  
**Ожерельев Виктор Николаевич.**

**Официальные оппоненты:**

**Алдошин Николай Васильевич,**

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин;

**Ловчиков Александр Петрович,**

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие»;

**Ряднов Алексей Иванович,**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Эксплуатация и технический сервис машин в АПК».

**Ведущая организация**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина».

Защита состоится 23 сентября 2021 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте [www.vsau.ru](http://www.vsau.ru) («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=8639>.

Автореферат разослан 20 августа 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В указе президента России «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации» от 7 июля 2011 года № 899, поставлена задача на реализацию процессов энергосбережения при производстве сельскохозяйственной продукции.

Производство зерна включает в себя достаточно большое количество технологических операций. Самой трудоемкой и энергозатратной из них является уборка зерна, на долю которой приходится до 40% затрат живого труда и до 35% расхода горюче-смазочных материалов. Снизить затратность процесса уборки зерновых культур можно путем применения комбайнового очеса. В результате этого в 1,5-2 раза уменьшается поступление хлебной массы в комбайн, что приводит к экономии до 70% энергии, которую современная уборочная машина тратит на деформацию соломы в молотилке. Производительность комбайна повышается в 1,3-1,5 раза, а расход топлива снижается на 20-25%. Себестоимость зерна уменьшается при этом на 25-30%.

Однако ввиду того, что хлебная масса, полученная в результате очеса, содержит до 85% свободного зерна, то поступление его в молотильную камеру зерноуборочного комбайна является нецелесообразным. Это обусловлено тем, что наблюдается повышенное дробление (до 8%) свободного зерна рабочими органами молотилки, которое приводит к снижению его всхожести и стойкости при хранении. Таким образом, изыскание технических возможностей по минимизации дробления свободного зерна рабочими органами молотилки (при очесе растений на корню) является одной из актуальных научных проблем.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет» по направлению: «Разработка ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов производства сельскохозяйственной продукции, технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники» и грантом Министерства сельского хозяйства РФ по теме: «Изучение процессов энергосбережения при уборке зерна и разработка соответствующей стратегии энергосбережения».

**Степень разработанности темы исследований.** Изучением молотильных устройств занимались многие исследователи как у нас в стране, так и за рубежом. Одним из основоположников теории обмолота является академик В.П. Горячкин. Среди его ближайших учеников, соратников и последователей следует отметить труды И.Ф. Василенко, М.А. Пустыгина, Э.И. Липкович и Н.И. Кленина, всесторонние исследования которых были направлены на изучение энергетических и качественных показателей работы (недомолот и дробление зерна) молотильного устройства.

Большой вклад в разработку новых и совершенствование существующих технологий уборки зерновых культур внесли В.Е. Артемов, Н.В. Алдошин, В.Е. Бердышев, А.И. Бурьянов, И.В. Горбачев, Э.В. Жалнин, Х.И. Изаксон, А.П. Ловчиков, С.А. Родимцев, А.И. Ряднов, Г.Ф. Серый, А.К. Скворцов, Е.В. Труфляк, О.А. Федорова, В.М. Халанский и другие.

Вопросами очеса растений на корню занимались Н.В. Алдошин, А.И. Бурьянов, М.Н. Данченко, Э.В. Жалнин, Н.И. Кленин, В.И. Кравчук, А.С. Кушнарев, А.Н. Леженкин, М.М. Мороз, Л.В. Погорелов, В.Ю. Савин, Д.В. Скрипка, М.А. Федин, П.А. Шабанов и другие. Основной объем научных исследований посвящен разработке очесывающих устройств, определению их оптимальных кинематических параметров и режимов работы на качество уборки урожая. Однако применение данного способа уборки сдерживается чрезмерным дроблением свободного зерна рабочими органами молотилки.

Процесс сепарации свободного зерна подробно рассмотрен в научных работах С.А. Алферова, А.В. Бутовченко, В.П. Горячкина, В.М. Дринча, Ю.И. Ермольева, В.Г. Корнеева, Г.Г. Маслова, В.И. Оробинского, А.Н. Пугачева, А.П. Тарасенко, Н.П. Шабанова и других. Между тем материал, на котором вышеуказанные авторы проводили свои научные исследования, существенным образом отличается от свойств очесанного зернового вороха.

Несмотря на существенный вклад при разработке и совершенствовании технологий уборки урожая ряд вопросов обмолота и сепарации свободного зерна исследован недостаточно. В частности отсутствуют сведения об исследовании энергоемкости обмолота колосовой части урожая при поперечном колебательном характере нагружений связей, а также обосновании геометрических и кинематических параметров сепарирующих устройств, обеспечивающих предварительное выделение свободного зерна из очесанного зернового вороха до его поступления в молотильную камеру.

**Цель работы:** повышение энергоэффективности машинной уборки зерновых культур и качества получаемого зерна путем совершенствования технологической схемы зерноуборочного комбайна и параметров его рабочих органов.

Для достижения поставленной цели нами была выдвинута **научная гипотеза** о возможности снижения энергоемкости технологического процесса машинной уборки зерновых культур и степени дробления зерна за счет поперечного колебательного воздействия на связи зерна с колосом и удаления из очесанного зернового вороха свободного зерна до поступления хлебной массы в молотильный аппарат.

С учетом сформулированной цели и выдвинутой научной гипотезы решены следующие **задачи исследования:**

- 1) уточнить параметры очесанного зернового вороха с точки зрения перспективы их влияния на технологический процесс предварительной сепарации свободного зерна и обмолота оставшейся колосовой части урожая;

2) выявить наиболее перспективные к практическому использованию резервы уменьшения энергоемкости молотильного барабана и дробления свободного зерна;

3) разработать конструкцию молотильного устройства, реализующего поперечный колебательный характер нагружения связей зерна с колосом, провести экспериментальные исследования по определению энергоемкости процесса, обосновать рациональные параметры и режимы работы оборудования;

4) разработать математическую модель процесса сепарации свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна;

5) оценить возможность сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха до поступления его в молотильное устройство, генерировать необходимые для осуществления этого процесса технические решения и установить их рациональные параметры;

6) разработать методику расчета и оценить экономию энергозатрат на привод молотильного барабана в связи с предварительным удалением из очесанного зернового вороха свободного зерна.

**Объект исследования:** технологический процесс машинной уборки зерновых культур.

**Предмет исследования:** закономерности процесса взаимодействия рабочих органов зерноуборочного комбайна с очесанным зерновым ворохом.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

- установлены параметры очесанного зернового вороха, отличающиеся наличием выявленных при этом математических зависимостей, характеризующих статистическое распределение его показателей;

- разработана конструкция наклонной камеры зерноуборочного комбайна, отличающаяся тем, что ее днище снабжено продольными отверстиями с размерами  $160 \times 8$  мм при суммарной площади их «живого сечения» 60%, а под ним размещено выводящее устройство для подачи свободного зерна на транспортную доску;

- предложено конструктивное решение молотильного устройства, отличающееся поперечным колебательным воздействием на связи зерна с колосом, и установлены его рациональные параметры;

- получены аналитические зависимости, составляющие математическую модель процесса сепарации свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна, отличающиеся учетом формы зерновки и вариантов послонного движения вороха;

- теоретически обоснованы и экспериментально доказаны рациональные параметры разработанных устройств, предназначенных для предварительной сепарации очесанного зернового вороха;

- разработана методика расчета снижения энергоемкости привода молотильного барабана в связи с предварительным удалением из очесанного

зернового вороха свободного зерна, отличающаяся учетом влияния на составляющие энергозатрат объемов всех компонентов хлебной массы.

**Теоретическую значимость** имеют:

- аналитически и экспериментально доказанные положения о возможности адаптации конструкции зерноуборочного комбайна к физико-механическим свойствам очесанного зернового вороха посредством удаления из него свободного зерна до поступления в молотильное устройство;
- математическая модель процесса сепарации свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна;
- закономерность изменения энергоемкости выделения зерна из колоса при поперечном колебательном характере его нагружения в зависимости от параметров процесса;
- зависимость энергозатрат на привод молотильного барабана при выделении свободного зерна до поступления очесанного вороха в молотильную камеру зерноуборочного комбайна от параметров очесанного вороха.

**Практическую значимость** составляют:

- технологическая схема зерноуборочного комбайна, предусматривающая предварительное выделение свободного зерна из очесанного зернового вороха до его поступления в молотильный аппарат;
- конструктивные решения, позволяющие осуществить предварительное выделение свободного зерна из очесанного зернового вороха до его поступления в молотильное устройство;
- практические рекомендации по выбору параметров устройств, позволяющих выделить из очесанного зернового вороха свободное зерно до его поступления в молотильную камеру;
- лабораторно-измерительный комплекс для измерения усилия, необходимого для выделения зерна из колоса при поперечном колебательном воздействии на него.

**Методология и методы исследования.** Решение проблемы реализовано с применением методов теоретических и экспериментальных исследований. При проведении лабораторных и полевых исследований использованы классические и частные методики с применением математического моделирования и математической статистики, а также современных приборов, вычислительной техники и тензометрического оборудования. Результаты экспериментов были получены и обработаны при помощи пакетов стандартных компьютерных программ: «LabVIEW» «STATISTICA», «Excel», «Mathcad», «КОМПАС-3D».

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) параметры очесанного зернового вороха и статистические характеристики его компонентов, позволяющие адаптировать конструкцию зерноуборочного комбайна к очесу растений на корню;

2) технические решения, позволяющие уменьшить энергоемкость молотильного барабана и степень дробления зерна при работе с очесанным зерновым ворохом;

3) зависимости, устанавливающие взаимосвязь между энергоемкостью процесса выделения зерновки из колоса при поперечном колебательном характере нагружения ее связей с его стержнем и конструктивно-технологическими параметрами рабочих органов;

4) математическая модель процесса сепарации свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна, позволяющая подтвердить возможность осуществления сепарации свободного зерна и выявить рациональные параметры рабочих органов;

5) закономерности процесса сепарации свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры и на сетчатом транспортере, установленном перед молотильным барабаном зерноуборочного комбайна, подтверждающие работоспособность конструкций и достоверность выбора их параметров;

6) методика расчета энергоемкости привода молотильного барабана по приведенным объемам очесанного вороха, подтверждающая целесообразность внедрения разработок в конструкцию зерноуборочного комбайна.

**Степень достоверности результатов,** полученных при теоретических исследованиях, подтверждаются данными лабораторных экспериментов. Необходимая глубина анализа и достоверность выводов достигается применением общенаучных методов и приемов. Эмпирическая база работы сформирована на основе опытных данных, полученных в ходе проведения исследований в лабораторных и полевых условиях.

Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными в пределах 7% позволяет говорить о правильности и адекватности предложенных математических моделей и не противоречит фактам, известным из специальной литературы.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения работы доложены, обсуждены и одобрены на международных конференциях ФГБОУ ВО Брянский ГАУ (2012-2020 гг.), ФГБОУ ВО Воронежского ГАУ (2015-2018 гг.), Гомельского ТУ имени П.О. Сухого (2018 г.), ФГБОУ ВО Тамбовский ГТУ (2020 г.), научно-технического центра комбайностроения ОАО «Гомсельмаш» (2017-2020 гг.), Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (2019 г.), онлайн-конференции аспирантов и молодых ученых, посвященной Дню Российской науки (2015 г.), и на научно-техническом совете Министерства сельского хозяйства РФ (2019 г.). Результаты научных исследований отмечены двумя серебряными медалями Всероссийской агропромышленной выставки «Золотая осень» и дипломами региональных, областных и международных конкурсов. В 2018 году научная разработка поддержана грантом Министерства сельского хозяйства РФ.

Результаты исследований внедрены в ЗАО СП «Брянсксельмаш», ПАО «Пензмаш» и в хозяйствах Брянской области.

Результаты диссертационной работы применяются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов в инженерно-технологическом институте ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

**Личный вклад.** Автор принимал непосредственное участие на всех этапах работы: обоснование актуальности выбранной темы; формулировка цели и задач исследований, научной гипотезы; разработка математической модели сепарации свободного зерна на наклонной решетчатой поверхности; разработка программы и методики проведения экспериментальных исследований; проведение лабораторных и полевых экспериментов; обработка и анализ полученных данных; формулирование выводов и рекомендаций; подготовка материалов для публикаций научных работ по теме диссертации.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 45 научных работ, в том числе 14 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов докторских диссертаций, 1 научная статья – в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus, одна монография и одно учебное пособие. Результаты работы отражены в отчете по гранту Министерства сельского хозяйства РФ. Получено четырнадцать патентов РФ на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 305 наименований и 15 приложений. Диссертация изложена на 350 страницах машинописного текста, содержит 136 рисунков, 18 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, изложена степень работанности темы исследований, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, степень достоверности и апробация результатов, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Организационно-технологические аспекты механизации уборки зерна»** рассмотрено современное состояние мирового и российского комбайностроения. Представлен анализ существующих способов уборки и обеспечивающие их средства механизации. Отмечено, что одним из наиболее перспективных направлений уборки урожая является очесывание растений на корню.

Несмотря на существенный вклад в разработку очесывающих устройств и определение их оптимальных режимов работы отечественными учеными: Н.В. Алдошина, А.И. Бурьянова, М.Н. Данченко, Э.В. Жалнина, Н.И. Кленина, В.И. Кравчука, А.С. Кушнарева, А.Н. Леженкина, М.М. Мороза, Л.В. Погорелова, В.Ю. Савина, Д.В. Скрипки, П.А. Шабанова и других,



ряд вопросов взаимодействия рабочих органов молотилки с очесанной хлебной массой, исследован недостаточно. Недостаточно обоснованы и конструктивные мероприятия, направленные на предварительное выделение свободного зерна из очесанного зернового вороха до его поступления в молотильную камеру комбайна.

Во второй главе «Теоретические исследования сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха» сформулирована научная гипотеза. Выявлены перспективные направления для совершенствования алгоритма воздействия рабочих органов на убираемые растения. В частности, отмечено, что минимизировать дробление свободного зерна рабочими органами молотилки, позволит его предварительная сепарация, которую целесообразно проводить в наклонной камере зерноуборочного комбайна, имеющей перфорированное днище.

При определении длины отверстий перфорированного днища наклонной камеры, рассмотрены два варианта сепарации свободного зерна. В первом случае, перемещаясь из позиции 1 в позицию 2 (рис. 1), зерно опрокидывается в отверстие 2 одним концом. Для того чтобы зерно гарантированно прошло сквозь сепарирующее отверстие оно должно повернуться относительно точки  $A$  хотя бы на минимальный угол  $\varphi_{\min}$ , при котором крайняя правая точка продольной оси  $B$  опустится на поверхность днища наклонной камеры, приняв положение  $B_1$ .

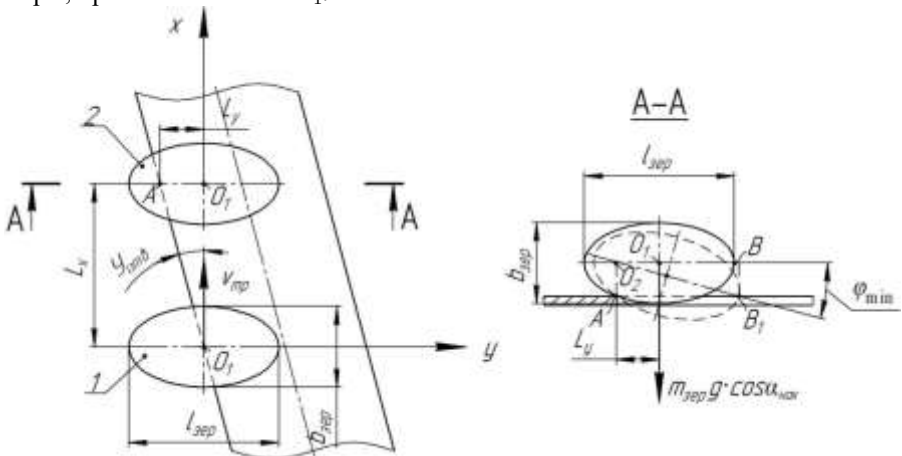


Рисунок 1 – Смещение центра масс зерна относительно боковой кромки сепарирующего отверстия при продольном перемещении по днищу наклонной камеры: 1 – исходное положение зерна; 2 – текущее положение зерна при его перемещении вдоль днища на величину  $L_x$

Решив дифференциальное уравнение, находим минимальную длину сепарирующего отверстия



$$l_{отс} = \frac{b_{зер}}{2} + v_{скр} \cdot \sqrt{\frac{l_{зер}}{g \cdot \cos \alpha_{нак}}}, \quad (2)$$

где  $v_{тр}$  – скорость плавающего транспортера наклонной камеры, м/с;

$l_{зер}$  – длина зерна, м;

$b_{зер}$  – ширина зерна, м;

$\alpha_{нак}$  – угол наклона днища наклонной камеры к горизонту, град.

Тогда при средних размерах зерна пшеницы сорта «Московская 56»: ширина  $b_{зер}=3,9$  мм, длина  $l_{зер}=6,5$  мм, скорости плавающего транспортера  $v_{скр}=3$  м/с и угле наклона днища  $\alpha_{нак}=45^\circ$ , длина сепарирующего отверстия должна составлять 0,084 м. Представленные расчеты свидетельствуют о том, что эффективная сепарация свободного зерна на днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна возможна.

При определении скорости сепарации, была сформулирована третья версия теоретической гипотезы послойного соскальзывания зернового вороха в отверстие решетчатого днища (рис. 3). При изучении характера движения соскальзывающего слоя принято, что поперечное сечение зерна имеет форму сплошного круглого и обрезанного цилиндров.

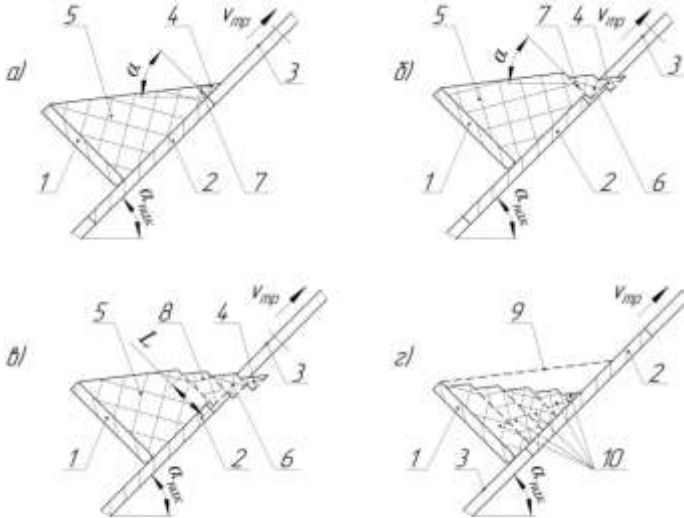


Рисунок 3 – Фазы процесса прохождения вороха сквозь отверстие решетчатой поверхности: а) – г) – стадии процесса; 1 – скребок; 2 – решетчатое днище; 3 – продольное отверстие; 4 – элементарный объем вороха; 5 – очесанный ворох; 6, 8, 10 – второй и последующие слои схода вороха; 7 – поверхность раздела; 9 – первоначальное положение очесанного вороха

Первая модель поперечного сечения характерна для зерен овса и ячменя, а вторая модель – для зерен пшеницы, ржи и тритикале.

Рассмотрены три варианта движения зерна вдоль поверхности раздела зернового вороха: качение зерновки, имеющей сплошное круглое поперечное сечение, а также скольжение и качение зерновки, имеющей форму обрезанного цилиндра.

При качении обрезанный цилиндр проходит следующие стадии (рис. 4).

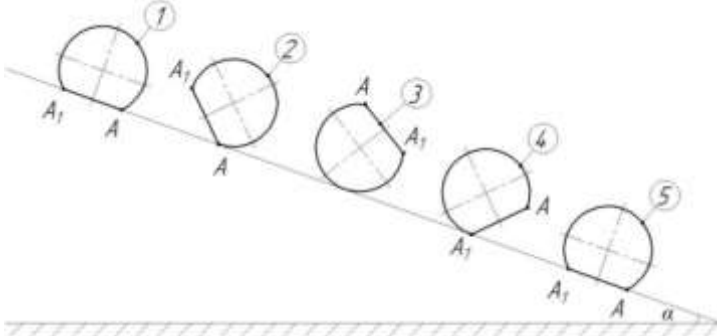


Рисунок 4 – Стадии движения обрезанного цилиндра по наклонной плоскости: 1 и 5 – начальная и конечная стадия; 2 – вращение вокруг угловой точки  $A$ ; 3 – качение по дуге; 4 – вращение вокруг угловой точки  $A_1$

Для этих стадий определены моменты инерции

$$J_o = \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot \left[ \pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta \left( \frac{1}{3} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \right) \right]; \quad (3)$$

$$J_A = J_{A_1} = \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot [3(\pi - \beta) + \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot (3 + 2 \cdot \sin^2 \beta)]; \quad (4)$$

где  $\rho$  – поверхностная плотность материала цилиндра,  $\text{кг/м}^2$ ;

$R$  – радиус обрезанного цилиндра,  $\text{м}$ ;

$\beta$  – центральный угол обрезанного цилиндра,  $\text{рад}$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения цилиндра,  $\text{м}^2$ .

Вращение цилиндра вокруг точки  $A$  создает только вес цилиндра  $P$  (рис. 5). При решении дифференциального уравнения, определены угловая скорость и время поворота цилиндра к концу второй стадии

$$\varphi'(t_2) = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]}; \quad (5)$$

$$t_2 = \int_0^{t_2} dt = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot \int_0^\beta f(\varphi) d\varphi. \quad (6)$$

Здесь

$$M_1 = \frac{2}{3} \sin^3 \beta; \quad M_2 = \pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta; \quad M_3 = 3(\pi - \beta) + \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot (3 + 2 \sin^2 \beta). \quad (7)$$

$$f(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{\frac{M_1}{M_3} \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \varphi)] + \frac{M_2}{M_3} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta + \varphi)]}}. \quad (8)$$

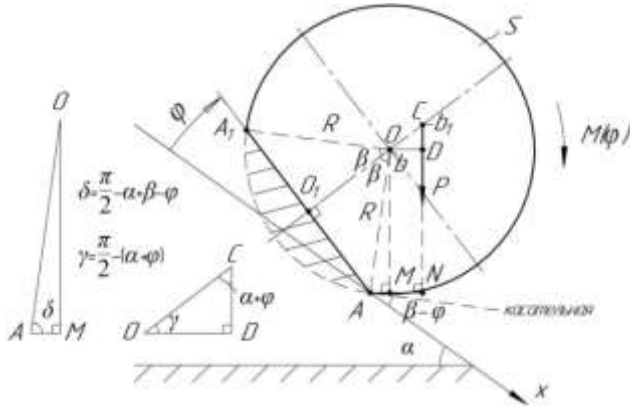


Рисунок 5 – Вращение обрезанного цилиндра вокруг угловой точки  $A$

Согласно рисунку 6, единственная сила, которая заставляет вращаться цилиндр, это сила  $F_{mp}$ .

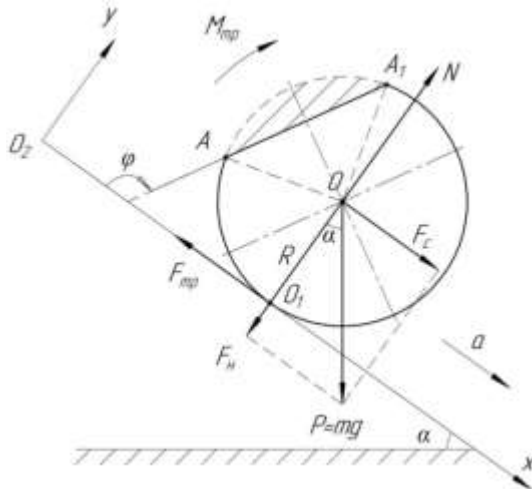


Рисунок 6 – Силы, действующие на обрезанный цилиндр при его качении

Для этой стадии были также найдены угловая скорость и время

$$\varphi'(t_3) = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{M_5^2 + M_4 \cdot (\pi - \beta)}. \quad (9)$$

$$t_3 - t_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot \frac{\sqrt{M_5^2 + M_4 \cdot (\pi - \beta)} - M_5}{M_4}. \quad (10)$$

Здесь

$$M_4 = \frac{(\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) \cdot \sin \alpha}{\frac{3(\pi - \beta)}{2} + \cos \beta \cdot \sin \beta \left(1 + \frac{1}{6} \sin^2 \beta + \frac{1}{2} \cos^2 \beta\right)}. \quad (11)$$

$$M_5 = \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]}. \quad (12)$$

Уравнение движения для последней стадии было составлено исходя из закона сохранения энергии. То есть, потенциальная энергия зерна, находившегося изначально в верхней части соскальзывающего слоя, переходит, по мере движения, в кинетическую энергию вращения вокруг угловой точки  $A_1$  (рис. 7).

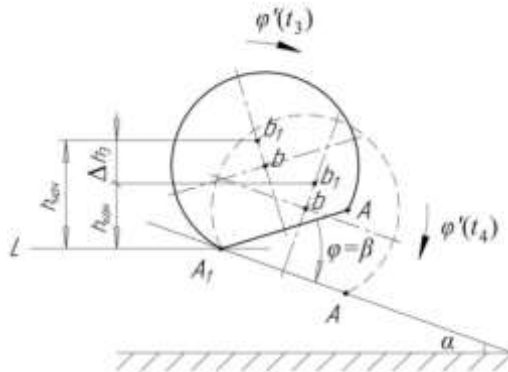


Рисунок 7 – К определению потенциальной энергии обрезанного цилиндра при его вращении вокруг точки  $A_1$

Угловая скорость и время вращения цилиндра вокруг точки  $A_1$

$$\varphi'(t_4) = 2 \sqrt{\frac{g}{R}} \sqrt{M_5^2 + M_4(\pi - \beta) + \frac{M_2}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_1}{M_3} [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha]}. \quad (13)$$

$$t_4 - t_3 = \frac{\beta}{\varphi'(t_4)}. \quad (14)$$

Теоретические исследования качения круглого зерна и скольжение зерновки, выполненной в виде обрезанного цилиндра, в автореферате не представлены ввиду их простоты.

По результатам расчетов по всем трем вариантам движения компонентов вороха определена скорость прохода вороха сквозь отверстия решетки, среднее значение которой составляет 0,105 м/с.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлена программа и методика лабораторных и полевых экспериментов.

Для изучения физико-механических свойств зерновых культур нами были проведены испытания прицепного очесывающего устройства (рис. 8) при уборке пшеницы сорта «Московская 39» урожайностью 24 ц/га. Высота растений варьировала в пределах 0,6-0,8 м, при спелости зерна не менее 98% и влажности в пределах 13%. Ворох поступал в прицеп, из которого затем были отобраны недомолоченные колосья (в количестве 1020 штук) для их дальнейшего исследования. В частности производился замер длины стеблей и колосьев, а также определялось количество выделенных и оставшихся зерен и их распределение по длине колоса.

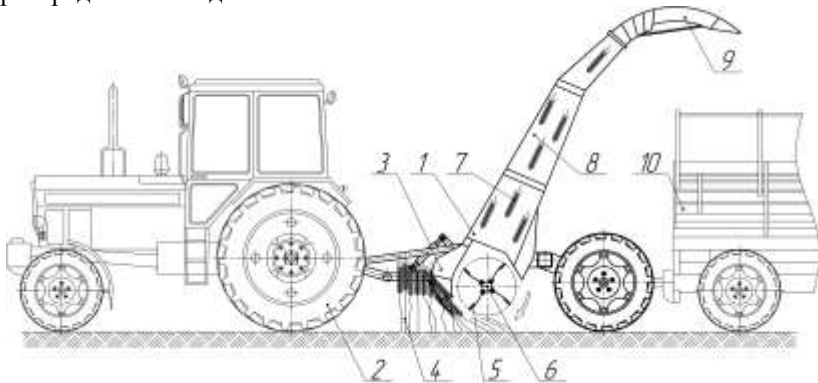


Рисунок 8 – Принципиальная схема работы прицепного очесывающего адаптера: 1 – очесывающий адаптер; 2 – трактор; 3 – направляющий козырек; 4 – стебли; 5 – зубья; 6 – ротор; 7 – оборванные колосья; 8 – трубопровод; 9 – дефлектор; 10 – прицеп

Для оценки энергоемкости молотильного устройства, реализующего поперечное колебательное воздействие на связи зерновки в колосе, был проведен соответствующий лабораторный эксперимент. Экспериментальная установка представляет собой две рифленные поверхности, одна из которых имела привод и возможность взаимного перемещения (рис. 9). На нижнюю поверхность укладывали колос, а верхнюю перемещали относительно нее и фиксировали возникающие при этом поперечные усилия посредством тензодатчиков.

Исследования были разбиты на два этапа. Первая серия экспериментов была посвящена изучению влияния зазора в молотильной камере на вымолачивающую способность устройства. Опыт был спланирован как полнофакторный с тремя уровнями варьирования зазора молотильной камеры (4, 6 и 8 мм) и последовательным увеличением числа колебаний верхней площадки до полного выделения из колоса всех содержащихся в нем зерен. Исследования

выполняли при обмолоте пшеницы сорта «Московская 56». Влажность зерна находилась в пределах 9%.



Рисунок 9 – Приборное оборудование при проведении лабораторных исследований с экспериментальной молотилкой

Каждый вариант опыта был проведен с трехкратной повторностью. Всего было обработано и учтено 78 колосьев. Результаты эксперимента были обработаны в программах «Excel» и «STATISTICA».

Во второй серии экспериментов оценено влияние угла наклона рифов верхней площадки на энергоемкость выделения зерна из колоса (рис. 10).

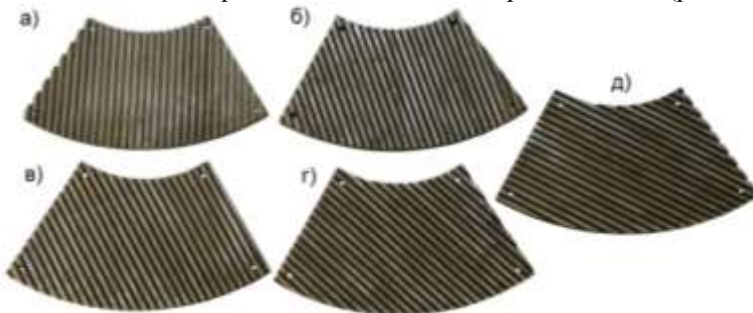


Рисунок 10 – Сменные рабочие органы экспериментального молотильного устройства с углом наклона рифов: а) 0°; б) 15°; в) 30°; г) 45°; д) 60°

Для подтверждения теоретической гипотезы возможности выделения свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна, был проведен соответствующий эксперимент. Экспериментальная



установка, имитирующая наклонную камеру с решетчатым днищем, была изготовлена на базе колосового элеватора зерноуборочного комбайна КЗС-1218 «Полесье» (рис. 11). Нижняя стенка кожуха элеватора была удалена, а вместо нее устанавливали сменные решета размером 920×220 мм.



Рисунок 11 – Экспериментальная установка, имитирующая работу скребкового плавающего транспортера наклонной камеры зерноуборочного комбайна: 1 – рама; 2 – колосовой элеватор; 3 – съемное решетчатое днище; 4 – емкость для сбора зернового вороха; 5 – электродвигатель; 6 – цепная передача; 7 – частотный преобразователь

Эксперименты также были разбиты на три этапа. В первой серии, эксперимент был спланирован как двухфакторный (типа  $3^2$ ), в котором варьировали длина отверстия  $l_{отв}$  и его ширина  $b_{отв}$  (табл. 1). Отверстия были размещены на поверхности сепарирующей решетки в виде последовательно расположенных рядов. При этом их суммарное «живое сечение» оставалось неизменным во всех вариантах опыта (с максимальным отклонением  $\pm 0,5\%$ ).

Таблица 1 – Условия планирования эксперимента (вторая серия)

| Факторы              |                  | Уровни варьирования |     |     | Интервал варьирования |
|----------------------|------------------|---------------------|-----|-----|-----------------------|
| натуральный вид      | кодированный вид | -1                  | 0   | +1  |                       |
| Длина отверстия, мм  | $l_{отв}$        | 120                 | 160 | 200 | 40                    |
| Ширина отверстия, мм | $b_{отв}$        | 6                   | 8   | 10  | 2                     |

Каждый вариант опыта проведен с трехкратной повторностью. Таким образом, всего было учтено и обработано 27 замеров. Все исследования проводились на пшенице сорта «Московская 56». Влажность зерна находилась в

пределах 12% (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ). Опыт проводили при наклоне элеватора на угол  $45^\circ$  и скорости движения транспортера 3 м/с, что соответствует параметрам большинства серийных комбайнов. Подача зернового вороха в пересчете на полную ширину наклонной камеры и молотилки комбайна составляла 10 кг/с при содержании в нем 80% свободного зерна.

Во второй серии экспериментов оценено влияние угла отверстий решетчатого днища на его сепарирующую способность (рис. 12), а в третьей – влияние скорости движения транспортера на сепарирующую способность решетчатого днища.

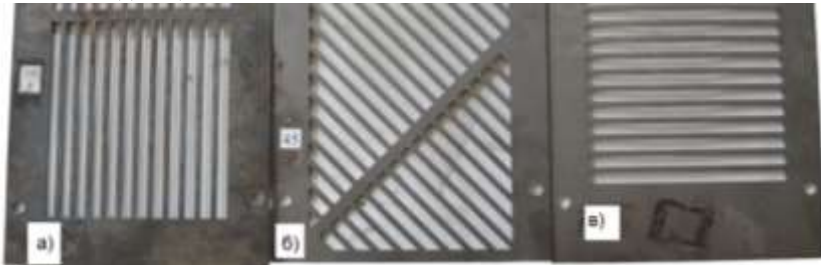


Рисунок 12 – Набор сменных решетчатых днищ экспериментальной установки с углом наклона отверстий: а)  $0^\circ$ ; б)  $45^\circ$ ; в)  $90^\circ$

В качестве альтернативного способа выделения свободного зерна из очесанного зернового вороха до его поступления в молотильную камеру зерноуборочного комбайна может являться сетчатый транспортер, смонтированный между наклонной камерой и молотилкой (рис. 13).

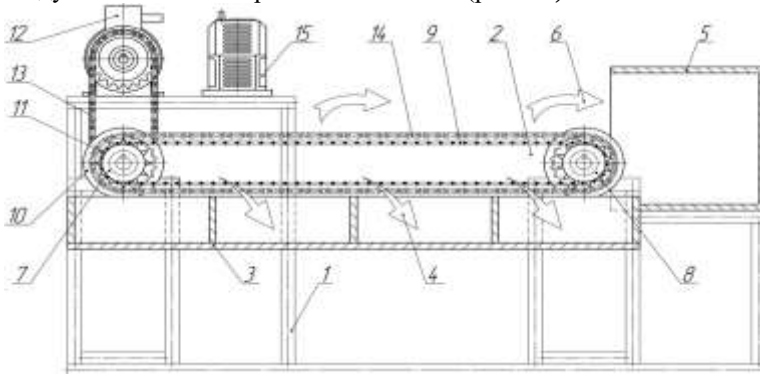


Рисунок 13 – Схема экспериментальной установки: 1 – рама; 2 – транспортер; 3 – емкость для сбора свободного зерна; 4 – свободное зерно; 5 – емкость для сбора вороха; 6 – ворох, идущий сходом; 7 и 8 – барабан; 9 – сетчатое полотно; 10 – реборда; 11 – выступы на поверхности барабанов; 12 – электродвигатель; 13 и 14 – цепная передача; 15 – частотный преобразователь

Все исследования проводились на пшенице сорта «Московская 56». Влажность зерна составляла 12%. Сетчатый транспортер был смонтирован горизонтально. Линейная скорость транспортера имела три уровня варьирования в пределах 3-5 м/с. Минимальное значение соответствует скорости плавающего транспортера наклонной камеры зерноуборочного комбайна, максимальное – скорости на входе в молотильную камеру. Подача очесанного зернового вороха составляла 10 кг/с при содержании в нем 80% свободного зерна. Длина сетчатого транспортера равнялась 2 м, а его прямоугольные ячейки имели размеры: 17×15 мм, 35×35 мм, 60×60 мм и 90×100 мм (рис. 14).

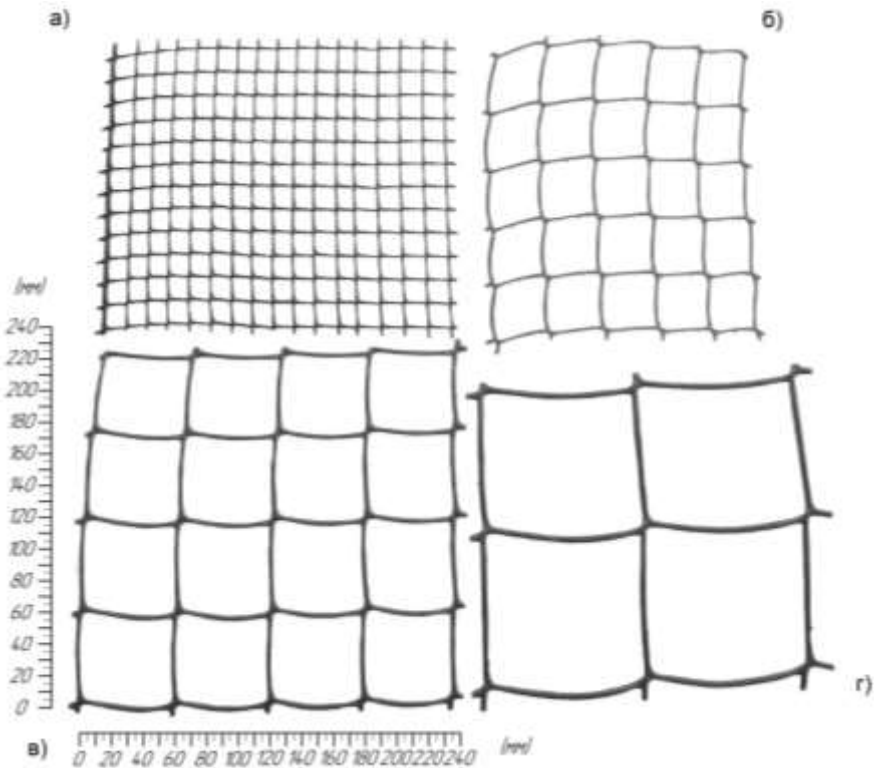


Рисунок 14 – Фрагмент сетчатого полотна с размерами ячеек: а) 17×15 мм; б) 35×35 мм; в) 60×60 мм; г) 90×100 мм

Лабораторные опыты выполняли согласно матрице планирования эксперимента (табл. 2). Последовательность изменения площади ячеек сетчатого полотна в первой серии опытов была возрастающей, во второй – нисходящей и в третьей – случайной.

Таблица 2 – Матрица планирования лабораторного эксперимента

| Номер опыта | Факторы                                       |                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|             | Скорость транспортера<br>$v_{мп}, \text{м/с}$ | Площадь ячейки полотна<br>$S_{яч}, \text{мм}^2$ |
| 1           | 3                                             | 255                                             |
| 2           | 3                                             | 1225                                            |
| 3           | 3                                             | 3600                                            |
| 4           | 3                                             | 9000                                            |
| 5           | 4                                             | 9000                                            |
| 6           | 4                                             | 3600                                            |
| 7           | 4                                             | 1225                                            |
| 8           | 4                                             | 255                                             |
| 9           | 5                                             | 3600                                            |
| 10          | 5                                             | 255                                             |
| 11          | 5                                             | 9000                                            |
| 12          | 5                                             | 1225                                            |

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты экспериментальных исследований. В частности приведены результаты исследования параметров очесанного зернового вороха, энергоемкости молотильного устройства, реализующего поперечный колебательный характер нагружения связей зерна с колосом, а также сепарацию зернового вороха на наклонном решетчатом днище и сетчатом транспортере.

При исследовании физико-механических свойств очесанного зернового вороха установлено, что общее количество выделенного зерна составляет 82%. При этом доля полностью обмолованных и полностью необмолованных колосьев достигает 59% и 0,5% соответственно. Таким образом, зерновой ворох, полученный после очеса растений на корню, требует доработки, в том числе – полного или частичного домолота порядка 41% от числа всех колосьев. Длина колоса с 5% степенью значимости подчиняется закону распределения Вейбулла (рис. 15).

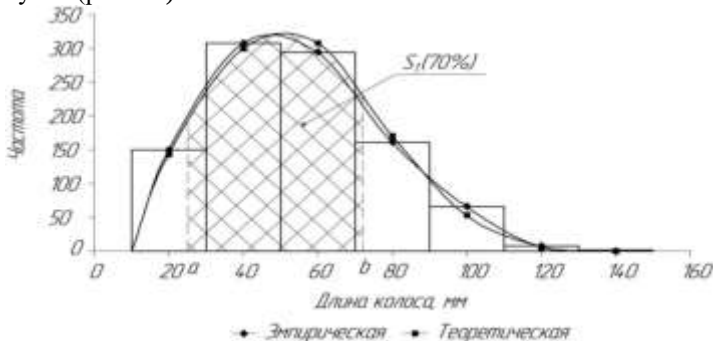


Рисунок 15 – Эмпирическая и теоретическая кривые распределения длины колоса

Большая часть невымоложенных зерен сосредоточена в нижней части колоса, вблизи места его крепления к стеблю (рис. 16). Есть основание предполагать, что характер воздействия рабочих органов на зерна, оставшиеся в разных частях колоса, при домолачивании должен различаться, как по принципу действия, так и по числовым характеристикам.

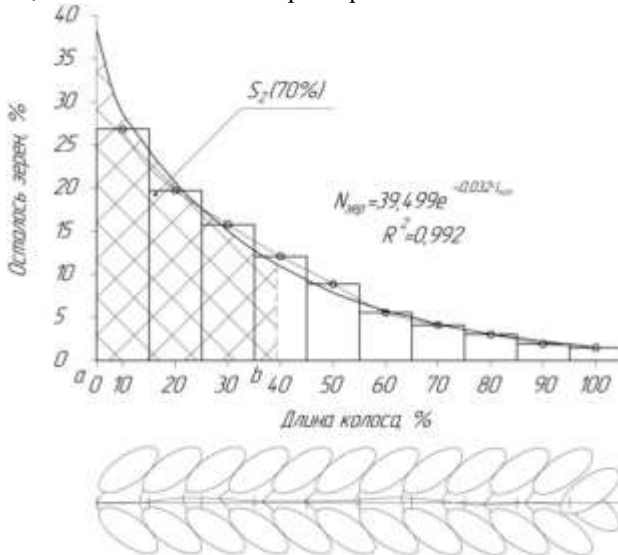


Рисунок 16 – Распределение невымоложенных зерен по длине колоса

Распределение длины стебля пшеницы по частотам при очесе растений на корню представлено на рисунке 17.

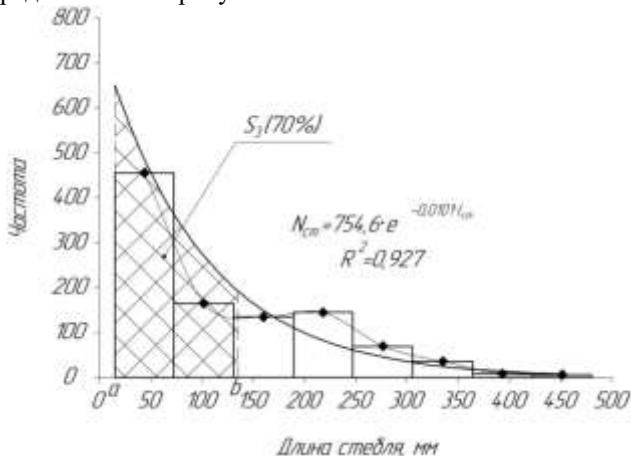


Рисунок 17 – Распределение длины стебля пшеницы по частотам

По результатам обработки экспериментальных данных установлено, что длина колоса и стебля пшеницы «Московская 56» варьируется в пределах 10-150 мм и 15-480 мм, при среднем значении указанных параметров 54,29 мм и 125,85 мм соответственно.

По данным экспериментов с молотильным устройством, реализующим поперечное нагружение связей зерна с колосом, построена поверхность отклика, характеризующая зависимость доли выделенных зерен от параметров процесса (рис. 18).

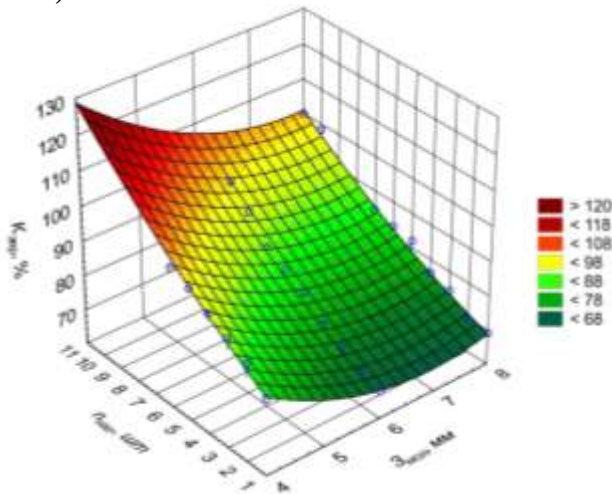


Рисунок 18 – Поверхность отклика при взаимодействии факторов: количества нагружений связей зерна с колосом и зазора в молотильной камере

После исключения всех незначимых коэффициентов пошаговым методом, уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер зависимостей (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,946$ ) имеет следующий вид

$$K_{\text{зер}} = 152,79 - 24,953 \cdot Z_{\text{мол}} + 3,421 \cdot n_{\text{наг}} + 1,710 \cdot Z_{\text{мол}}^2, \quad (15)$$

где  $K_{\text{зер}}$  – доля зерен, выделенных из колоса, %;

$n_{\text{наг}}$  – количество нагружений связей зерна с колосом, равное количеству движений верхней площадки молотилки, шт;

$Z_{\text{мол}}$  – зазор в молотильной камере, мм.

Полученная зависимость свидетельствует о том, что основное влияние на выделение зерна из колоса при колебательном характере нагружении связей оказывает зазор в молотильной камере. При этом его оптимальным параметром является величина 4 мм. В таком положении молотильное устройство обеспечивает стопроцентное выделение зерна из колоса за 6 движений. Дробление зерна при этом не превышает 0,45%. Существенной разницы между зазорами 6 и 8 мм не установлено.

Основным показателем, позволяющим оценить энергоемкость молотильного устройства, является работа, затраченная на выделение одного зерна из колоса. Для ее вычисления использовали график (рис. 19), полученный в программе «Excel», по оси абсцисс которого отложены время цикла и соответствующее ему перемещение верхней площадки, а по оси ординат – усилие, зафиксированное тензодатчиками. После перехода на равномерную шкалу перемещения работа, затраченной на разрушение связей зерна с колосом за одно движение, была вычислена как площадь заштрихованной фигуры  $abc$ .

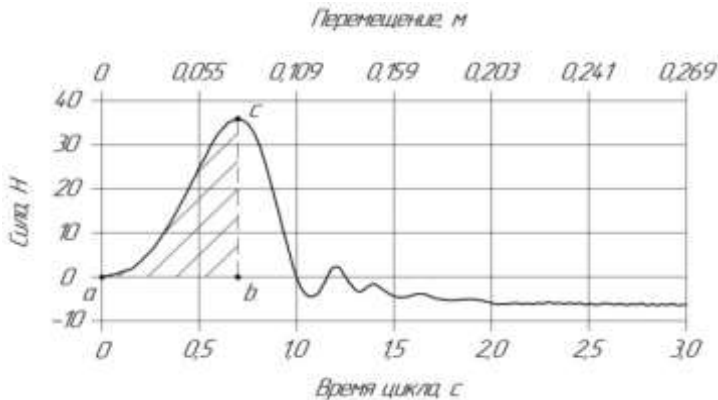


Рисунок 19 – Методика расчета энергоемкости нагружения связей зерна с колосом (при зазоре в молотильной камере  $z_{\text{мол}}=8 \text{ мм}$ )

Тогда вычленив кривую  $ac$  из графика и аппроксимировав ее по перемещению (по равномерной шкале), получим следующее уравнение регрессии (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,988$ )

$$F = 1063,3 \cdot S_{\text{пл}}^2 + 442,11 \cdot S_{\text{пл}} - 2,469, \quad (16)$$

где  $F$  – сила,  $\text{Н}$ ;

$S_{\text{пл}}$  – линейное перемещение верхней площадки,  $\text{м}$ .

В результате вычисления площади фигуры  $abc$  с помощью программы «Mathcad», имеем

$$A_{\text{зп}} = \int_a^b F(S_{\text{пл}}) dS_{\text{пл}} = \int_0^{0,07} (1063,3 \cdot S_{\text{пл}}^2 + 442,11 \cdot S_{\text{пл}} - 2,469) dS_{\text{пл}} = 1,03 \text{ Дж}, \quad (17)$$

где  $a$  и  $b$  – пределы интегрирования (рис. 19).

Разделив полученное значение на количество зерен, выделенных за одно движение площадки, окончательно получаем, что при зазоре молотильной камеры 4, 6 и 8  $\text{мм}$  – работа, затрачиваемая на выделение одного зерна из колоса, составит 0,027, 0,030 и 0,035  $\text{Дж}$ , соответственно (рис. 20).

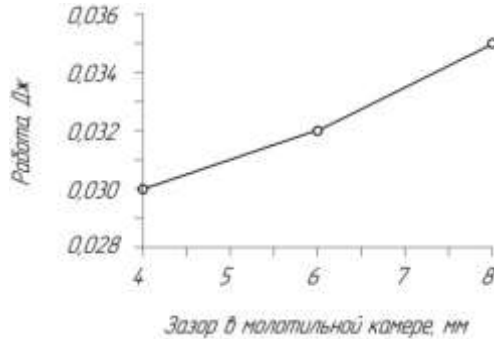


Рисунок 20 – Зависимость работы, необходимой для выделения из колоса одного зерна, от зазора в молотильной камере

По аналогичной методике была проведена серия лабораторных экспериментов по оценке влияния на энергоёмкость процесса угла наклона рифов (рис. 21).

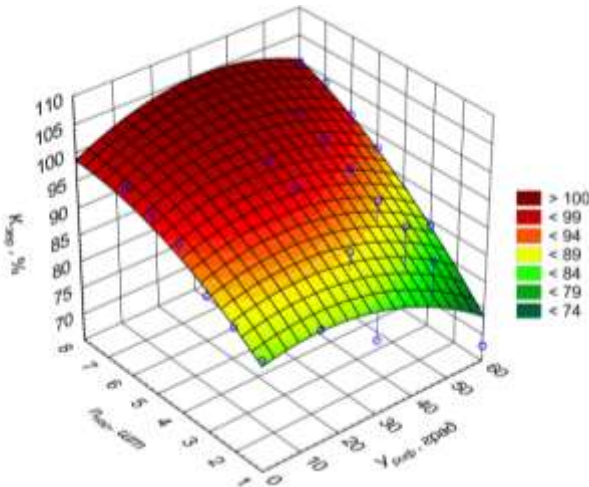


Рисунок 21 – Поверхность отклика при взаимодействии факторов: угла наклона рифов и количества нагружений связей зерна с колосом

После исключения всех незначимых коэффициентов пошаговым методом, уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер зависимостей (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,834$ ) имеет следующий вид

$$K_{\text{зер}} = 78,55 + 0,258 \cdot U_{\text{риф}} + 3,699 \cdot n_{\text{наг}} - 6,274 \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{риф}}^2, \quad (18)$$

где  $K_{\text{зер}}$  – доля зерен, выделенных из колоса, %;

$U_{\text{риф}}$  – угол наклона рифов, град;



$n_{\text{наг}}$  – количество нагружений связей зерна с колосом, равное количеству движений верхней площадки молотилки, *шт.*

В результате исследований установлено, что минимум функции, соответствующий наименьшей удельной работе, затрачиваемой на выделение из колоса одного зерна, приходится на угол наклона рифа в  $45^\circ$  (рис. 22).

Уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер зависимостей (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,965$ ), представляет собой полином третьего порядка

$$A_{\text{зер}} = 0,148 \cdot Y_{\text{риф}}^3 - 9,524 \cdot Y_{\text{риф}}^2 + 71,429 \cdot Y_{\text{риф}} + 29914, \quad (19)$$

где  $A_{\text{зер}}$  – работа, затраченная на выделение одного зерна пшеницы, *мкДж*;

$Y_{\text{риф}}$  – угол наклона рифов, *град.*

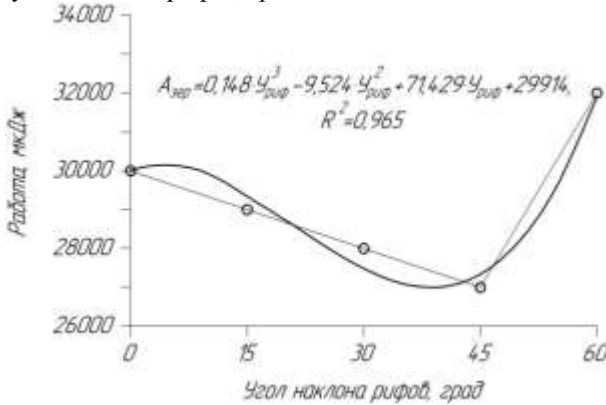


Рисунок 22 – Зависимость работы, затраченной на выделение одного зерна пшеницы от угла наклона рифов

По результатам исследования процесса сепарации свободного зерна на решетчатом днище, имитирующем наклонную камеру зерноуборочного комбайна, построена поверхность отклика (рис. 23). Из ее анализа следует, что наиболее близкими к точке экстремума являются отверстия шириной 8 мм и длиной 160 мм.

После исключения всех незначимых коэффициентов пошаговым методом, уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер зависимостей (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,934$ ) имеет следующий вид

$$P_{\text{зер}} = -110,73 + 0,199 \cdot l_{\text{отв}} + 37,197 \cdot b_{\text{отв}} - 1,926 \cdot b_{\text{отв}}^2 - 0,0229 \cdot l_{\text{отв}} \cdot b_{\text{отв}}, \quad (20)$$

где  $P_{\text{зер}}$  – доля свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия сепарирующей решетки (проход свободного зерна), %;

$l_{\text{отв}}$  – длина отверстия, *мм*;

$b_{\text{отв}}$  – ширина отверстия, *мм*.

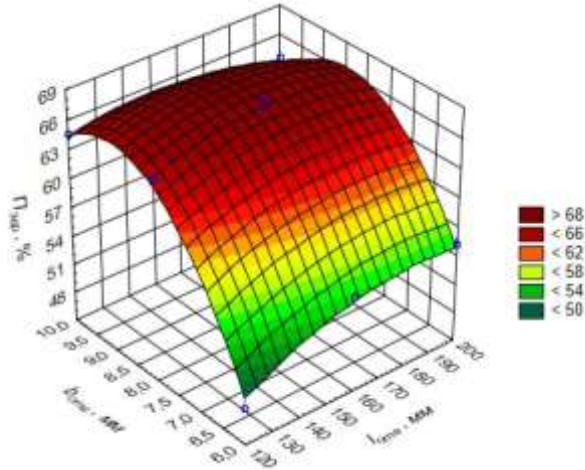


Рисунок 23 – График взаимодействия факторов: длины и ширины отверстий решетчатой поверхности

Оценка убывания свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине поверхности сепарирования (рис. 24) свидетельствует о наличии резерва для повышения степени сепарации.

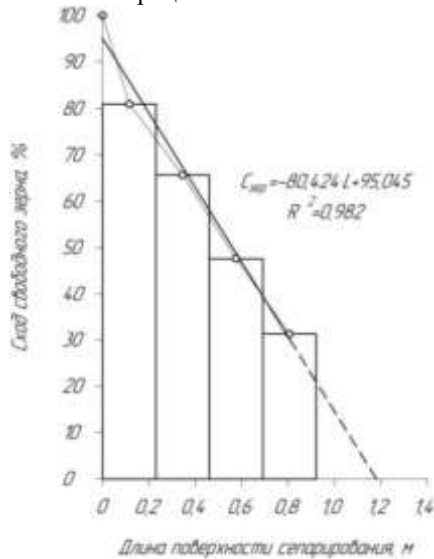


Рисунок 24 – Убывание свободного зерна из очесанного зернового вороха в зависимости от длины поверхности сепарирования при скорости плавающего транспортера  $v_{тр}=3 \text{ м/с}$  и угле наклона отверстий  $\gamma_{отв}=0^\circ$

С высокой степенью вероятности ( $R^2=0,982$ ) линия тренда прямолинейна и имеет вид

$$C_{\text{зер}} = -80,424 \cdot L + 95,045, \quad (21)$$

где  $C_{\text{зер}}$  – количество убывшего зерна, в процентах от его исходной массы, имевшейся в начале процесса сепарации (сход свободного зерна);

$L$  – длина поверхности сепарирования, м.

Наличие 31,3% свободного зерна на выходе из установки говорит о том, что длины сепарирующей решетки при проведении серии экспериментов оказалось не достаточно. Следовательно, для достижения желаемого результата: исключение поступления свободного зерна в молотильную камеру зерноуборочного комбайна, необходимым и достаточным является увеличение ее длины. Экстраполяция линии тренда показывает, что для полного выделения зерна из вороха, длина решетчатого днища должна быть не менее 1,18 м.

Аналогичным образом были проведены исследования при различной скорости транспортера (рис. 25) и угле наклона отверстий (рис. 26).

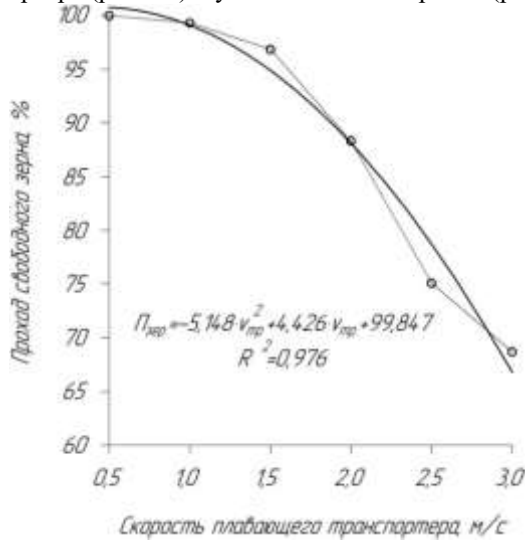


Рисунок 25 – Изменение количества свободного зерна прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища в зависимости от скорости плавающего транспортера

Полученная зависимость (рис. 26) свидетельствует о том, что по мере увеличения угла наклона количество свободного зерна прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища имеет тенденцию к уменьшению, а количество сошедшего с него зерна, наоборот, к возрастанию. При этом максимальная сепарация свободного зерна 68,7% соответствует углу наклона отверстий, равному  $0^\circ$ . Разница между максимальным и минимальным значением коли-

чества свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища, превышает 3 раза.

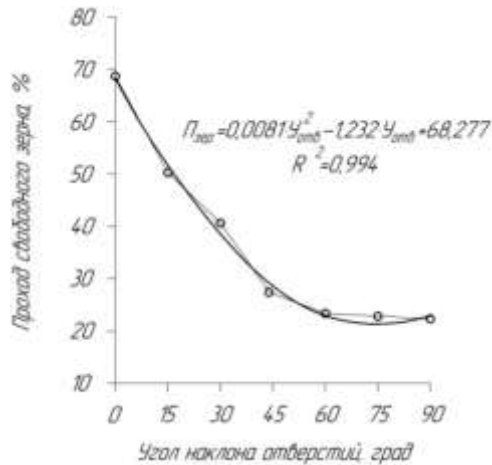


Рисунок 26 – Влияние угла наклона отверстий на количество свободного зерна, прошедшего сквозь решетчатое днище (при скорости плавающего транспортера  $v_{\text{тр}} = 3 \text{ м/с}$ )

По результатам обработки опытных данных получена зависимость длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от угла наклона отверстий (рис. 27).

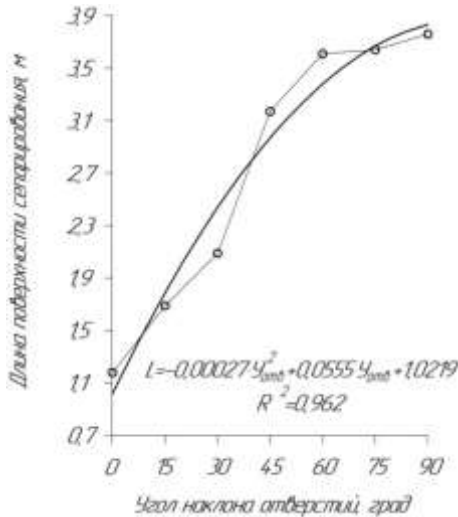


Рисунок 27 – Зависимость длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от угла наклона отверстий решетчатого днища

Уравнение регрессии ( $R^2=0,962$ ) имеет вид

$$L = -0,00027 \cdot Y_{отв}^2 + 0,0555 \cdot Y_{отв} + 1,0219, \quad (22)$$

где  $L$  – длина поверхности сепарирования, м;

$Y_{отв}$  – угол наклона отверстий, град.

Представленный график (рис. 27) свидетельствует о том, что, по мере увеличения угла наклона отверстий минимально необходимая длина решетчатого днища возрастает. При этом оптимальным углом наклона отверстий, обеспечивающим минимальную длину решетчатого днища 1,18 м, является величина  $0^\circ$ . В таком положении полностью исключается вероятность поступления свободного зерна в молотильную камеру зерноуборочного комбайна и его дробление рабочими органами молотилки. Такое техническое решение может быть реализовано в наклонной камере зерноуборочного комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10», имеющей длину порядка 1,3 м.

График убывания доли свободного зерна по длине сетчатого транспортера представлен на рисунке 28.

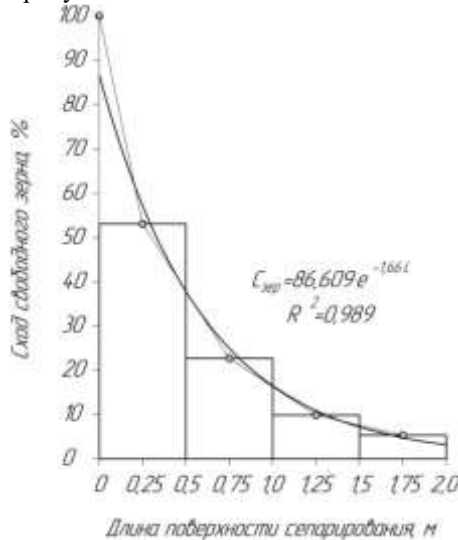


Рисунок 28 – Убывание свободного зерна по длине сетчатого транспортера (при  $v_{тр}=3$  м/с и  $S_{яч}=255$  мм<sup>2</sup>)

Уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер выявленных зависимостей ( $R^2=0,989$ ), имеет экспоненциальный вид

$$C_{зер} = 86,609 \cdot e^{-1,66 \cdot L}, \quad (23)$$

где  $C_{зер}$  – количество свободного зерна, выраженное в процентах от его исходного значения, имевшегося в начале процесса сепарации (сход свободного зерна);

$L$  – длина поверхности сепарирования, м.

Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что принятая нами концепция выделения свободного зерна из очесанного вороха себя оправдала. Свободное зерно и соразмерные ему мелкие примеси (полова и частично измельченная солома) под действием силы тяжести проходят сквозь ячейки сетчатого полотна.

Влияние скорости сетчатого транспортера и площади «живого сечения» ячеек на проход свободного зерна представлено на рисунке 29 и формулой 24.

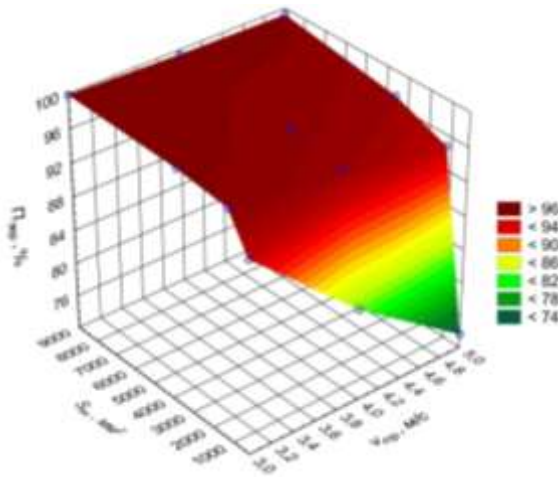


Рисунок 29 – Влияние скорости сетчатого транспортера и площади его ячеек на проход свободного зерна

Наиболее адекватной моделью (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,992$ ) для него является нелинейная регрессия с точкой разрыва. Уравнение регрессии имеет вид

$$\begin{cases} \Pi_{зеп} = 0,596 - 9,233 \cdot v_{тр} + 0,467 \cdot S_{яч}, & \text{при } \Pi_{зеп} \leq 94,648; \\ \Pi_{зеп} = 99,261 - 0,790 \cdot v_{тр} + 4,191 \cdot 10^{-4} \cdot S_{яч}, & \text{при } \Pi_{зеп} > 94,648, \end{cases} \quad (24)$$

где  $\Pi_{зеп}$  – количество свободного зерна, пошедшего сквозь ячейки сетчатого транспортера (проход свободного зерна), %;

$v_{тр}$  – скорость сетчатого транспортера, м/с;

$S_{яч}$  – площадь ячейки сетчатого полотна, мм<sup>2</sup>.

Оценка результатов эксперимента по критерию Стьюдента показала, что существенных отличий в сепарирующей способности сетчатого полотна по свободному зерну между размерами ячеек 35×35 мм и 60×60 мм не установлено. Существенными отличия в сепарирующей способности становятся только при использовании сетчатого полотна с размерами ячеек 17×15 мм и

90×100 мм. При этом, использование сетчатого полотна с минимальными размерами ячеек (17×15 мм) является нецелесообразным, поскольку в этом случае снижается эффективность сепарирующего устройства, а применение сетчатого полотна с размерами ячеек 60×60 мм и более влечет за собой прохождение сквозь него колосовой части урожая. В первом случае, не исключается возможность дробления свободного зерна рабочими органами молотилки, а во втором случае чрезмерное поступление попоны, соломы и колосовой части урожая снижает пропускную способность системы очистки. В результате чего увеличиваются общие потери за комбайном. Таким образом, в условиях лабораторного эксперимента, оптимальным является сетчатое полотно с размерами ячеек 35×35 мм.

В результате проведенных экспериментальных исследований достоверно установлена возможность осуществления сепарации свободного зерна из очесанного вороха на сетчатом ячеистом полотне, смонтированном между наклонной камерой и молотильным устройством. При этом практическая реализация такого технического решения требует смещения молотильного барабана комбайна назад и укорачивания соломотряса (за ненадобностью) без нарушения его технологического процесса.

**В пятой главе «Перспективные направления трансформации конструкции зерноуборочного комбайна»** представлены наиболее перспективные направления дальнейшей разработки темы. В частности отмечено, что зерноуборочный комбайн следует снабдить сепарирующим устройством предбарабанного типа содержащим скребковый транспортер и прутковое решето, лишенное поперечных планок (рис. 30).

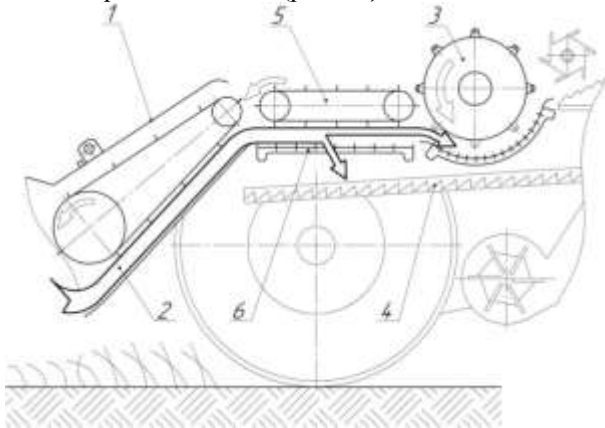


Рисунок 30 – Технологическая схема зерноуборочного комбайна, обеспечивающая предварительное выделение свободного зерна на горизонтальном прутковом решете: 1 – наклонная камера; 2 – очесанный зерновой ворох; 3 – молотильное устройство; 4 – транспортная доска; 5 – скребковый транспортер; 6 – прутковое решето

Такое техническое решение позволяет повысить сепарирующую способность устройства, а также снизить металлоемкость конструкции. Это обусловлено тем, что экспериментально доказана эффективность использования в качестве сепарирующего устройства наклонного решетчатого днища наклонной камеры. В связи с этим переориентация сепарирующей решетки в горизонтальное положение и ее размещение непосредственно перед барабаном должно увеличить интенсивность сепарации. Следовательно, длина сепарирующего устройства может быть уменьшена, даже по сравнению с длиной днища наклонной камеры серийного комбайна.

**В шестой главе «Экономическая оценка внедрения разработки в производство»** произведен расчет экономической эффективности применения модернизированной наклонной камеры оснащенной решетчатым днищем и устройством для отвода свободного зерна на площади 500 га. Экономический эффект от внедрения разработки в производство включает: экономию эксплуатационных затрат за счет увеличения рабочей скорости комбайна на 5%. Суммарный годовой экономический эффект составляет 156525 рублей, а срок окупаемости капитальных затрат не превышает одного года. Годовой экономический эффект для народного хозяйства страны от внедрения разработки в производство составляет порядка 3,72 млрд. рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Важнейшим резервом для совершенствования конструкции зерноуборочного комбайна является более полная адаптация его технологического процесса к специфическим особенностям физико-механических свойств очесанного зернового вороха, в связи с его дезитрегрированностью в отсутствие соломы и наличием большой доли свободного зерна.

2. В результате экспериментальных исследований физико-механических свойств очесанного зернового вороха установлено, что общее количество выделенного зерна составляет 82%. При этом доля полностью обмолоченных и полностью необмолоченных колосьев достигает 59% и 0,5% соответственно. Таким образом, зерновой ворох, полученный после очеса растений на корню, требует доработки, в том числе полного или частичного домолота 41% от числа всех колосьев. При этом длина колоса и стебля пшеницы «Московская 39» варьируется в пределах 10-150 мм и 15-480 мм, при среднем значении указанных параметров 54 мм и 125 мм соответственно.

3. Наиболее перспективными являются два направления модернизации технологического процесса зерноуборочного комбайна:

- уменьшение энергоемкости молотильного устройства и минимизация дробления свободного зерна, посредством его предварительного выделения из очесанного зернового вороха до поступления последнего в молотильное устройство;



- уменьшение энергоемкости процесса выделения зерновок из колоса посредством перехода на поперечное колебательное нагружение их связей с ним.

Предложены технические решения, реализующие указанные элементы модернизированного технологического процесса.

4. Вымолот зерна путем поперечного колебательного нагружения его связей с колосом обеспечивает по сравнению с использованием традиционного бильного барабана снижение энергоемкости процесса в 3 раза. При этом оптимум процесса достигается при зазоре в молотильной камере, равном 4 мм и угле наклона рифов ее верхней площадки, равном 45°.

5. Математическая модель процесса сепарации очесанного вороха заключается в том, что происходит движение его наклонных слоев, внутри которых отдельные зерна могут либо скатываться, либо соскальзывать в соответствующее отверстие вдоль плоскости раздела, сориентированной под углом внутреннего трения зерна к горизонту. При этом скорость движения зернового вороха возрастает линейно, а ее среднее значение (при длине отверстия 160 мм) равно  $v_{\text{фак.сеп}}=0,105 \text{ м/с}$ .

6. Для повышения скорости сепарации целесообразно выполнить отверстия решетчатого днища наклонной камеры непрерывными по всей его длине. В результате процесс сепарации из дискретного может трансформироваться в непрерывный, с соответствующим ростом его средней скорости. В связи с проблематичностью практической реализации такого варианта конструкции приемлемой является рабочая поверхность решетчатого днища с восемью поперечными рядами отверстий размером 8×160 мм, сориентированных длинной стороной по направлению перемещения скребка транспортера. Исходя из конструктивных особенностей серийного комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10» длина решетчатой поверхности должна быть не менее 1,18 м (при площади «живого сечения» отверстий порядка 60% от поверхности днища).

7. Перспективным вариантом предварительного выделения свободного зерна из очесанного зернового вороха до его поступления в молотильную камеру является его сепарация на движущейся поверхности сетчатого транспортера, смонтированного между наклонной камерой и молотильным устройством. Установлено, что оптимальным является сетчатое полотно с размерами ячеек 35×35 мм. В этом случае проход свободного зерна находится в пределах 95-99%, половы – 80-95% и соломы – 35-39%. Практическая реализация такого технического решения требует смещения молотильного барабана комбайна назад и укорачивания соломотряса без снижения эффективности его технологического процесса (в связи с резким уменьшением объема поступающей соломы).

8. Модернизация наклонной камеры зерноуборочного комбайна путем снабжения ее решетчатым днищем и устройством для отвода свободного зер-

на и его подачи на очистку, минуя молотильное устройство, позволила уменьшить затраты мощности на привод барабана на 10 кВт, повысить производительность уборки на 5%, а также снизить эксплуатационные затраты на 4,45%. Годовой экономический эффект от внедрения разработки в производство в расчете на один комбайн составит 156525 рублей. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений не превышает одного года.

## РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Рекомендуется комплектовать очесывающие жатки наклонной камерой, снабженной решетчатым днищем и устройством для вывода свободного зерна непосредственно на транспортную доску очистки комбайна, что позволит минимизировать его дробление рабочими органами молотилки и уменьшить энергоемкость на привод молотильного барабана (Патенты РФ № 2566015, № 2577892, № 2725729). При этом рабочая поверхность решетчатого днища должна иметь восемь поперечных рядов отверстий размером 8×160 мм, сориентированных длинной стороной по направлению перемещения скрепка транспортера.

Перспективой дальнейшей разработки темы является адаптация комбайна к параметрам очесанного зернового вороха, путем совершенствования домолачивающего устройства, реализующего поперечное по отношению к стержню колоса колебательное воздействие на зерновки, что обеспечит снижение энергоемкости процесса (Патенты РФ № 2482656, № 2534265). Зазор в молотильной камере принять равным 4 мм, а угол наклона рифов ее верхней площадки – 45°.

Существенно разгрузить очистку комбайна способна система удаления легких примесей инерционного типа, смонтированная непосредственно на корпусе очесывающего устройства и использующая избыточную энергию воздушного потока, генерируемого очесывающим барабаном (Патент РФ № 2566017).

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные результаты докторских диссертаций

1. Ожерельев, В.Н. Перспективные направления снижения энергоемкости процесса выделения зерна из колоса / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 8. – С. 30-31.
2. Исследование параметров очесанного зернового вороха / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, В.М. Алакин, С.Н. Становов // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – №1. – С. 7-9.

3. Ожерельев, В.Н. Энергоемкость выделения зерна из колоса / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 4. – С. 22-24.
4. Ожерельев, В.Н. Адаптация зерноуборочного комбайна к работе с очесанным зерновым ворохом / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, В.Д. Игнатов // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 6. – С. 5-7.
5. Ожерельев, В.Н. Влияние угла наклона рифов на энергоемкость молотильного устройства / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, Н.В. Синяя // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 5. – С. 34-36.
6. Ожерельев, В.Н. Стратегия совершенствования конструкции зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 8. – С. 39-43.
7. Ожерельев, В.Н. Влияние скорости плавающего транспортера на сепарирующую способность днища наклонной камеры / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, В.Ф. Комогорцев // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 3. – С. 39-44.
8. **Никитин, В.В.** Определение оптимальной длины днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна при очесе / В.В. Никитин // Сельский механизатор. – 2018. – № 5. – С. 8-9.
9. Ожерельев, В.Н. Теория и практика сепарации очесанного зернового вороха на наклонной решетчатой поверхности / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 7 (86). – С. 58-67.
10. Ожерельев, В.Н. К определению оптимального угла наклона отверстий решетчатого днища наклонной камеры / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 5. – С. 40-46.
11. Исследование процесса сепарации очесанного зернового вороха на сетчатой ячеистой поверхности / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, В.М. Кузюр, А.Е. Кузнецов // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 3 (94). – С. 18-28.
12. **Никитин, В.В.** Определение оптимальных размеров отверстий сетчатого транспортера / В.В. Никитин // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 11 (102). – С. 17-26.
13. Влияние скорости сетчатого транспортера на его сепарирующую способность / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, Н.В. Синяя, В.М. Кузюр, А.Е. Кузнецов // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 5. – С. 67-73.
14. Ожерельев, В.Н. Влияние предварительной сепарации свободного зерна на устойчивость комбайна с очесывающей жаткой / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, М.А. Федин // Сельский механизатор. – 2020. – № 1. – С. 4-6.

Публикация в издании, входящем в международную реферативную базу данных Scopus

15. Perspectives of grain pile separation before it enters the thresher / V.N. Ozherelyev, **V.V. Nikitin**, N.M. Belous, V.E. Torikov // International Journal of

Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Т.7. – No 2.13 Special Issue 13. – P. 114-116.

### Монография и учебное пособие

16. Ожерельев, В.Н. Зерноуборочные комбайны: монография / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**. – Брянск: Брянский ГАУ, 2016. – 252 с.

17. Ожерельев, В.Н. Сельскохозяйственные машины. Зерноуборочные комбайны: учебное пособие / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, В.В. Кузнецов. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 233 с.

### Патенты на изобретения

18. Пат. № 2483525 РФ, МПК A01F7/00, A01F11/00, A01F12/18. Устройство для выделения зерна из колоса / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2012101889/13 от 19.01.2012; опубл. 10.06.2013, бюл. № 16.

19. Пат. № 2482656 РФ, МПК A01F7/00, A01F7/06, A01F12/18. Молотильное устройство / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2012105877/13 от 17.02.2012; опубл. 27.05.2013, бюл. № 15.

20. Пат. № 2534265 РФ, МПК A01F7/06, A01F12/18. Молотильное устройство / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2013137025/13 от 06.08.2013; опубл. 27.11.2014, бюл. № 33.

21. Пат. № 2566015 РФ, МПК A01D41/12. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2014135980/13 от 03.09.2014; опубл. 20.10.2015, бюл. № 29.

22. Пат. № 2566017 РФ, МПК A01D41/08. Устройство для обмола та растений на корню / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2014130712/13 от 24.07.2014; опубл. 20.10.2015, бюл. № 29.

23. Пат. № 2577892 РФ, МПК A01D41/12. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2014145875/13 от 14.11.2014; опубл. 20.03.2016, бюл. № 8.

24. Пат. № 2631344 РФ, МПК A01D41/02. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет». – Заявка № 2016113476 от 07.04.2016; опубл. 21.09.2017, бюл. № 27.

25. Пат. № 2653011 РФ, МПК A01F12/24, A01F12/18. Молотильное устройство / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, В.Б. Попов; заявитель и патен-

тообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет». – Заявка № 2016148099 от 07.12.2016; опубл. 04.05.2018, бюл. № 13.

26. Пат. № 2655749 РФ, МПК A01D41/12. Зерноуборочный комбайн / **В.В. Никитин**, В.Н. Ожерельев, А.М. Гринь, Н.В. Синяя; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет». – Заявка № 2017107427 от 06.03.2017; опубл. 29.05.2018, бюл. № 16.

27. Пат. № 2658389 РФ, МПК A01D41/00, A01D41/02, A01D41/12. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет». – Заявка № 2017110312 от 28.03.2017; опубл. 21.06.2018, бюл. № 18.

28. Пат. № 2672399 РФ, МПК A01D41/00, A01F12/20. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет». – Заявка № 2018102067 от 18.01.2018; опубл. 14.11.2018, бюл. № 32.

29. Пат. № 2677349 РФ, МПК A01D41/00. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет». – Заявка № 2018106422 от 20.02.2018; опубл. 16.01.2019, бюл. № 2.

30. Пат. № 2685735 РФ, МПК A01D41/12. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, Э.В. Жалнин, В.Д. Игнатов, В.Д. Сулеев, А.Е. Кузнецов, **В.В. Никитин**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет». – Заявка № 2018126059 от 13.07.2018; опубл. 23.04.2019, бюл. № 12.

31. Пат. № 2725729 РФ, МПК A01D41/12. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, Н.В. Синяя; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет». – Заявка № 2019128610 от 11.09.2019; опубл. 03.07.2020, бюл. № 19.

#### Публикации в научных журналах и материалах конференций

32. Ожерельев, В.Н. Предварительная сепарация очесанного зернового вороха в наклонной камере / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Агропромышленный комплекс на рубеже веков: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию агроинженерного факультета. – Ч.1. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский ГАУ имени Петра I», 2015. – С. 165-170.

33. Ожерельев, В.Н. Перспективные направления совершенствования конструкции зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2016. – №1 (15). – С. 19-25.

34. Ожерельев, В.Н. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, В.Ф. Комогорцев // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 3 (55). – С. 65-70.

35. **Никитин, В.В.** Влияние размеров отверстий решетчатого днища наклонной камеры на его сепарирующую способность / В.В. Никитин, В.Н. Ожерельев // Роль аграрной науки в развитии АПК РФ: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – Ч. 1. Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 8-12.

36. **Никитин, В.В.** Исследование оптимальной длины днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна при очесе / В.В. Никитин, В.Б. Попов // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: сборник тезисов докладов междунар. науч.-практ. конф., 21-22 декабря 2017. – Гомель, 2017. – С. 111-116.

37. **Никитин, В.В.** Рациональный выбор параметров днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна при очесе / В.В. Никитин, В.Б. Попов // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2018. – № 1 (72). – С. 19-25.

38. Ожерельев, В.Н. Перспективы развития конструкции зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, Э.В. Жалнин, **В.В. Никитин** // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции. – Ч.П. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», 2018. – С. 137-143.

39. Ожерельев, В.Н. Результаты исследований по снижению энергоемкости процесса обмолота зерна / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: Сборник тезисов докладов 3-й международной научно-практической конференции. – Гомель: НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2019. – С. 85-86.

40. Ожерельев, В.Н. Изучение процессов энергосбережения при уборке зерна и разработка соответствующей стратегии энергосбережения: отчет о НИР / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**. – Брянск: Брянский ГАУ, 2019. – 117 с.

41. Ожерельев, В.Н. Трансформация теоретической гипотезы процесса сепарации очесанного зернового вороха на решетчатом днище наклонной камеры / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, В.Ф. Комогорцев // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2020. – № 1 (19). – С. 27-34.

42. Комогорцев, В.Ф. Исследование устойчивости цилиндра с обрезанной кромкой, помещенного на наклонную плоскость / В.Ф. Комогорцев, В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: Сборник материалов международной научно-технической конференции. – Брянск: Изд-во БГАУ, 2020. – С. 63-67.

43. Ожерельев, В.Н. Перспективы импортозамещения в механизации уборки зерна / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Цифровизация агропромышленного комплекса: Сборник научных статей II междунар. науч.-практ. конф. – Т. II. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – С. 146-150.

44. Ожерельев, В.Н. Расчет мощности, потребляемой барабаном при изъятии свободного зерна из очесанного вороха / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин** // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: Сборник тезисов докладов 4-й международной научно-практической конференции. – Гомель: НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2020. – С. 30-31.

45. Ожерельев, В.Н. К обоснованию технологической схемы зерноуборочного комбайна при очесе растений на корню / В.Н. Ожерельев, **В.В. Никитин**, Н.В. Синяя // Инновации и технологический прорыв в АПК: Сборник международной научно-практической конференции. – Ч.2. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. – С. 239-243.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю. Телефоны: (473) 224-39-39; 8-915-546-89-67; e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

**НИКИТИН Виктор Васильевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ  
ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА И ПАРАМЕТРОВ ЕГО  
РАБОЧИХ ОРГАНОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага печатная. Усл.п.л. 2,0. Тираж 100 экз. Изд № \_\_\_\_\_.  
Издательство Брянского государственного аграрного университета.  
243365, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино,  
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.