

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Брянский государственный аграрный университет»

*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

**Диссертация**

на соискание ученой степени доктора технических наук

**Научный консультант:**

доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор

Ожерельев Виктор Николаевич

Брянск – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>1 ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ</b>	
<b>МЕХАНИЗАЦИИ УБОРКИ ЗЕРНА</b> .....	14
1.1 Современное состояние мирового и российского комбайностроения .....	14
1.2 Объекты уборки.....	19
1.3 Способы уборки и обеспечивающие их средства механизации .....	25
1.4 Конструктивно-технологическая концепция зерноуборочного комбайна ...	38
1.5 Обзор технических решений, адаптированных к работе с очесанным зерновым ворохом.....	45
1.6 Краткий обзор теоретических исследований по очесу растений на корню, обмолоту хлебной массы и сепарации свободного зерна .....	60
1.7 Формирование научной гипотезы .....	65
Выводы по первой главе.....	72
1.8 Цель и задачи исследования.....	73
<b>2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕПАРАЦИИ СВОБОДНОГО</b>	
<b>ЗЕРНА ИЗ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА</b> .....	75
2.1 Теоретические предпосылки сепарации свободного зерна в наклонной камере .....	75
2.2 Теоретическая модель сепарации очесанного зернового вороха на наклонной решетчатой поверхности.....	86
2.2.2 Скатывание обрезанного цилиндра с наклонной поверхности.....	95
2.2.3 Скольжение обрезанного цилиндра по наклонной поверхности.....	128
2.3 Исследование пропускной способности наклонной решетчатой поверхности .....	130
Выводы по второй главе.....	135
<b>3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ</b>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	137
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	137

3.2 Методика исследования физико-механических свойств очесанного зернового вороха .....	138
3.3 Методика исследования энергоемкости выделения зерна из колоса при поперечном колебательном характере нагружения связей .....	142
3.3.1 Методика исследования влияния угла наклона рифов на энергоемкость молотильного устройства .....	147
3.4 Методика исследования сепарации очесанного зернового вороха на наклонной решетчатой поверхности .....	149
3.4.1 Методика исследования влияния скорости плавающего транспортера на сепарирующую способность наклонной решетчатой поверхности .....	156
3.4.2 Методика исследования влияния угла наклона отверстий на сепарирующую способность решетчатого днища .....	157
3.5 Методика исследования процесса сепарации очесанного зернового вороха на сетчатой ячеистой поверхности .....	158
3.5.1 Методика определения влияния скорости сетчатого транспортера на его сепарирующую способность .....	165
3.5.2 Методика определения влияния размеров отверстий сетчатого транспортера на его сепарирующую способность .....	166
3.6 Методика обработки результатов экспериментальных исследований....	169
<b>4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>171</b>
4.1 Результаты исследования физико-механических свойств очесанного зернового вороха .....	171
4.2 Результаты исследования энергоемкости выделения зерна из колоса при поперечном колебательном характере нагружения связей .....	177
4.2.1 Результаты исследования влияния угла наклона рифов на энергоемкость молотильного устройства .....	184
4.3 Результаты исследования сепарации очесанного зернового вороха на наклонной решетчатой поверхности .....	191
4.3.1 Результаты исследования влияния скорости плавающего транспортера на сепарирующую способность наклонной решетчатой поверхности.....	201

4.3.2 Результаты исследования влияния угла наклона отверстий на сепарирующую способность решетчатой поверхности .....	207
4.4 Результаты исследования сепарации очесанного зернового вороха на сетчатой ячеистой поверхности.....	214
4.4.1 Результаты исследования влияния скорости сетчатого транспортера на его сепарирующую способность .....	219
4.4.2 Результаты исследования влияния размеров отверстий сетчатого транспортера на его сепарирующую способность .....	224
Выводы по четвертой главе.....	229
<b>5 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА .....</b>	<b>231</b>
5.1 Конструктивно-технологическая концепция зерноуборочного комбайна при работе с очесанным зерновым ворохом .....	231
5.2 Устройства, обеспечивающие предварительную сепарацию свободного зерна.....	241
5.3 Устройства, обеспечивающие сепарацию легких примесей из очесанного зернового вороха .....	252
5.4 Изыскание направлений интенсификации работы молотильно-сепарирующего устройства.....	257
5.5 Алгоритм развития технологической схемы зерноуборочного комбайна.....	260
Выводы по пятой главе.....	264
<b>6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>266</b>
6.1 Расчет экономии мощности на привод молотильного барабана.....	267
6.2 Расчет мощности на привод дополнительного оборудования .....	270
6.3 Расчет экономии эксплуатационных затрат .....	272
Выводы по шестой главе .....	279
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>280</b>

<b>РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ</b>	
<b>ТЕМЫ</b> .....	283
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	284
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	316
Приложение А .....	317
Приложение Б.....	319
Приложение В.....	322
Приложение Г .....	323
Приложение Д.....	330
Приложение Е.....	331
Приложение Ж.....	334
Приложение З .....	335
Приложение И .....	336
Приложение К.....	337
Приложение Л.....	340
Приложение М.....	343
Приложение Н .....	346
Приложение О .....	349
Приложение П .....	350

## ВВЕДЕНИЕ

**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% [36, 91, 219]. Себестоимость зерна уменьшается при этом на 25-30% [93, 276].

Однако ввиду того, что хлебная масса, полученная в результате очеса, содержит до 85% свободного зерна [124, 91, 278], то поступление его в молотильную камеру зерноуборочного комбайна является не целесообразным. Это обусловлено тем, что наблюдается повышенное дробление (до 8%) свободного зерна рабочими органами молотилки, которое приводит к снижению его всхожести и стойкости при хранении [219, 258, 276, 279]. 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 ре-

сурсо- 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 зерна является академик В.П. Горячкин [67]. Среди его ближайших учеников, соратников и последователей следует отметить труды И.Ф. Василенко, М.А. Пустыгина, Э.И. Липковича и Н.И. Кленина [46, 227, 127-129, 105-107], 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, С.А. Родимцев, А.И. Ряднов, Г.Ф. Серый, А.К. Скворцов, Е.В. Труфляк, О.А. Федорова, В.М. Халанский и другие [17, 12-15, 25, 34, 59, 84, 229, 234, 243, 244, 261, 274, 284].

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 [91, 106, 258, 124, 236, 272, 276]. Основной объем научных исследований посвящен разработке очесывающих устройств, определению их оптимальных кинематических параметров и режимов работы на качество уборки урожая. Однако, несмотря на это, ряд вопросов технологии очеса растений на корню изучен недостаточно. Прежде всего, они касаются дальнейшего обмолота хлебной массы (практически лишенной соломы), и исключения попадания свободного зерна в молотильную камеру зерноуборочного комбайна.

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. Орбинского, А.Н. Пугачева, А.П. Тарасенко, Н.П. Шабанова и других [40, 67, 77, 80, 145, 188, 189, 225, 255, 279]. Между тем материал, на котором вышеуказанные авторы проводили свои научные исследования, существенным образом отличается от физико-механических свойств очесанного зернового вороха.

Несмотря на существенный вклад при разработке новых и совершенствовании существующих технологических процессов зерноуборочного комбайна, ряд вопросов обмолота и сепарации свободного зерна исследован недостаточно. В частности отсутствуют сведения об исследовании энергоемкости обмолота колосовой части урожая при поперечном колебательном характере нагружения 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 необходимо было решить 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;

б) 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 ха-

рактуре 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;

б) 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» (Приложение А) и дипломами региональных, областных и международных конкурсов. В 2018 году научная разработка поддержана грантом Министерства сельского хозяйства РФ.

Результаты исследований внедрены в ЗАО СП «Брянксельмаш», ПАО «Пензмаш» и в хозяйствах Брянской области (Приложение Б).

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

**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 статей – в ведущих рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные результаты докторских диссертаций, одна статья – в издании, входящем 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.

# 1 ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕХАНИЗАЦИИ УБОРКИ ЗЕРНА

## 1.1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МИРОВОГО И РОССИЙСКОГО КОМБАЙНОСТРОЕНИЯ

Зерноуборочный комбайн является одной из самых востребованных сельскохозяйственных машин. Ведь практически во всех климатических зонах мира, пригодных для земледелия, в большем или меньшем объеме обязательно присутствует производство зерна. Зерно является основой аграрной экономики, поскольку кроме получения хлебопродуктов, круп и других продуктов питания для человека, оно обеспечивает большую часть рациона кормления и для многих сельскохозяйственных животных [161, 173, 260].

В связи с этим, зерноуборочные комбайны производятся в настоящее время во многих странах мира. При этом комбайностроение, как правило, тяготеет к зонам производства зерна [108, 182]. Поэтому среди лидеров такие страны, как США, Канада, Россия, Аргентина, Бразилия, Польша и Италия. В ряде стран комбайностроение сориентировано, в значительной степени, на экспорт продукции. Это, прежде всего, Германия и Италия, имеющие непропорционально большой (по сравнению с объемом зернового производства) выпуск зерноуборочных комбайнов. Преимущественно на экспорт сориентировано комбайностроение также в Финляндии, Дании и Белоруссии.

Специфика сельского хозяйства Японии и Китая, заключающаяся в малоземелье, вынуждает местных комбайностроителей выпускать малопродуктивные машины, не имеющие перспективы на рынках большинства стран с развитым зерновым производством, в том числе и в России. Что касается комбайнов других стран, то практически все марки серийно выпускаемых машин присутствуют на российском рынке, а многие из них уже имеют многолетнюю историю работы на полях России.

В последние годы российские комбайностроители вновь включились в борьбу за свою нишу на мировом рынке зерноуборочных комбайнов. Так, например, компания «Ростсельмаш», производившая к началу 2000-х годов 2/3 российских комбайнов, занимала 17% мирового рынка и 65% рынка России и стран СНГ. По итогам 2017 года компания «Ростсельмаш» отправил на экспорт 38% своей продукции (около 2000 комбайнов). Более половины объема экспорта российских комбайнов традиционно приходится на Казахстан. Затем следуют Украина и Узбекистан. Мелкие партии машин удается продать в Болгарию, Монголию, Азербайджан, Туркмению и другие страны СНГ и Восточной Европы. Тем не менее, к 2019 году завод «Ростсельмаш» значительно снизил, как объем производства, так и долю продукции на рынке России. Согласно данным Росстата, за последние 5 лет пик производства зерноуборочной техники в России пришелся на 2017 год (рис. 1.1). Однако, начиная с 2018 года, отмечено существенное снижение объемов производства продукции [161, 173, 181, 182].

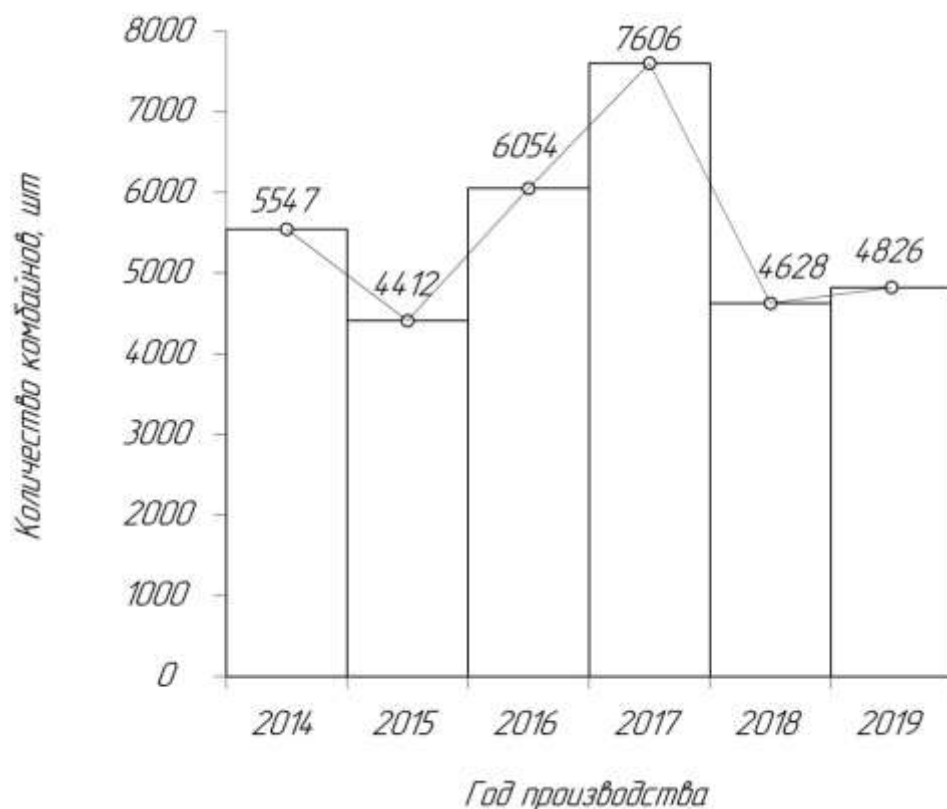


Рисунок 1.1 – Динамика объема российского производства зерноуборочных комбайнов в 2014-2019 гг.

В 2019 году отечественными машиностроителями выпущено 4826 зерноуборочных комбайнов (из них 1200 приходится на комбайны иностранных марок), что на 36,5% меньше, чем в 2017 году [218, 234, 240].

Второй по величине российский комбайновый завод находился в Красноярске. Его комбайны марки «Енисей» традиционно были востребованы в зонах с большой вероятностью неблагоприятных погодных условий в период уборки и низкой или средней урожайностью зерновых.

Однако удержать эти позиции в конкурентной борьбе с зарубежными фирмами, организовавшими сборочные производства во многих регионах России, не удалось. Перспектива перевода производства в Чебоксары и Владимир (в содружестве с финской фирмой «Sampo Rosenlew») в условиях системного кризиса экономики не является достаточной гарантией успеха.

Тем не менее, создание филиалов, осуществляющих сборку продукции, вблизи наиболее перспективных рынков ее сбыта, является одним из наиболее эффективных способов конкурентной борьбы в сельхозмашиностроении. В этой связи следует отметить выход на российский рынок с зерноуборочным комбайном КЗС-1218 (через посредство завода «Брянксельмаш») белорусского объединения «Гомсельмаш». В 2007 году в Брянске была выпущена первая партия из 30 комбайнов. К 2019 году объем производства вырос до 1620 комбайнов или до 27,28% общероссийского производства. А в целом по России филиалы зарубежных комбайностроительных фирм организованы в девяти регионах. Они существенным образом варьируются по объему производства и перспективам, но заметную долю рынка у флагманов отечественного комбайностроения отнимают [109].

Если рассматривать баланс экспорта и импорта комбайнов, то преобладает импорт. Так, в 2019 году экспортировано 780 машин (13,13% выпуска), а импортировано 2813. При этом в основном импортируются белорусские комбайны (73%). Импорт из других стран на порядок меньше: Германия – 8%; США – 7%, Китай – 4%, Италия – 3% [218].



Поглощения, слияния и открытие филиалов происходит и в других странах мира. При этом четко прослеживается техническая и финансовая экспансия лидеров мирового комбайностроения. Так, например, фирма «New Holland» добилась контроля над польским комбайностроением. Фирма «Massey Ferguson» производит свои комбайны не только в Северной Америке, но и в Бразилии, Италии, Дании. Комбайн «Лида-1300» по лицензии немецкой фирмы «Case» выпускает белорусский завод «Лидагропромаш» (г. Лида, Гродненской области). В городе Павлоград (Украина) из комплектующих, поставляемых немецкой фирмой «Claas», производится сборка комбайнов «Днипро», являющихся точной копией ее комбайна «Мега».

В условиях жесткой конкуренции даже крупным фирмам, обладающим сетью филиалов во многих странах, все труднее продвигать свою продукцию на рынках. В связи с этим происходит создание финансово-промышленных групп, объединяющих по несколько крупных производителей комбайнов, названия которых являются устойчивыми «брендами». Так, например, группа «Agrotecnica» объединяет всемирно известные фирмы «Case» и «New Holland». Группа «Agco Gmbh» продвигает на рынках продукцию фирм «Massey Ferguson», «Caterpillar» (комбайны марки «Challenger») и «Fendt». Сборочные производства многочисленных предприятий группы разбросаны по всему миру, а головной офис находится в городе Дулут, штат Миннесота (США). Накапливается опыт совместного производства и продвижения продукции на рынках у российской компании «Ростсельмаш» и финской фирмы «Sampo Rosenlew». Таким образом, комбайностроение давно уже превратилось в транснациональный бизнес [161, 173].

Объединения, слияния и поглощения одних фирм другими оказывают существенное влияние на техническую политику в комбайностроении. Во-первых, конструкции комбайнов, в значительной степени, унифицируются. Так, например, в большинстве современных комбайнов выгрузка зерна из бункера осуществляется по трехступенчатой схеме (горизонтальный шнек + вертикальный шнек + горизонтальный или наклонный шнек). Это обуслов-

лено тем, что на отвозке зерна от комбайна все чаще используются большегрузные автомобили и прицепы с высокими бортами.

Во-вторых, происходит унификация комбайнов по комплектующим изделиям. Так, например, компания «Ростсельмаш» работает с более чем 500 поставщиками. В связи с переходом на выпуск новых моделей комбайнов, значительную часть из них составляют ведущие в мире производители комплектующих. Так, например, двигатель поставляет английская фирма «Cummins», гидрораспределитель и мост ведущих колес – немецкая «Cit», редуктор – немецкая «Walterscheid», приводные ремни – немецкая «Optibelt», насос-дозатор – датская «Sauer Danfoss», планетарный редуктор привода ножа и сам нож – немецкая «Schumacher» и т.д. [173].

Отчасти такое разделение труда оправдано высоким качеством продукции зарубежных поставщиков. Действительно, планетарный привод ножа лучше, чем механизм качающейся шайбы. Что касается двигателя, то предпочтения, отданные английской продукции, обусловлены не только ее техническим совершенством, но и политикой борьбы Евросоюза за сохранение рабочих мест. В связи с этим, комбайну с российским двигателем ЯМЗ-236БК дорога на европейские рынки закрыта неоправданно жесткими требованиями по токсичности выхлопа. Такой откровенный протекционизм сводит конкурентную борьбу в комбайностроении к конкуренции издержек штамповочного, сварочного и сборочного производств, дилерской сети и форм государственной поддержки по кредиту и лизингу.

В рамках международного разделения труда в комбайностроении следует упомянуть фирмы, производящие жатки, в том числе валковые. На постсоветском пространстве крупнейшим производителем валковых жаток был и остается завод в Бердянске (Украина). В Северной Америке на этом специализируется канадская фирма «MacDon». Ряд фирм специализируется на производстве адаптеров и дополнительных приспособлений к зерноуборочным комбайнам для уборки кукурузы, рапса, подсолнечника.

Одним из условий выживания в конкурентной борьбе в сельхозмашиностроении является ориентация на многопрофильность предприятия. В связи с этим, многие зарубежные фирмы предлагают потребителю широкий спектр сельскохозяйственной техники: от тракторов и сеялок, до зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов. Аналогичной стратегии придерживается менеджмент компании «Ростсельмаш». Наряду с освоением выпуска кормоуборочных комбайнов расширен ассортимент продукции за счет тракторов. С этой целью приобретен тракторный завод в Канаде. Таким образом, компания «Ростсельмаш» становится классической транснациональной корпорацией, то есть, не исключено, что со временем она сможет войти в одну «весовую категорию» с такими лидерами мирового сельхозмашиностроения, как «John Deere» или «Claas» [161].

Реальные шансы на расширение своей рыночной ниши имеет также объединение заводов «Гомсельмаш» и «Брянсксельмаш», поскольку реальных конкурентов по стоимости комбайнов с пропускной способностью более 12 кг/с у них на российском рынке пока нет. Кроме того, «Гомсельмаш» традиционно является лидером на постсоветском пространстве по выпуску кормоуборочной техники, сборка которой также осуществляется и на заводе «Брянсксельмаш».

## 1.2 ОБЪЕКТЫ УБОРКИ

Основной объем работы для зерноуборочных комбайнов в России обеспечивают колосовые зерновые культуры. Их характерной особенностью является то, что плоды (зерновки) плотно «упакованы» в колос, расположенный на верхушке полого стебля (соломины), высыхающего к моменту уборки зерна. Самыми распространенными из колосовых зерновых являются пшеница (озимая и яровая) и ячмень (рис. 1.2, а, б). Ячмень в России возделывают, как правило, яровой, а посевные площади, занятые озимой пшеницей, в 1,28

раза превышают посеы яровой пшеницы (табл. 1.1) [240]. Значительные площади у нас заняты озимой рожью.

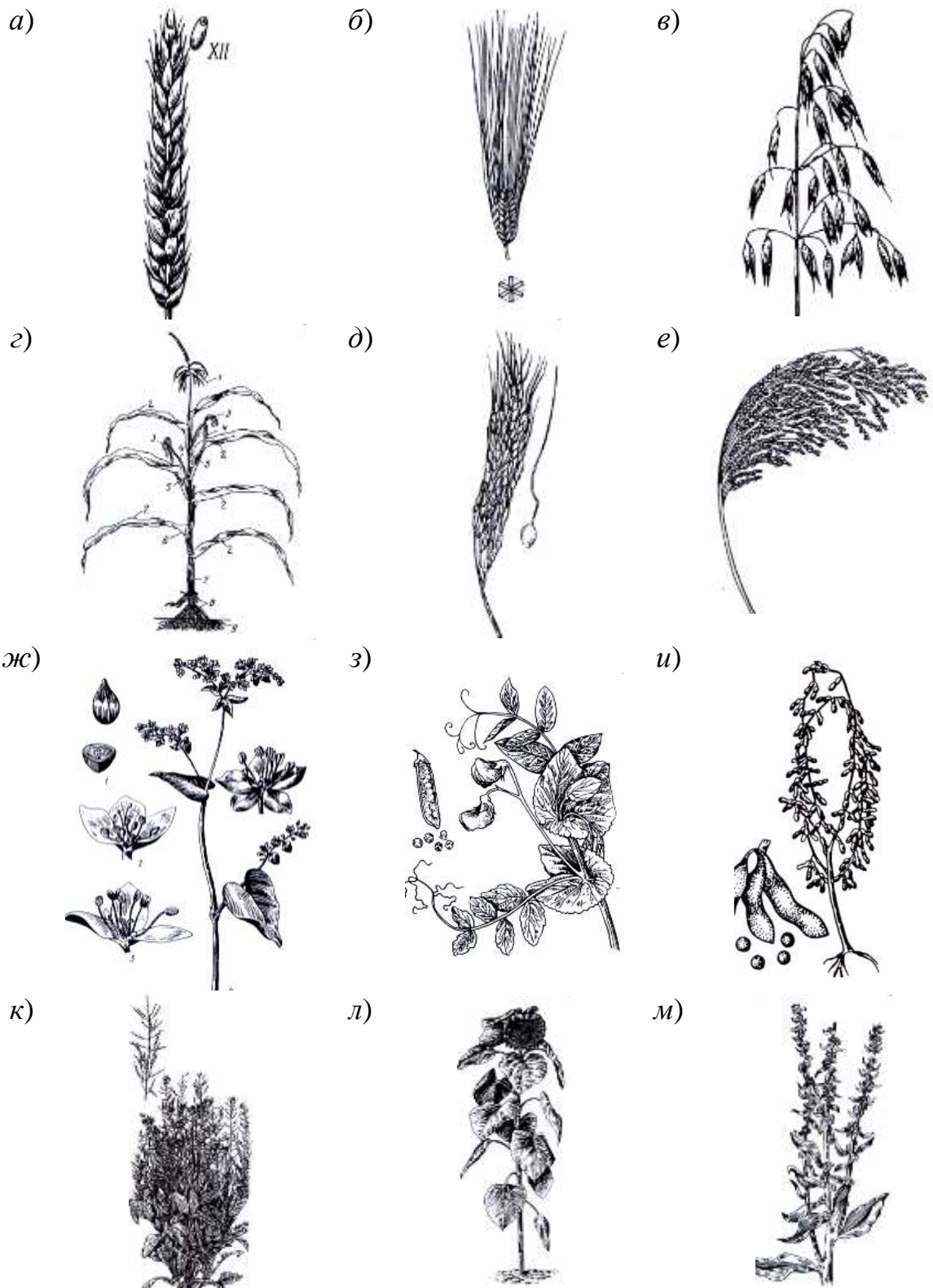


Рисунок 1.2 – Объекты уборки: а) пшеница; б) ячмень; в) овес; г) кукуруза; д) рис; е) просо; ж) гречиха; з) горох; и) соя; к) рапс; л) подсолнечник; м) сахарная свекла [101, 220]

Таблица 1.1 – Основные объекты комбайновой уборки в России (2018 год [240])

Культура	Площадь, тыс. га	Доля посевов, %
Зерновые, всего:	43585	54,73
Пшеница озимая	15296	19,21
Пшеница яровая	11968	15,03
Рожь озимая	978	1,23
Ячмень озимый	480	0,60
Ячмень яровой	7845	9,85
Тритикале озимая	138	0,17
Овес	2853	3,58
Кукуруза на зерно	2452	3,08
Рис	182	0,23
Гречиха	1045	1,31
Просо	260	0,33
Зернобобовые, всего:	2754	3,46
Масленичные, всего:	13941	17,51
Подсолнечник	8160	10,25
Соя	2949	3,70
Рапс	1576	1,98
Вся посевная площадь	79634	100

С точки зрения организации уборки, важно, что озимые и яровые хлеба имеют разные сроки созревания. Кроме того, озимые зерновые дают (в оптимальных для них климатических зонах) более высокие урожаи, чем яровые [267]. Что касается влияния на работу комбайнов особенностей строения различных колосовых и их сортов, то, в первую очередь, приходится учитывать их различную соломиность (отношение массы зерна к массе соломы) и вымолачиваемость зерна. Наибольшая соломиность характерна для ржи, а хуже всего вымолачивается зерно яровой пшеницы твердых сортов. Ячмень отличается низкорослостью, что создает определенные проблемы при его уборке в засушливые годы, особенно на плохо выровненных полях [161, 173].

По-разному реагируют колосовые зерновые на дождь. Созревшая рожь имеет практически открытые зерновки, поэтому они быстрее высыхают после дождя. У пшеницы зерна в колосе закрыты двойными чешуйками, между которыми дождевая вода скапливается и долго не испаряется. От продолжительного контакта с влажными чешуйками зерна «разбухают». В экстремально влажные годы, когда многодневным дождям круглосуточно сопутствует высокая влажность воздуха, не редки случаи прорастания зерен в колосьях даже на не полеглых посевах.

Существенно отличается от других зерновых культур по форме соцветий овес. Его зерна формируют в верхней части стебля метелку (рис. 1.2, в). В связи с этим, у овса большая предрасположенность к наматыванию его стеблей на рабочие органы комбайнов [257]. Наряду с рожью, овес дальше других зерновых культур продвинул на север.

В отличие от других зерновых, кукуруза выращивается как пропашная культура. Это связано с особенностями ее строения. Стебель толщиной 2-7 см хорошо облиствен и может иметь высоту от 60 см до 6 м. В пазухах листьев расположены початки с плодами (обычно – голыми зерновками), существенно более крупными, чем зерновки других зерновых культур (рис. 1.2, г). В одном початке может находиться 200-1000 зерен. В связи с этим кукуруза (как правило) в зонах, оптимальных для ее выращивания, дает более высокие урожаи зерна, чем любые другие зерновые культуры. Этим обусловлено ее доминирование в растениеводстве таких стран, как США и Бразилия. В России зон, благоприятных для выращивания кукурузы на зерно, мало, но и в них пока потенциальные возможности для наращивания объемов производства используются в недостаточной степени (табл. 1.1). Специфика строения растения требует особой конструкции рабочих органов для ее уборки.

Не менее значимой продовольственной культурой для населения Земли является рис. Специфической особенностью этого растения является повышенная требовательность к сумме активных температур и влажности почвы. В связи с этим, рис – типичная южная культура, выращиваемая на затоплен-

ных водой рисовых чеках (тщательно выровненных и обвалованных участках). Зерновки риса образуют метелку (рис. 1.2, *д*). Его сорта, выращиваемые в условиях самых южных регионов России, отличаются очень плохой вымолачиваемостью, что, наряду с низкой несущей способностью почвы рисовых чеков, предъявляет специфические требования к конструкции зерноуборочного комбайна.

Основными крупяными культурами для России традиционно являются просо и гречиха. В верхней части стебля проса, достигающего длины 1 м, расположена метелка с мелкими зернами, покрытыми пленкой (рис. 1.2, *е*). Зерна в метелке созревают не одновременно. При этом в период уборки, когда влажность зерна варьирует в пределах 18-20%, стебли и листья остаются зелеными, что затрудняет уборку прямым комбайнированием. Кроме того, приходится учитывать, что зерна проса очень мелкие, а покрывающая их пленка обладает минимальным коэффициентом трения (в емкости с просом человек может утонуть, как в воде).

Высота стебля гречихи варьирует в пределах 50-150 см. Соцветие представляет собой пазушную кисть (рис. 1.2, *ж*), насчитывающую до 1500 цветков. Как и у проса, в период уборки стебли и листья гречихи остаются сочными, а наряду с созревшими зернами в кисти имеются, как не созревшие плоды, так и цветки. Недостаточная прочность плодов (плод – треугольный орешек), их склонность к осыпанию и растянутый срок созревания (20-30 дней) предъявляют специфические требования, как к технологии уборки, так и к регулировке комбайна.

Специфика бобовых культур состоит в их низкорослости, склонности к полеганию и перепутыванию стеблей. Особенно это проявляется у гороха (рис. 1.2, *з*), большинство сортов которого на концах стеблей имеют усики, которыми растения цепляются друг за друга. У сои (рис. 1.2, *и*) и люпина стебли более прочные и сохраняют вертикальное положение в течение всей вегетации [68].

Плод бобовых культур – боб разной величины и формы. После созревания бобы склонны к растрескиванию по продольным швам, скручиванию створок и разбрасыванию семян. В наибольшей степени это явление свойственно гороху, в меньшей – сое и люпину. Успешно ведется селекция на исключение растрескивания бобов и осыпания семян. Ввиду низкорослости бобовых культур и размещения бобов до самого низа стебля, приходится настраивать жатки на самый низкий срез или использовать специальные бобовые жатки. Горох практически всегда приходится убирать отдельно, а сою и люпин можно убирать прямым комбайнированием.

В последнее время широкое распространение в умеренном климатическом поясе получили посевы рапса (рис. 1.2, *к*). Эта масличная культура имеет высокие жесткие и ветвистые стебли, практически лишённые в период уборки гибкости (одревесневают при высыхании). Плод рапса – многосемянный стручок, содержащий 4-5 мелких шаровидных семян. Рапс созревает неравномерно. Как и у бобовых культур, его стручки склонны к растрескиванию и высыпанию семян. Убирать рапс можно как прямым, так и отдельным комбайнированием. При этом жатка должна быть соответствующим образом адаптирована к особенностям строения растения [144].

Основной масличной культурой в России в настоящее время является подсолнечник. Величина посевных площадей, занятых подсолнечником, практически сопоставима с посевной площадью под ячменем (табл. 1.1). Подсолнечник имеет грубый прямостоящий стебель высотой 1,0-2,5 м и толщиной у основания 2-4 см. Расположенная в верхней части стебля корзинка (рис. 1.2, *л*) содержит 600 и более плодов – семян. О степени созревания подсолнечника судят по окраске тыльной стороны корзинки, опадению язычковых цветков, окраске семян и затвердению в них ядер, а также засыханию большинства листьев. Семена подсолнечника легко вымолачиваются. При полной спелости (влажность семян 10-12%) растения становятся сухими и ломкими, а семечки склонны к осыпанию. Кроме того, они легко повреждаются при излишне жестком режиме обмолота. Все эти нюансы



приходится учитывать при разработке приспособлений (адаптеров) к зерноуборочному комбайну, предназначенных для уборки подсолнечника.

При разработке зерноуборочного комбайна учитывается и возможность уборки им трав (на семена), и семенников сахарной свеклы и других корнеплодов и овощей [150, 259]. Для сахарной свеклы характерно соцветие в виде мутовчатой колосовидной кисти (рис. 1.2, м). Плоды – орешки – формируются группами по 3-4 штуки в верхней части цветоносов. Что касается трав, то по свойствам и форме соцветий они повторяют практически все рассмотренные выше культуры, отличаясь худшей вымолачиваемостью и более мелкими семенами. В связи с этим приходится оборудовать комбайн дополнительными приспособлениями и настраивать на соответствующий режим работы.

Анализ данных, представленных в таблице 1.1, свидетельствует о том, что 54,73% от всей посевной площади в России занимают зерновые культуры. При этом порядка 62,55% от их общего числа приходится на пшеницу. Следовательно, при разработке новых и совершенствовании существующих технологических процессов комбайна в качестве объекта исследования следует выбирать вышеуказанную культуру. Причем, наиболее распространенными сортами озимой пшеницы, районированными в центральном федеральном округе (ЦФО), являются «Московская 39», «Московская 56» и «Немчиновская 57», а среди яровой пшеницы: «Эстер», «Сударыня» и «Воронежская 18» [186, 291].

### **1.3 СПОСОБЫ УБОРКИ И ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ИХ СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ**

В зависимости от вида убираемой культуры, ее состояния, урожайности, засоренности, погодных и иных условий уборку осуществляют либо путем прямого комбайнирования (однофазный способ), либо двухфазным (раздельным) способом, либо очесом растений на корню. Альтернативные трем основным способам варианты организации уборки находятся пока на стадии экспериментальной проверки.

**Однофазный способ.** Зерноуборочный комбайн за один проход срезает убираемые растения (или иным способом отделяет от стеблей початки, корзинки и другие соцветия), обмолачивает полученную таким образом массу, выделяет из нее и очищает зерно, накапливает его в бункере, а солому и полову выводит за пределы комбайна (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Общий вид зерноуборочного комбайна, оснащенного жаткой для однофазного способа уборки: 1 – зерноуборочный комбайн; 2 – жатка для зерновых культур

Все эти технологические процессы происходят в комбайне одновременно. При этом в зависимости от принятого в хозяйстве способа дальнейшего использования незерновой части урожая, она может измельчаться и в этом виде загружаться в специальные прицепы с последующей вывозкой за пределы поля или разбрасываться по его поверхности; укладываться в валок или собираться в копнитель (в последнее время довольно редко), с периодическим сбросом копны на поверхность поля [131, 261, 263, 270, 283].

Прямым комбайнированием убирают равномерно созревающие, мало-засоренные, изреженные (густота стеблестоя менее 300 растений на 1 м<sup>2</sup>)

зерновые культуры (или наоборот, густые и высокоурожайные посевы), низкорослые (длина менее 50 см) зерновые культуры, а также зерновые с подсевом трав. Используя специальные адаптеры, прямым комбайнированием, как правило, убирают кукурузу и подсолнечник. Преимущественно прямым комбайнированием убирают сою и люпин. Уборку зерновых прямым комбайнированием начинают при полной спелости зерна, когда его влажность не превышает 25%. При прямом комбайнировании за жаткой комбайна допускается до 1% потерь для прямостоячих хлебов и 1,5% для полеглих. Общие потери за молотилкой из-за недомолота и свободным зерном должны быть не более 1,5%. Чистота зерна в бункере должна быть не ниже 95%. Дробление семенного зерна не должно превышать 1% и продовольственного – 2% [64, 102, 105, 137, 283, 284].

Одним из недостатков данного способа является то, что уборка хлебов должна проводиться в очень короткие и сжатые сроки. В противном случае, происходит их перестой, и как следствие этого, рост потерь зерна (10-20%) за счет его естественного осыпания [38, 243, 247, 272].

**Двухфазный способ (раздельная уборка).** Первая фаза уборки заключается в скашивании убираемой культуры и укладке ее в валки на поверхность поля валковой жаткой (рис. 1.4) [42, 60, 118, 136, 161, 173].



Рисунок 1.4 – Скашивание и укладка хлебов в валок при раздельном способе уборки: 1 – трактор; 2 – валковая жатка

Через 4-6 дней подсохшие валки подбирает и обмолачивает зерноуборочный комбайн (рис. 1.5). В связи с тем, что зерно в валках подсыхает и дозревает (за счет питательных веществ, поступающих из скошенных стеблей), уборку начинают на 4-12 дней раньше, чем при прямом комбайнировании. Ориентиром для начала уборки служит момент достижения зерном середины восковой спелости, соответствующей его влажности в пределах 25-35%.



Рисунок 1.5 – Подбор и обмолот валков при раздельном способе уборки: 1 – зерноуборочный комбайн; 2 – подборщик

Раздельным способом убирают неравномерно созревающие культуры (горох, овес, ячмень, гречиха, просо и др.), склонные к осыпанию и полеганию, засоренные посевы, высокостебельные культуры с перепутанными стеблями (например, рапс) или недостаточно урожайные, для обеспечения более полной загрузки зерноуборочного комбайна. В последнем случае широкозахватной валковой жаткой формируют сдвоенные валки, за счет чего, при неизменной поступательной скорости комбайна, секундная подача хлебной массы в молотилку на подборе валков удваивается [160, 179, 190].

При скашивании растений в фазе восковой спелости зерна уменьшается его выбивание рабочими органами жатки. При этом на 1 м<sup>2</sup> должно быть не менее 250 стеблей, их высота не должна быть ниже 60 см, а высота среза должна поддерживаться в пределах 12-25 см (для риса 25-30 см). В противном случае стерня может не выдержать веса уложенного валка, он начинает контактировать с поверхностью почвы, плохо подсыхает, а в дождливую погоду велик риск порчи зерна и даже его прорастания в колосьях. В связи с этим в условиях повышенной влажности стремятся формировать широкие тонкие валки, а в засушливой зоне – узкие толстые с ориентацией стеблей под углом 10-30° к оси валка. Это обусловлено тем, что чем шире и тоньше валок, тем быстрее он просыхает, но тем больше могут быть потери пересохшего зерна за счет его выбивания из колосьев рабочими органами подборщика [73, 222, 228, 232, 240, 246, 268].

При раздельном способе уборки потери зерна за валковой жаткой допускаются не более 0,5% для прямостоячих хлебов и 1,5% для полеглих. При подборе валков потери зерна не должны превышать 1%, а чистота зерна в бункере должна быть не менее 96% [64, 225, 226, 247, 254, 283].

При выборе одного из двух основных способов уборки следует иметь в виду, что:

- при однофазном способе уборки высоко и среднеурожайных зерновых ее себестоимость, как правило, ниже, чем при двухфазной уборке;
- экономические преимущества двухфазной уборки ощутимы в зоне сухих степей, при урожайности зерна ниже 20 ц/га [29, 69, 90, 92, 160];
- двухфазная уборка позволяет исключить искусственную сушку зерна и отделить в комбайне вегетативные части и семена сорняков [231];
- увеличение сроков уборки при двухфазном способе уменьшает величину амортизационных отчислений, приходящихся на единицу продукции, ускоряет оборот капитала, затраченного на приобретение уборочной техники [87, 253];

- при двухфазном способе уборки из-за многократных проходов техники по полю увеличивается плотность почвы [1, 29, 84, 251];
- в случае ненастной погоды, качество зерна в валках может существенно ухудшиться, а его потери увеличиться [59, 253].

**Очес растений на корню.** Многолетние исследования и практический опыт свидетельствуют о том, что уменьшить затраты на уборку зерновых культур можно путем применения комбайнового очеса растений на корню [36, 110, 124, 164, 236, 258]. Суть его заключается в том, что на комбайн вместо обычной жатки, устанавливается очесывающий адаптер (рис. 1.6), рабочий орган которого представляет собой вращающийся ротор 1 с зубьями 2.

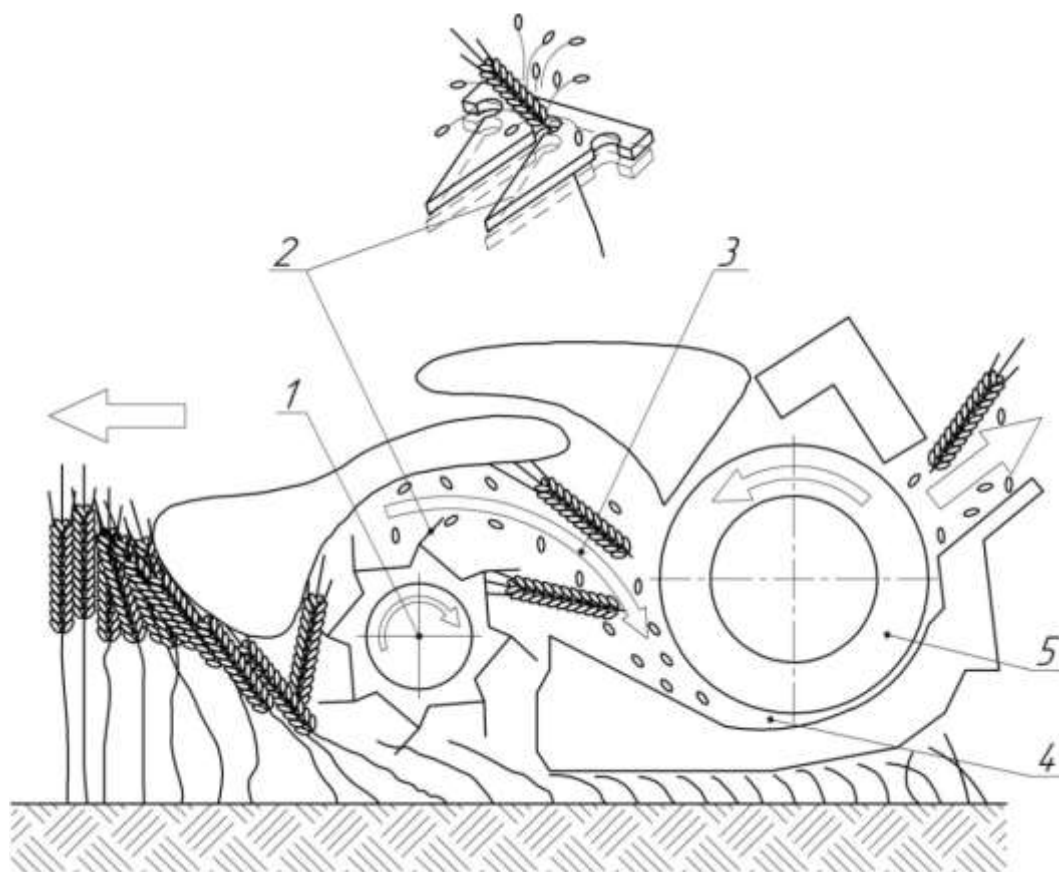


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема работы однобарабанной очесывающей жатки: 1 – очесывающий ротор; 2 – очесывающие зубья; 3 – зерно и оторванные колосья; 4 – сборная камера; 5 – шнек

При поступательном движении комбайна, зубья 2 вращающегося ротора 1 прочесывают растения снизу вверх. При этом зубья 2, встретившись

с колосьями растений, обрывают их. При обрыве часть зерен выбивается из колоса. Частота вращения очесывающего ротора 1 подбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, стебли не вырывало из земли, а с другой – колосья освобождались от зерна без повреждений зерновок [13]. Выбитые зерна и оборванные колосья 3 переносятся под действием сил инерции и воздушного потока в сборную камеру 4. Шнек 5, расположенный на дне сборной камеры 4, подает оборванную массу к наклонному транспортеру, который захватывает и переносит ее к молотильному аппарату комбайна. При этом зерновая часть урожая собирается в бункер, а солома остается на поле нетронутой. Что же делать с ней дальше? Одним из вариантов проведения последующей технологии уборки незерновой части урожая является скашивание соломы (косилкой или кормоуборочным комбайном), ее измельчение и заделка в почву. Для эффективной заделки в почву высокой стерни, оставшейся в поле после очеса растений на корню, используют тяжелые дисковые бороны, дискаторы или луцильники [91, 126]. Заделка соломы способствует накоплению органических веществ, образованию гумуса в пахотном слое и улучшению агрохимических и физических свойств почвы [152, 153, 258, 272, 289]. Однако, такая технология уборки незерновой части урожая повышает экономические затраты хозяйств, а также увеличивает плотность почвы вследствие многократных проходов техники по полю.

Второй вариант технологии заключается в том, чтобы не убирать солому с поля, а оставлять ее под зиму для снегозадержания и сохранения влаги в почве. Чаще всего такая технология востребована в степных регионах, подверженных засухе, ветровой эрозии и пылевой бури [76]. Появление последней в Ростовской области в 2020 году уменьшило количество солнечного света, что вызвало затруднение в работе общественного транспорта. В течение нескольких дней было полностью приостановлено автомобильное и авиасообщение между городами. Людям было рекомендовано воздержаться от выхода из дома, поскольку на улице стало тяжело дышать. Весной солому

с поля можно также не убирать, а посеять по ней новую культуру (система нулевой обработки «No-Till»).

Использование очесывающего адаптера при таком способе уборки уменьшает поступление технологической массы в комбайн в 1,5-2 раза, что приводит к экономии до 70% энергии, которую комбайн расходует на деформацию соломы в молотилке. Производительность уборки повышается в 1,3-1,5 раза и на 20-25% снижается расход топлива по сравнению с традиционной жаткой [35, 39, 91, 93, 99, 125, 219, 276]. Себестоимость зерна уменьшается при этом на 25-30% [117, 258, 278, 300].

Уборка зерновых культур с применением комбайнового очеса растений на корню широко реализуется в таких странах как: США, Канада, Англия, Аргентина и Китай. Здесь следует отметить, что все перечисленные страны традиционно являются не только крупнейшими производителями, но и экспортерами зерна. Очес растений на корню все чаще становится востребованным в России, Украине и Казахстане. Особенно эффективным он оказался в регионах с дефицитом влаги в почве (Алтай, Казахстан, Поволжье). Оставшаяся на поле высокая стерня в зимний период способствует задержанию снега и сохранению влаги в почве. Кроме того, очесывающие жатки хорошо зарекомендовали себя при уборке полеглих хлебов и растений со спутанным стеблестоем [91, 93].

На сегодняшний день рынок очесывающих адаптеров представлен тремя типами жаток – одно- (рис. 1.6), двух- (рис. 1.7) и трехбарабанными [34, 124, 152, 191, 272]. По принципу действия они схожи между собой. Основное их отличие заключается в том, каким образом возвращаются в основной поток летящие вперед зерна. У однобарабанной жатки для этого используется пассивная отражающая поверхность (рис. 1.6), а у двухбарабанной – очесывающий барабан, который направляет все отраженное зерно от подающего барабана (рис. 1.7). Вследствие того, что барабаны 2 и 3 вращаются навстречу друг другу, внутри корпуса адаптера создается зона разряжения, способствующая снижению потерь зерна при его осыпании.



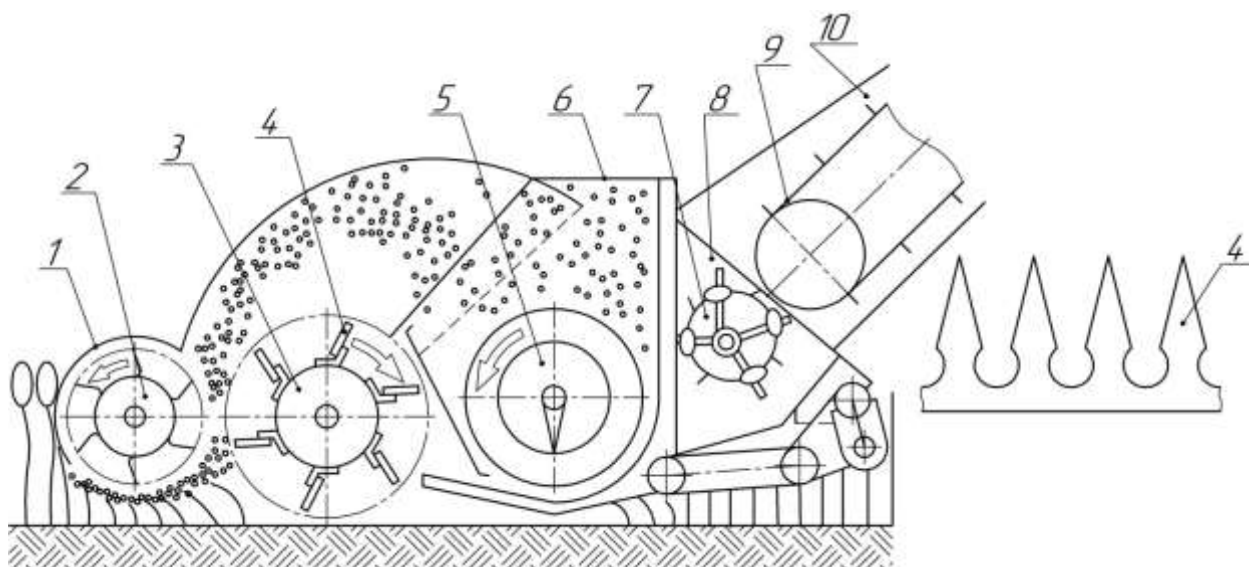


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема работы двухбарабанной очесывающей жатки: 1 – кожух; 2 – подающий барабан; 3 – очесывающий барабан; 4 – гребенка; 5 – шнек; 6 – платформа; 7 – битер; 8 – проставка; 9 – плавающий транспортер; 10 – наклонная камера

Наиболее известной на рынке очесывающих адаптеров является английская фирма «Shelbourne Reynolds», которая выпускает жатки двух серий: CVS и XCV [305]. Жатки серии CVS снабжены одним очесывающим барабаном диаметром 610 мм с 8 рядами гребенок и имеют 8 модификаций с шириной захвата от 4,2 до 9,6 метра. Для компенсации более тяжелой левой стороны очесывателя, содержащей привод, выход на наклонную камеру выполнен со смещением вправо. Кроме того, такое техническое решение облегчает процесс поперечного выравнивания жатки относительно наклонной камеры.

Модельный ряд очесывающих жаток серии XCV (рис. 1.8) представлен тремя модификациями с шириной захвата от 9,6 до 12,6 метра. Основным их конструктивным отличием по сравнению с серией CVS, является наличие трех очесывающих барабанов с двумя специальными разделительными пластинами между ними. Эти жатки оснащены опорными подпружиненными колесами, установленными с обеих сторон от адаптера. Для уменьшения металлоемкости конструкции, диаметры барабанов имеют небольшие размеры

(в сравнении с серией CVS). Производством жаток «Shelbourne Reynolds» занимаются в США, Германии и Китае.



Рисунок 1.8 – Общий вид зерноуборочного комбайна в агрегате с очесывающей жаткой «Shelbourne Reynolds» серии XCV: 1 – зерноуборочный комбайн; 2 – очесывающая жатка

В Украине исследованием эффективности работы очесывающих устройств занимались ученые из научно-исследовательской лаборатории при Мелитопольском институте механизации сельского хозяйства под руководством профессора П.А. Шабанова [276, 278]. Многочисленные исследования и эксперименты в области очеса растений на корню привели к заключению, что основной рабочий орган жатки (гребенка) должен быть активный и в основу его работы должно быть положено также физическое явление такое, как удар гребенки о зерновку. Многие наработки мелитопольских ученых были уникальными и по-настоящему прорывными для своего времени, но в девяностые годы работы в данном направлении были свернуты и позднее с успехом использованы в зарубежных образцах.

Самой популярной среди украинских аграриев является двухбарабанная очесывающая жатка «Славянка УАС» производства ООО «УкрАгросервис» (рис. 1.9). Модельный ряд этих жаток имеет три модификации с шириной захвата от 5 до 7 метров [236, 258, 279].



Рисунок 1.9 – Общий вид зерноуборочного комбайна в агрегате с очесывающей жаткой «Славянка УАС»: 1 – зерноуборочный комбайн; 2 – очесывающая жатка

Из небольшого числа очесывающих устройств российского производства можно выделить «ОКД-4» (рис. 1.7), которые производятся СКБ «Красноярского комбайнового завода» и «ОЗОН», выпускаемые ПАО «Пензмаш» (рис. 1.10) [36, 152, 164, 173, 209]. Жатки «Озон» оснащены очесывающим барабаном диаметром 700 мм с 10 рядами гребенок, имеют три модификации с шириной захвата от 5 до 7 метров и могут агрегатироваться комбайнами как отечественного, так и зарубежного производства. К основным преимуществам

очесывателей «Озон» относятся: сравнительная малая стоимость адаптера и его комплектующих, а также простота в обслуживании и эксплуатации.



Рисунок 1.10 – Общий вид зерноуборочного комбайна в агрегате с очесывающей жаткой «ОЗОН»: 1 – зерноуборочный комбайн; 2 – очесывающая жатка

В последние годы совершенствованием процесса очеса растений на корню занялись сразу несколько аграрных вузов. В результате синтезированы новые технические решения, защищенные патентами на изобретения, но завершить работу хотя бы на этапе промежуточного результата не позволяет отсутствие государственного финансирования. В связи с этим трудно предположить, когда на рынке появится отечественный очесывающий адаптер, конкурентоспособный по сравнению с зарубежными образцами.

**Альтернативные способы уборки** основаны на том, что весь биологический урожай (или только смесь зерна с половой) обрабатывают на стаци-

онарных пунктах. При этом существенно уменьшается сложность и цена мобильного уборочного оборудования, но увеличиваются затраты на транспортировку вороха с поля, и возникают проблемы с утилизацией незерновой части урожая. По мере роста цен на энергоносители не исключено, что в отдельных случаях такой способ организации уборки может оказаться экономически привлекательным [102, 135, 151, 240, 283].

Система машин, предназначенных для уборки зерновых, бобовых и масличных культур соответствует принятой технологии уборки. Ее основу составляет самоходный зерноуборочный комбайн, на корпус молотилки которого (в ее передней части) предусмотрена возможность монтажа сменных адаптеров. Комбайн может быть снабжен жаткой для прямого комбайнирования, валковой жаткой, платформой-подборщиком, адаптерами для уборки подсолнечника, кукурузы на зерно, очесывающим устройством [12, 51-53].

Валковые жатки отличаются как назначением (зерновые, бобовые, специальные), так и способом агрегатирования. Кроме навесных, выпускают прицепные и самоходные валковые жатки. В последнем случае, как правило, предполагается использование их энергетического модуля для уборки трав, кукурузы на силос и т.п. За счет этого увеличивается его годовая загрузка и уменьшается себестоимость уборки. При использовании прицепных валковых жаток энергетическим средством для них служит трактор общего назначения, имеющий в период уборки зерновых минимальную загрузку на других работах [17, 24-26, 58].

Кроме самоходных зерноуборочных комбайнов могут быть их прицепные, навесные и модульные версии. Расширение способов агрегатирования обусловлено стремлением к увеличению годовой загрузки (соответственно, к уменьшению срока окупаемости) для моторной установки, органов управления и ходовой части, стоимость которых составляет значительную часть от стоимости комбайна в целом.

Анализ представленных способов свидетельствует о том, что очес растений на корню является одной из наиболее перспективных технологий ком-

байновой уборки урожая. Однако распространение его сдерживается тем, что при ориентации на существующую технологическую схему зерноуборочного комбайна теоретически возможный потенциал роста эффективности не реализуется. Отчасти это связано с тем, что в поступающем в молотильное устройство очесанном ворохе содержится до 85% свободного зерна [124, 91, 278]. Поступление свободного зерна в молотильную камеру зерноуборочного комбайна является нецелесообразным, поскольку это способствует его чрезмерному дроблению рабочими органами молотилки (порядка 8%) [124, 219, 258, 276, 277, 279] и повышению энергоемкости процесса обмолота. Кроме того, снижается пропускная способность устройства.

С точки зрения оптимизации технологического процесса, целесообразно было бы разделить указанный зерновой ворох на фракции до его поступления в молотилку, максимально уменьшив подачу в молотильный аппарат свободного зерна и мелких примесей. Вследствие этого должна возрасти его пропускная способность, а, следовательно, и производительность комбайна.

#### **1.4 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА**

При всем разнообразии конструкций, практически все известные зерноуборочные комбайны реализуют одну и ту же технологию воздействия на объект уборки. Ее структура обусловлена строением растений (рис. 1.2), для уборки которых предназначен комбайн [161, 173, 240].

Во-первых, приходится формировать поток растительной массы, пока она еще находится на корню. Эта подготовительная операция призвана обеспечить стабильность процесса забора плодосодержащей части растений (колосьев, початков, корзинок и т.д.) и свести к минимуму возможные потери. В связи с этим, следует надежно отделить полосу убираемой растительной массы от ее остального массива (с одной или с двух сторон), поднять полегшие стебли, при необходимости, сформировать их в «ручьи» и поддерживать, пе-

ремещаая назад до передачи отделенной от корня (или стебля) массы далее по технологической цепочке. На завершающей стадии процесса взаимодействия формирующих рабочих органов с растительной массой происходит отделение и забор плодосодержащих элементов растений (с частью стебля или без него). Отделение может осуществляться путем срезания, отрыва или очеса.

Размещенные первыми в технологической цепочке формирующие и отделяющие рабочие органы являются основными компонентами жатки или действующего на ином принципе специализированного сменного адаптера. Для осуществления процесса формирования потока растительной массы при уборке большинства зерновых культур прямым комбайнированием, жатку снабжают боковыми делителями, мотовилом 22 и стеблеподъемниками, монтируемыми вместе с режущим аппаратом 21 (рис. 1.11), осуществляющим отделение плодосодержащей части растений (стеблей с колосьями или метелками) от корня [16, 283].

При раздельной уборке процесс формирования потока и отделения плодосодержащей части растений осуществляет валковая жатка. В связи с этим, на долю зерноуборочного комбайна остается лишь один из элементов процесса забора плодосодержащей части растения, заключающийся в подборе валка.

Следующим технологическим процессом является формирование потока вороха и его сужение до ширины молотилки. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, ширина убираемой полосы растений всегда существенно превышает ширину комбайна, поэтому ее приходится приводить в соответствие с параметрами его других рабочих органов. Во-вторых, заборная часть комбайна (жатка) копирует поверхность поля не независимо от его опорных колес. В связи с этим приходится учитывать неизбежность перекосов в зоне передачи потока от одних рабочих органов другим и предусматривать для этой цели наиболее надежный механизм продольного и поперечного копирования, адаптированный к работе в этих условиях.

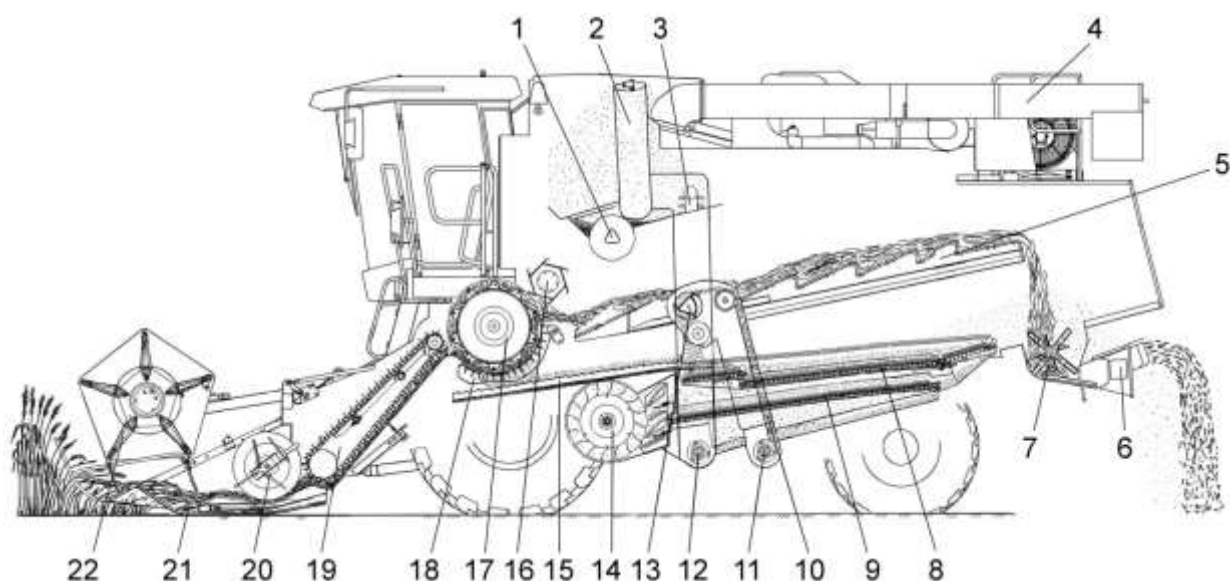


Рисунок 1.11 – Схема рабочего процесса комбайна с классическим МСУ: 1 – шнек горизонтальный; 2 – шнек загрузной зерновой; 3 – элеватор зерновой; 4 – шнек выгрузной; 5 – соломотряс; 6 – дефлектор; 7 – соломоизмельчитель; 8 – верхний решетный стан; 9 – нижний решетный стан; 10 – элеватор колосовой; 11 – шнек колосовой; 12 – шнек зерновой; 13 – домолачивающее устройство; 14 – вентилятор; 15 – транспортная (стрясная) доска; 16 – отбойный битер; 17 – барабан молотильный; 18 – подбарабанье; 19 – плавающий транспортер; 20 – шнек; 21 – режущий аппарат; 22 – мотовило

Большинство процессов сепарации осуществляются в комбайне с использованием сил гравитации. То есть, ворох (или его отдельные компоненты) под действием воздуха и вибрации перемещается сверху вниз. В связи с этим, перед началом этих процессов его необходимо поднять на определенную высоту. Одновременно с подъемом вороха происходит процесс его предварительного разгона и растаскивания массы (уменьшения толщины ее слоя). Для этой цели служит наклонная камера, в которой ворох поднимается с уровня днища жатки до входа в молотильное пространство. Кроме обязательного во всех случаях плавающего транспортера 19 во многих комбайнах первым прием вороха от жатки осуществляет битер, который может быть



смонтирован, как внутри специальной проставки, так и непосредственно в корпусе наклонной камеры [88, 89, 243, 261, 268, 283].

В молотильно-сепарирующем устройстве комбайна происходит отделение зерновок от цветоложа и выделение из общего потока соломы или иных крупных компонентов (например, корзинок подсолнечника или стержней початков кукурузы). Первая часть процесса осуществляется за счет удара и протаскивания массы в зазоре между вращающимся барабаном 17 и неподвижным подбарабаньем 18 (декой). Процесс отделения от основной массы длинностебельной соломы зерна и мелких примесей (половы, мелких кусков соломы, колосьев и т.д.), начинающийся в молотильной части (за счет выполнения деки решетчатой), завершается в сепарирующей части. У комбайнов с молотилкой, выполненной по классической схеме (ось вращения барабана 17 перпендикулярна потоку обмолачиваемой массы), выделение соломы из состава вороха осуществляет специальный сепаратор, выполненный, например, в виде клавишного соломотряса (5, рис. 1.11). При этом солома удаляется за пределы комбайна, а остальные компоненты вороха возвращаются в его переднюю часть для продолжения процесса сепарации в нижнем ярусе рабочих органов, традиционно объединяемых термином «очистка» [102, 105, 284].

В комбайнах с аксиально-роторным молотильным устройством обмолот хлебной массы, и сепарация зернового вороха происходит в едином рабочем органе, называемым ротором (рис. 1.12). То есть, необходимость в дополнительном сепарирующем устройстве (соломотрясе), специально предназначенном для отделения соломы, в этом случае отсутствует. При работе комбайна хлебная масса подается в роторное молотильное устройство 5, где она перемещается по спирали в осевом направлении бичами и направляющими, размещенными на поверхности подбарабанья. Обмолот производится в результате трения и центробежного воздействия рабочих элементов молотильно-сепарирующего устройства на хлебную массу, проходящую параллельно оси ротора.

При одинаковых габаритах комбайнов зона обмолота хлебной массы в роторном молотильно-сепарирующем устройстве увеличивается в 4-5 раз. За счет этого время пребывания хлебной массы в молотильном зазоре и количество воздействий на нее в 4-10 раз больше, чем в барабанных. Кроме того, уменьшается интенсивность механических воздействий, что способствует снижению потерь и травмирования зерна [255].



Рисунок 1.12 – Общий вид зерноуборочного комбайна «Тогит 740» с аксиально-роторным МСУ: 1 – жатка; 2 – наклонная камера; 3 – роторная молотильная система; 4 – система очистки; 5 – измельчитель-разбрасыватель; 6 – силовая установка; 7 – бункер

Как и при классической схеме обмолота, мелкие компоненты вороха возвращаются для сепарации в переднюю часть комбайна на рабочие органы нижнего яруса. Сепарация мелкого вороха осуществляется на колеблющихся решетках 8, 9 жалюзийного типа, обдуваемых потоком воздуха, создаваемым вентилятором 14 (рис. 1.11). При этом разделение осуществляется, как по размерам компонентов, так и по их парусности [46, 161, 173].

Более крупные обломки соломы, стеблей сорняков и т.п. сходят с верхнего решета, а зерно, как более мелкий компонент, проходя через щели жа-

люзийных поверхностей, попадает в зерновой шнек 12. Имеющие сопоставимые с зерном размеры легкие частицы (чешуйки колосьев и т.п.) выносятся за пределы комбайна воздушным потоком. Зерновой шнек 12 выводит очищенное зерно за пределы очистки и специальные транспортеры 3 (скребковые или шнековые) подают его в бункер. По мере заполнения бункера периодически осуществляется выгрузка зерна в транспортные средства с помощью выгрузного шнека 4.

В комбайнах с комбинированным (гибридным) молотильно-сепарирующим устройством (рис. 1.13) для обмолота растительной массы используется классическое барабанное МСУ, а сепарация грубого (соломистого) вороха осуществляется за счет роторных соломосепараторов 20.

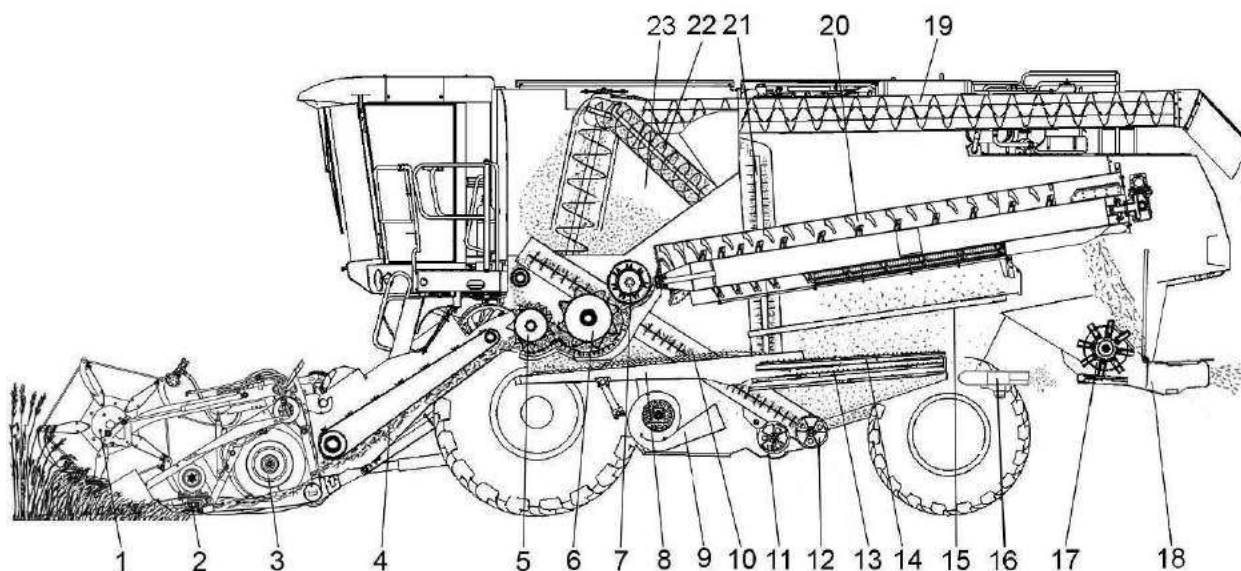


Рисунок 1.13 – Схема рабочего процесса комбайна с комбинированным (гибридным) МСУ: 1 – мотовило; 2 – режущий аппарат; 3 – шнек; 4 – плавающий транспортер; 5 – барабан ускоряющий; 6 – молотильный барабан; 7 – отбойный битер; 8 – транспортная (стрясная) доска; 9 – вентилятор; 10 – колосовой элеватор; 11 – шнек зерновой; 12 – шнек колосовой; 13 – стан решетный нижний очистки; 14 – стан решетный верхний очистки; 15 – скатная доска; 16 – половоразбрасыватель; 17 – ротор соломоизмельчителя; 18 – дефлектор; 19 – шнек выгрузной; 20 – роторные соломосепараторы; 21 – зерновой элеватор; 22 – шнек загрузной; 23 – бункер

Обмолоченная хлебная масса из молотильного аппарата с помощью битеров 7 подается в соломосепаратор 20 с двумя роторами, «обернутыми» неподвижными решетчатыми деками и вращающимися во встречных направлениях. На поверхности роторов закреплены четыре продольных ряда специальных штифтов, которые интенсивно выделяют зерно из соломы. Выделенное роторным сепаратором 20 зерно поступает сначала на скатную доску 15 и далее на очистку. Такая комбинированная схема, сочетающая достоинства барабанного обмолота и роторной сепарации, лучше всего подходит для хозяйств, которые, наряду с зерновыми, в больших объемах убирают кукурузу на зерно.

Вне зависимости от конструкции и режима работы молотильного устройства не исключается вероятность наличия в ворохе необмолоченных колосьев. Это обусловлено тем, что, при определенных условиях, удар бича барабана 17 может разрушить не связи зерновок с цветоложем, а обломить соломину у основания колоса (рис. 1.11). Тогда он целиком проходит через отверстие подбарабанья 18 и вместе с остальными компонентами вороха поступает на очистку. В связи с этим в задней части верхнего решета 8 предусматривается удлинитель, предназначенный для улавливания таких колосьев. Из колосового шнека 11 недомолоченные колосья и сопутствующие им зерно и мелкие примеси, в небольших количествах сходящие с нижнего решета 9, подаются на повторный обмолот колосовым элеватором. В одних комбайнах для этой цели используется специальное домолачивающее устройство 13 (рис. 1.11). В других – ворох возвращается к основному молотильному барабану.

При осуществлении своих технологических функций рабочие органы комбайна совершают различные по характеру и скорости движения, энергетическое обеспечение которых осуществляет двигатель внутреннего сгорания. В связи с этим, он должен быть связан с рабочими органами механическими, гидравлическими и электрическими приводами. Значительную часть

энергии двигателя потребляет ходовая система, также являющаяся сложной комбинацией различных передаточных механизмов.

При работе комбайна осуществляется непрерывный мониторинг ситуации и оперативное реагирование на ее изменение в сторону ухудшения качества выполнения технологического процесса. В связи с этим, комбайн должен иметь систему сигнализации и контроля, предохранительные и регулировочные устройства [46, 74, 89].

Как и любая сельскохозяйственная техника, комбайн не может пока функционировать без участия человека. В связи с этим в его конструкции важную роль играет создание надежной и простой системы управления и комфортных условий для оператора. В настоящее время все большее число функций по контролю, управлению и регулировке сосредотачивается в кабине механизатора. Со своего рабочего места он может оперативно изменять режим работы практически всех рабочих органов и систем.

В связи с тем, что комбайну при переезде с поля на поле иногда приходится перемещаться по дорогам общего назначения, его конструкция должна предусматривать возможность быстрого отсоединения, удобной транспортировки и столь же быстрого подсоединения не габаритной части машины – жатки. С этой целью она, как правило, поставляется вместе со специальным прицепом для ее перевозки, а удобство ее соединения и отсоединения обеспечивает особая конструкция наклонной камеры и оптимальное расположение приводов, гидравлических рукавов и электрических кабелей.

## **1.5 ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, АДАПТИРОВАННЫХ К РАБОТЕ С ОЧЕСАННЫМ ЗЕРНОВЫМ ВОРОХОМ**

Согласно исследованиям большинства ученых [124, 237, 244, 258, 276, 279] установлено, что в состав очесанного зернового вороха входит: свободное зерно (60-85%), оборванные колосья (10-25%), а также солоmistые частицы и полова (7-25%). Таким образом, при совершенствовании технологии очеса

растений на корню наиболее актуальной задачей становится максимальная адаптация последующих технологических процессов к физико-механическим свойствам полученного вороха. Так, в качестве проблемы начинает доминировать чрезмерное содержание в ворохе мелких легких примесей и свободного зерна, а также наличие колосьев разной длины, лишенных соломы. Следовательно, целесообразно осуществить предварительную сепарацию очесанного вороха до поступления его в молотильное устройство.

На первой стадии целесообразно выделить из очесанного вороха все легкие примеси. Чаще всего для этих целей используют сетчатую поверхность, смонтированную на задней стенке корпуса адаптера (рис. 1.14) [2].

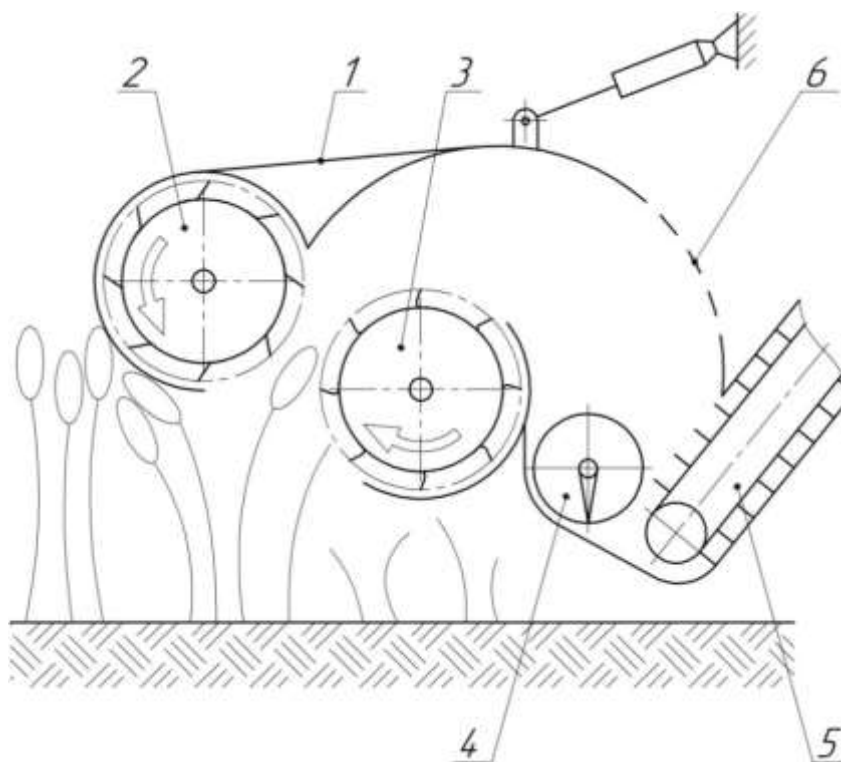


Рисунок 1.14 – Устройство для обмолота сельскохозяйственных культур на корню (SU авторское свидетельство № 1165278): 1 – корпус; 2 – подающий барабан; 3 – очесывающий барабан; 4 – шнек; 5 – плавающий транспортер; 6 – сетчатая поверхность

Воздушный поток, генерируемый очесывающим барабаном, захватывает легкие примеси и выводит их вместе с собой через отверстия сетчатой поверхности. Более тяжелые фракции (свободное зерно, колоски и солома) под

действие силы тяжести опускаются в приемную камеру и шнеком подаются к плавающему транспортеру наклонной камеры.

Недостатком указанной группы технических решений является то, что эффективная сепарация зерна и легких примесей невозможна, так как в этом случае вместе с потоком воздуха и легкими примесями через отверстия сетчатой поверхности должна выноситься и значительная часть свободного зерна. Это существенным образом увеличивает потери урожая. Кроме того, траектория движения воздуха с пылевидными частицами после прохождения отверстий сетчатого окна направлена в сторону лобового стекла кабины зерноуборочного комбайна, что существенно снижает обзор комбайнеру.

Устранить указанный недостаток не позволяет даже и минимизация отверстий сетчатой поверхности, размер которых существенно меньше размеров свободного зерна. Это связано с тем, что отверстия сетчатой поверхности должны иметь небольшой размер (во всяком случае, меньше размеров зерна). В этом случае не исключена возможность их забивания легкими примесями очесанного вороха. Вследствие отсутствия выхода для воздушного потока, давление внутри корпуса адаптера возрастает, уменьшая разрежение на входе в устройство и увеличивая потери зерна в зоне очеса. В результате этого возникает необходимость в частой остановке и очистке отверстий сетчатой поверхности адаптера. Это существенно увеличивает затраты времени на технологическое обслуживание устройства, что влечет за собой снижение производительности процесса уборки урожая в целом. Кроме того, в молотильное устройство поступает излишнее количество легких примесей (все, что имеет размер больше ширины отверстий сетчатой поверхности), что перегружает систему очистки и уменьшает пропускную способность комбайна.

Альтернативным вариантом удаления легких примесей из очесанного зернового вороха, может служить пневмосепарирующий канал (рис. 1.15), в основу работы которого положены законы аэродинамики [209]. Воздушный поток, создаваемый очесывающим барабаном, захватывает легкие примеси и перемещает их в сторону пневмосепарирующего канала. В результате того,

что вес легких примесей гораздо меньше силы действия воздушного потока, то они выносятся наружу из адаптера. Тяжелые компоненты (такие как свободное зерно, колоски и солома) под действием силы тяжести, преодолевая сопротивление направленного вверх воздушного потока, опускаются вниз в приемную камеру и далее выводятся шнеком в наклонный транспортер. Изменяя положение заслонки, можно установить необходимую скорость движения воздушного потока в пневмосепарирующем канале, а, следовательно, достичь минимальных потерь урожая. Благодаря отсутствию в адаптере различного рода сепарирующих решеток, исключается возможность их забивания легкими компонентами.

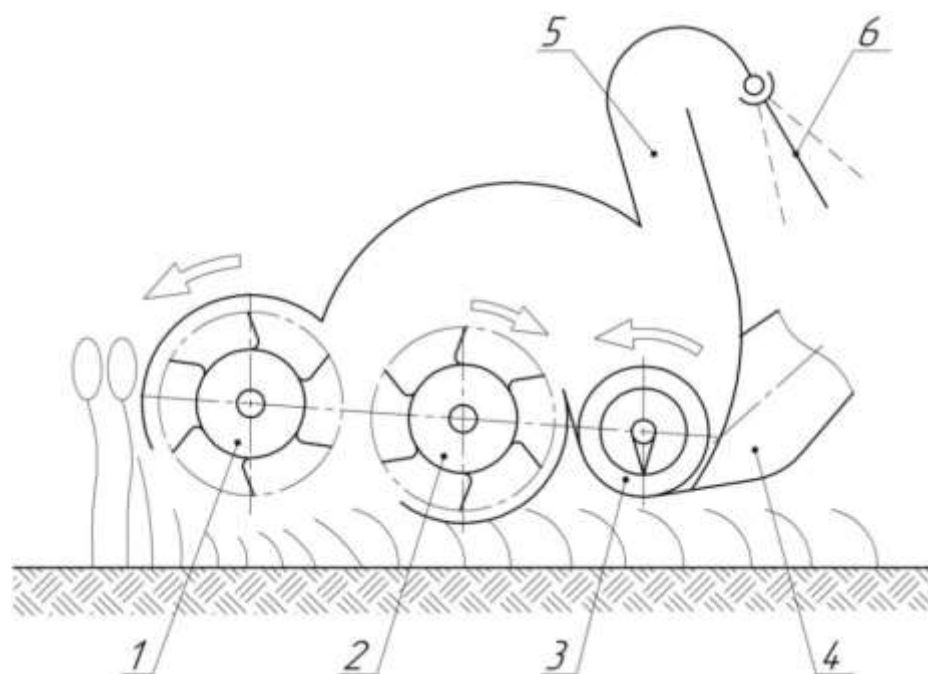


Рисунок 1.15 – Очесывающее устройство (Патент РФ № 2479979): 1 – подающий барабан; 2 – очесывающий барабан; 3 – шнек; 4 – плавающий транспортер; 5 – пневмосепарирующий канал; 6 – заслонка

Одним из недостатков данной группы изобретений является чрезмерная сложность и громоздкость конструкции очесывающего устройства.

После сепарации из очесанного вороха легких примесей, на второй стадии следует выделить все свободное зерно до его поступления в молотильную камеру. Для этого разработаны три варианта устройств, обеспечи-



вающих его предварительную сепарацию. В первом случае для этого может быть использован корпус очесывающего адаптера, внутрь которого устанавливают дополнительное оборудование [3] (рис. 1.16).

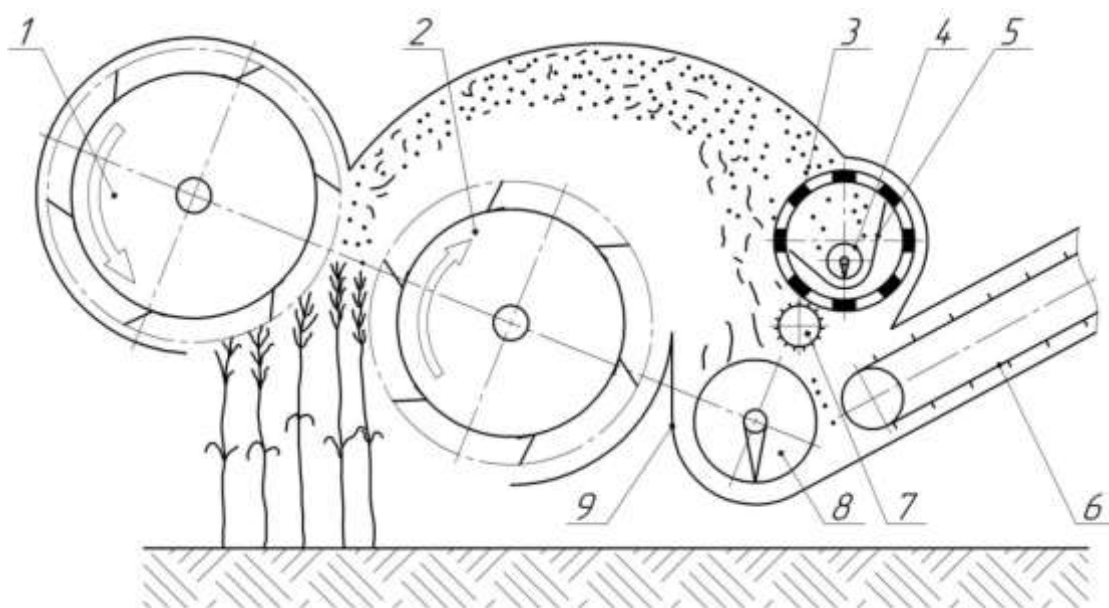


Рисунок 1.16 – Устройство для обмолота растений на корню (SU авторское свидетельство № 1715232): 1 – подающий барабан; 2 – очесывающий барабан; 3 – цилиндрический решетчатый барабан; 4 – зерновой шнек; 5 – сборник проходовой фракции; 6 – наклонная камера; 7 – чистик; 8 – шнек; 9 – сборник

Свободное зерно, просеиваясь через решетчатую поверхность цилиндрического барабана, попадает в сборник проходовой фракции, откуда зерновым шнеком подается в отдельный бункер. Соломистые частицы и необмолоченные колоски, осевшие на решетчатой поверхности барабана при его вращении направляются в приемную камеру, а затем шнеком адаптера подаются в наклонную камеру и далее на обмолот в молотильное устройство комбайна. Соломистые частицы, застрявшие в отверстиях решетчатой поверхности цилиндрического барабана, снимаются вращающимся чистиком. Однако, в результате того, что дополнительный сепарирующий рабочий орган смонтирован непосредственно в корпусе адаптера, то вес его конструкции становится чрезмерным, как с точки зрения опасного уменьшения давле-

ния на управляемые (задние) колеса, так и с точки зрения прочности остова молотилки. Кроме того, не исключена вероятность забивания отверстий дополнительного рабочего органа, что делает его работу неэффективной.

В качестве второго варианта имели место попытки использовать для сепарации свободного зерна наклонную камеру, снабженную перфорированным решетчатым днищем. Предметом изобретения здесь, как правило, является механизм транспортировки свободного зерна и подачи его на очистку, минуя молотильную камеру.

В общем виде, технологический процесс предварительной сепарации свободного зерна в наклонной камере, представлен на рисунке 1.17 [4].

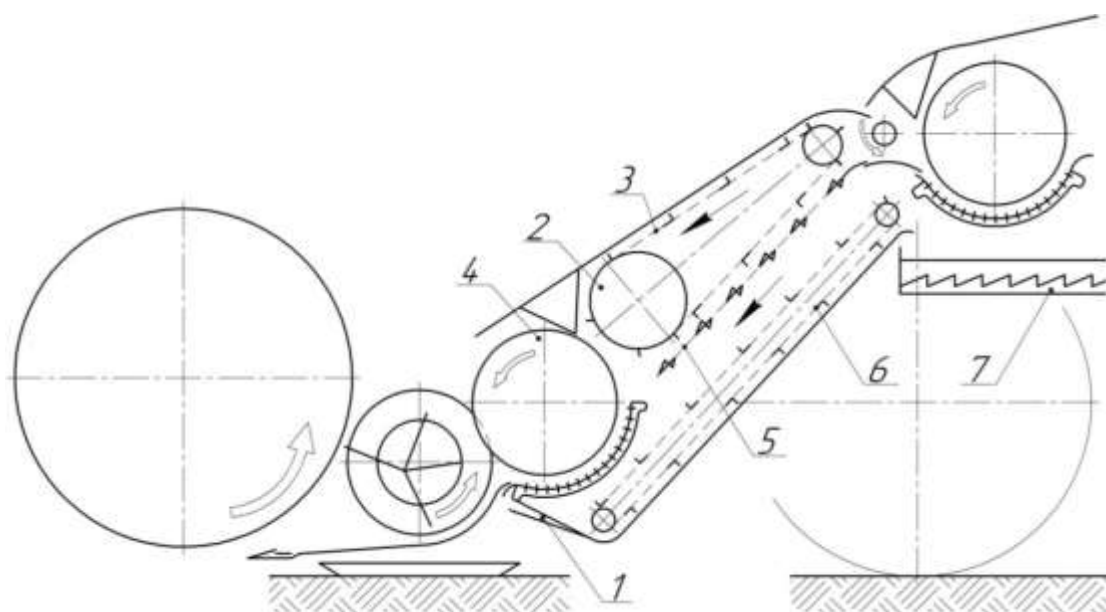


Рисунок 1.17 – Зерноуборочный комбайн (SU авторское свидетельство № 232642): 1 – наклонная камера; 2 – подающий транспортер; 3 – плавающий транспортер; 4 – молотильный барабан; 5 – днище подающего транспортера; 6 – транспортер для отвода свободного зерна; 7 – транспортная доска

Оригинальность конструкции наклонной камеры зерноуборочного комбайна заключается в том, что она снабжена молотильным устройством, смонтированным перед плавающим транспортером. При поступлении хлебной массы к молотильному устройству, размещенному в наклонной камере, происходит ее частичный обмолот. Свободное зерно и мелкие примеси про-

сеиваются через деку молотильного устройства и решетчатое днище на транспортер, который переносит полученный ворох на очистку зерноуборочного комбайна. Недомолоченная хлебная масса от первого барабана перемещается по решетчатому днищу плавающим транспортером ко второму (основному) молотильному барабану для окончательного обмолота зерна.

Следующая конструкция наклонной камеры (рис. 1.18) аналогична предыдущему варианту исполнения.

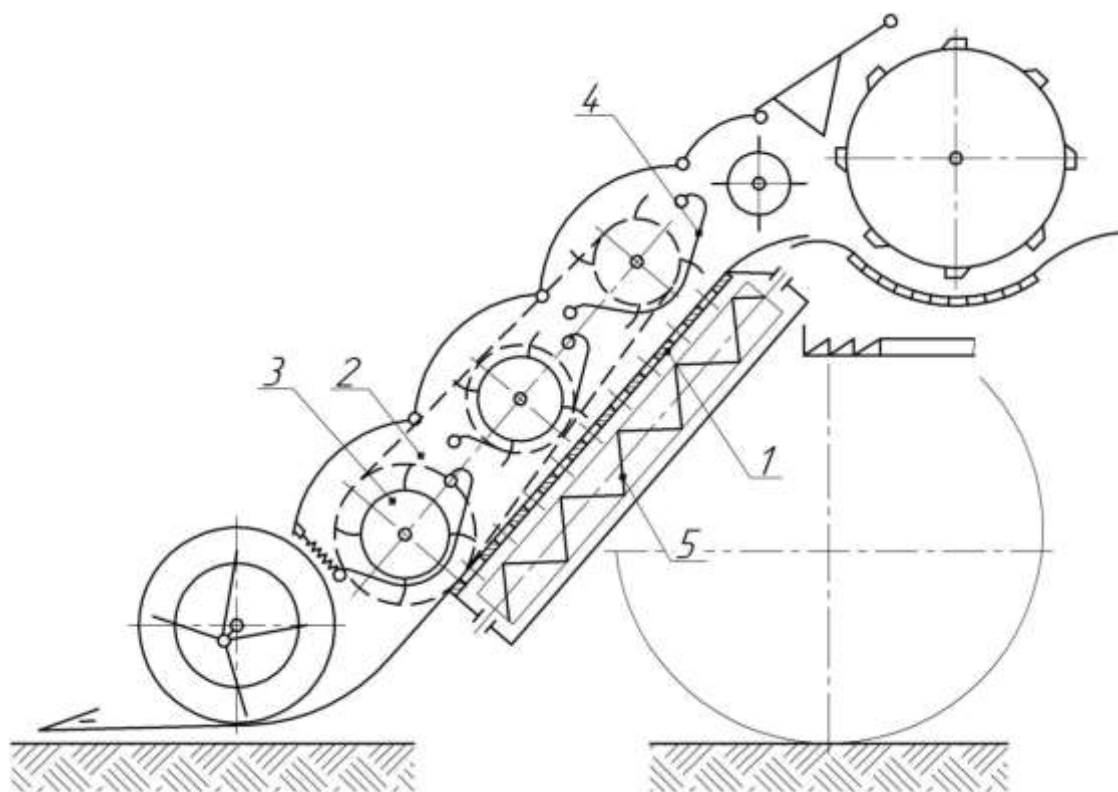


Рисунок 1.18 – Наклонная камера зерноуборочного комбайна (SU авторское свидетельство № 235451): 1 – решетчатое днище наклонной камеры; 2 – наклонная камера; 3 – пальчатый бите; 4 – решетка с отверстиями; 5 – ряд параллельных шнеков

Поставленная цель в ней достигается тем, что плавающий транспортер выполнен в виде ряда пальчатых битеров, воздействующих на слой перемещаемой массы [5]. При поступлении хлебной массы в наклонную камеру, пальцы битеров захватывают ее и перемещают в сторону молотильного устройства. В результате того, что частота вращения битеров увеличивается

от первого к последнему, то ударное воздействие пальцев приводит к выделению зерна плотно сидящего в колосе. Выделившееся из хлебной массы зерно просеивается через решетчатое днище к шнекам, которые подают его на транспортную доску. Оставшаяся колосовая часть урожая посредством пальчатого битера наклонной камеры направляется в молотильную камеру для дальнейшего обмолота.

С целью интенсификации процесса сепарации и возможности сбора свободного зерна без разделения его на фракции, днище наклонной камеры может быть выполнено жалюзийным и снабжено встряхивающим механизмом (рис. 1.19) [6].

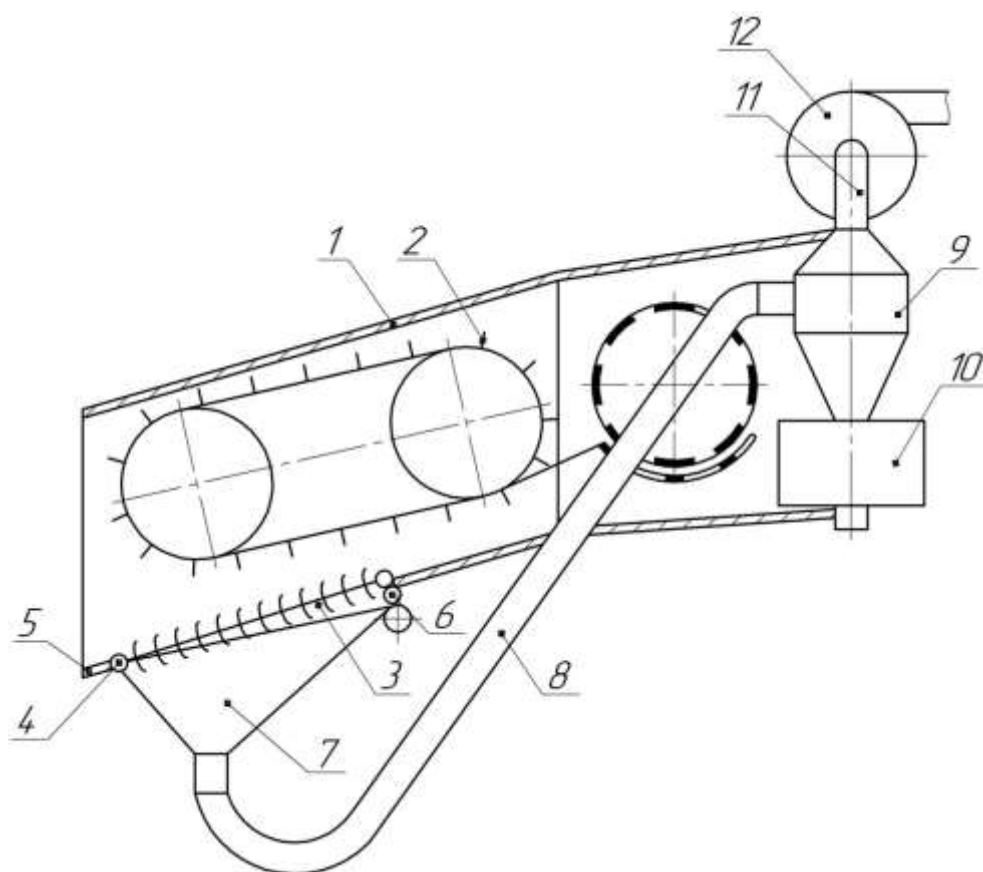


Рисунок 1.19 – Наклонная камера зерноуборочного комбайна (SU авторское свидетельство № 372968): 1 – наклонная камера; 2 – планчатый транспортер; 3 – жалюзийное днище; 4 – шарнир; 5 – сплошное днище наклонной камеры; 6 – встряхивающий механизм; 7 – воронкообразный кожух; 8 – гибкий трубопровод; 9 – циклон; 10 – бункер накопитель; 11 – трубопровод; 12 – вентилятор

Для отвода свободного зерна и половы под днищем наклонной камеры установлен пневмотранспортер. При поступлении хлебной массы на жалюзийное днище наклонной камеры, происходит сепарация свободного зерна с его последующей подачей в воронкообразный кожух. Здесь же улавливаются и те зерна, которые выпадают из растительной массы при дополнительном воздействии на нее встряхивающего механизма. В результате разрежения, создаваемого вентилятором в полости кожуха, зерно по гибкому трубопроводу поступает сначала в циклон, а затем в бункер накопитель. Легкие примеси через трубопровод вентилятором уносятся в атмосферу. Растительная масса, пройдя жалюзийное днище, попадает в молотильный аппарат и окончательно обмолачивается там. Таким образом, часть свободного зерна отбирается до молотильного устройства.

Минимизировать дробление свободного зерна рабочим органами молотилки позволяет наклонная камера, представленная на рисунке 1.20 [7].

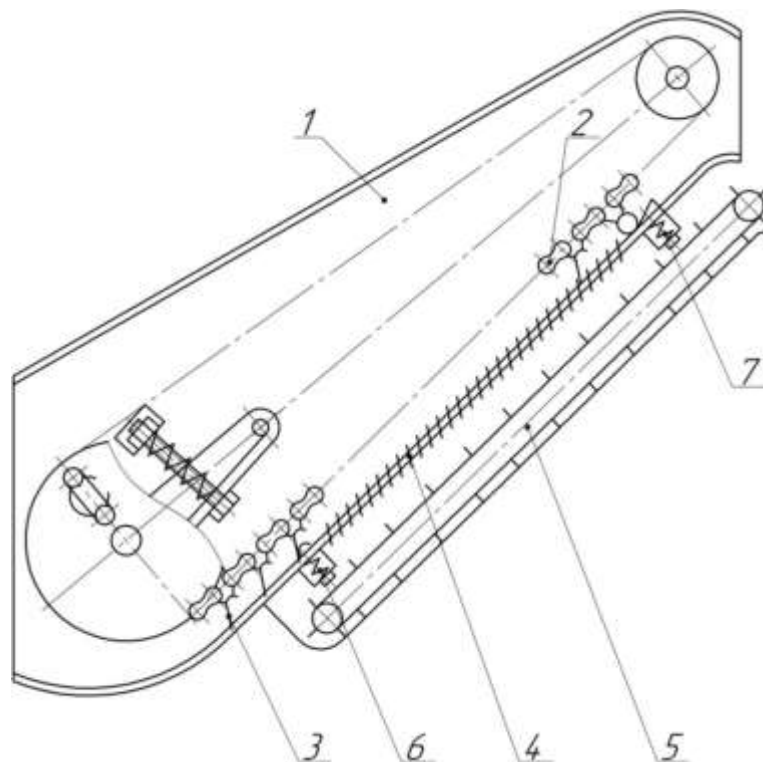


Рисунок 1.20 – Наклонная камера зерноуборочного комбайна (SU авторское свидетельство № 1687078): 1 – корпус; 2 – плавающий транспортер; 3 – скребки; 4 – решетчатое днище; 5 – устройство для отвода свободного зерна; 6, 7 – механизм очистки решетчатого днища

Это достигается тем, что решетчатое днище наклонной камеры подпружинено и снабжено механизмом для его очистки. Слой хлебной массы, поступающей на решетчатое днище, подвергается механическому воздействию колебаний, которое приводит к расслоению слоя массы и улучшенной сепарации свободного зерна из верхних слоев в нижние. Благодаря контакту слоя массы с решетчатым днищем, в результате подпружинивания его в направлении транспортера, зерно легко выделяется из нижних его слоев. Этот процесс активного воздействия механических колебаний решетчатого днища на слой хлебной массы повторяется по всей площади днища. Прошедший сквозь решетчатое днище зерновой ворох подается на очистку, минуя молотильную камеру, а оставшаяся колосовая часть урожая на обмолот.

К недостаткам данной группы технических решений относятся чрезмерная сложность и громоздкость конструкции наклонной камеры.

Третий вариант разработок обеспечивает предварительную сепарацию свободного зерна на криволинейной сепарирующей решетке, смонтированной перед молотилкой (рис. 1.21) [8].

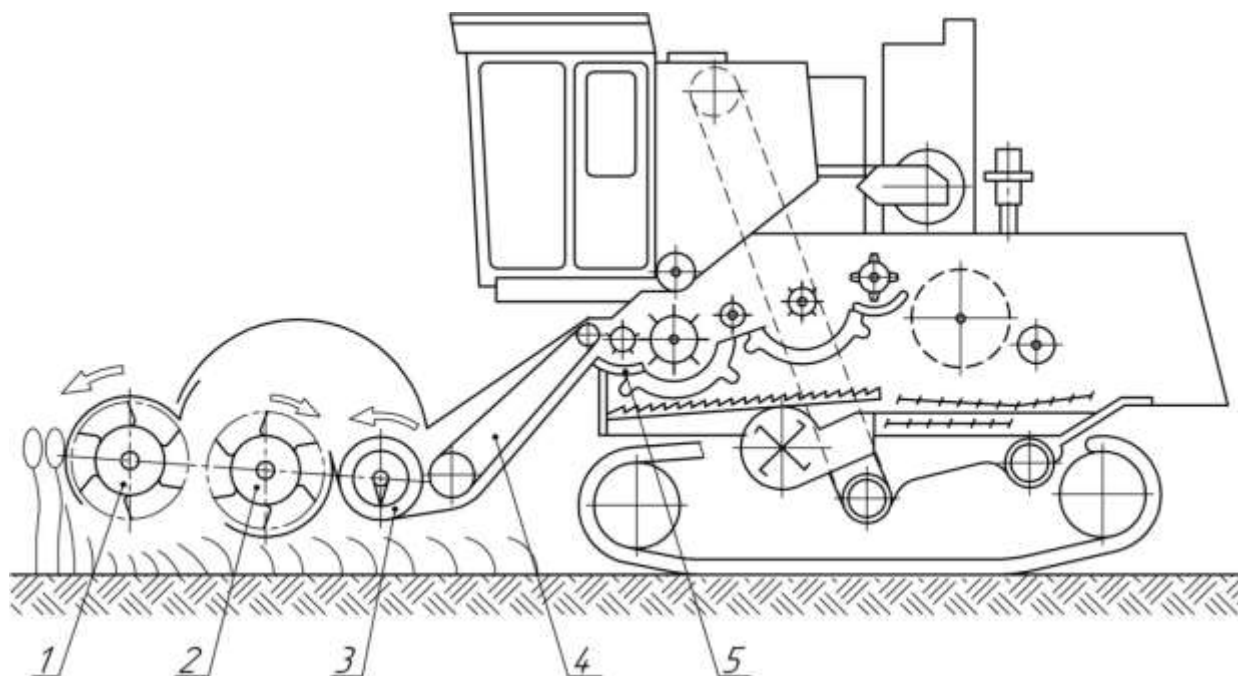


Рисунок 1.21 – Комбайн для уборки зерновых культур на корню (SU авторское свидетельство № 1766310): 1 – подающий барабан; 2 – очесывающий барабан; 3 – шнек; 4 – наклонная камера; 5 – сетчатая решетка

Свободное зерно, пройдя сквозь отверстия сепарирующей решетки, поступает на транспортную доску и далее подается на очистку, минуя молотильную камеру.

Одним из недостатков данного ряда разработок является то, что при работе комбайна не исключена вероятность забивания отверстий сепарирующей решетки приемного битера компонентами очесанного зернового вороха. Это снижает эффективность процесса предварительной сепарации свободного зерна и влечет за собой его поступление в молотильную камеру. В результате этого существенным образом увеличивается дробление свободного зерна рабочими органами молотилки и вынос его значительной части в соломотряс. Все это способствует росту потерь урожая.

Следующая группа технических решений сосредоточена на сепарации свободного зерна непосредственно в молотильной камере зерноуборочного комбайна. Как правило, это достигается двумя способами: либо путем разряжения [9] между поперечными планками подбарабанья на входе в молотильную камеру (рис. 1.22), либо увеличением «живого сечения» [10] между продольными прутками деки на выходе из нее (рис. 1.23).

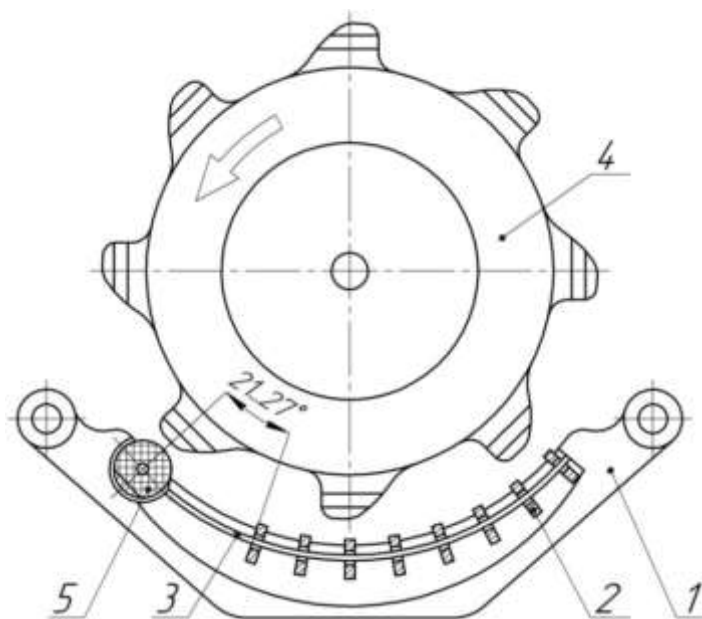


Рисунок 1.22 – Дека молотильного устройства (SU авторское свидетельство № 1124893): 1 – боковина; 2 – поперечная планка; 3 – продольный пруток; 4 – молотильный барабан; 5 – эластичная втулка

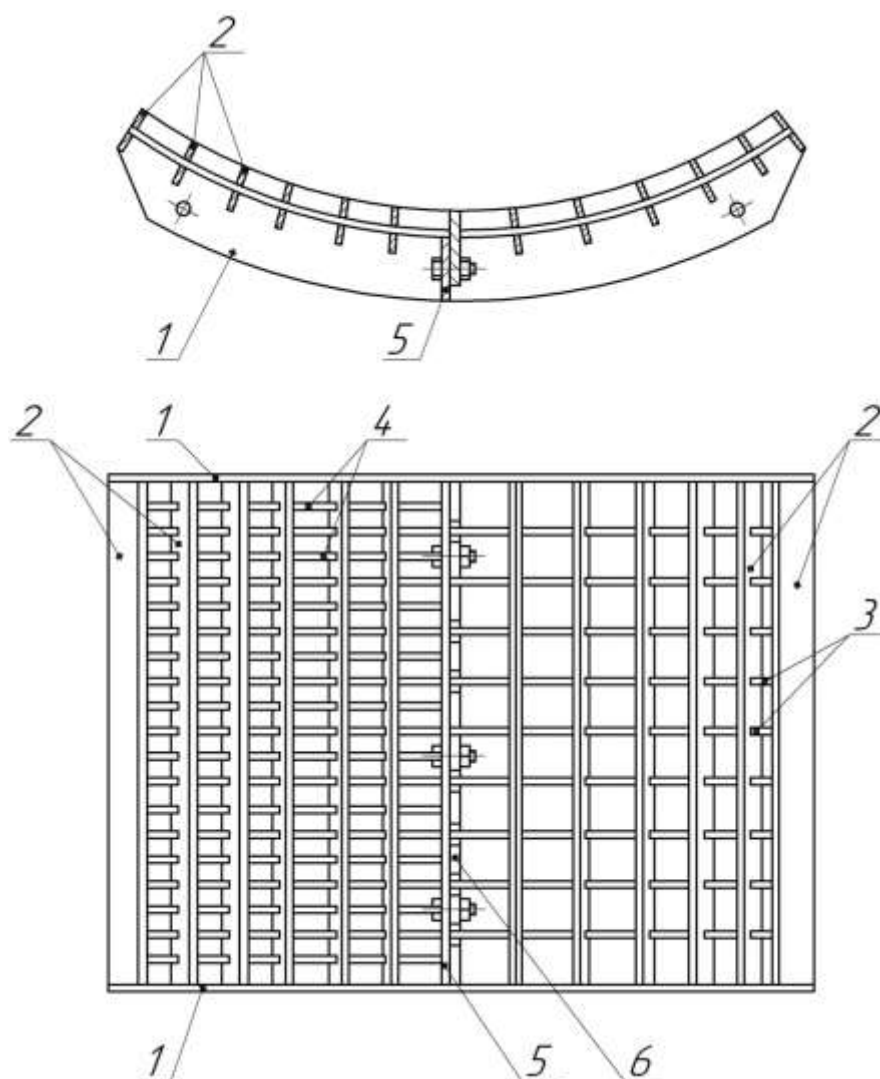


Рисунок 1.23 – Дека молотильного устройства (SU авторское свидетельство № 1015855): 1 – боковина; 2 – поперечные планки; 3 – длинные прутки; 4 – короткие прутки; 5 – гребенка; 6 – гребень

Первый способ направлен на сепарацию свободного зерна в передней половине подбарабанья, а обмолот оставшейся хлебной массы происходит в его задней части. Наличие эластичной втулки обеспечивает смягчение удара бичей по колосу и свободному зерну, что способствует снижению его травмирования. Второй же способ сепарации реализуется при работе молотильного устройства с переувлажненными хлебами, когда происходит забивание передней половины деки вследствие уменьшенного шага между прутками. Задняя половина подбарабанья за счет увеличенного «живого сечения» не забивается, вследствие чего свободное зерно в этой зоне имеет возможность



пройти сквозь его продольные прутки и поступить сначала на транспортную доску, а затем на очистку.

Однако, в результате того, что сепарация свободного зерна происходит непосредственно в молотильной камере зерноуборочного комбайна, то пропускная способность молотильного устройства снижена. Кроме того, не исключена вероятность дробления свободного зерна рабочими органами молотилки.

Снизить дробление свободного зерна призваны молотильные устройства, рабочие органы (бичи) которых выполняются полностью из упругого материала [11] или частично обрезиненными [107] (рис. 1.24). Принцип действия таких молотильных устройств основан на том, что его рабочие органы обмолачивают хлебную массу в более бережном (щадящем) режиме. Однако, в результате того, что хлебная масса, поступающая от адаптера, содержит до 85% свободного зерна, то существенным образом снижается вымолачивающая способность устройства. Кроме того, по-прежнему не исключена возможность дробления свободного зерна рабочими органами молотилки.

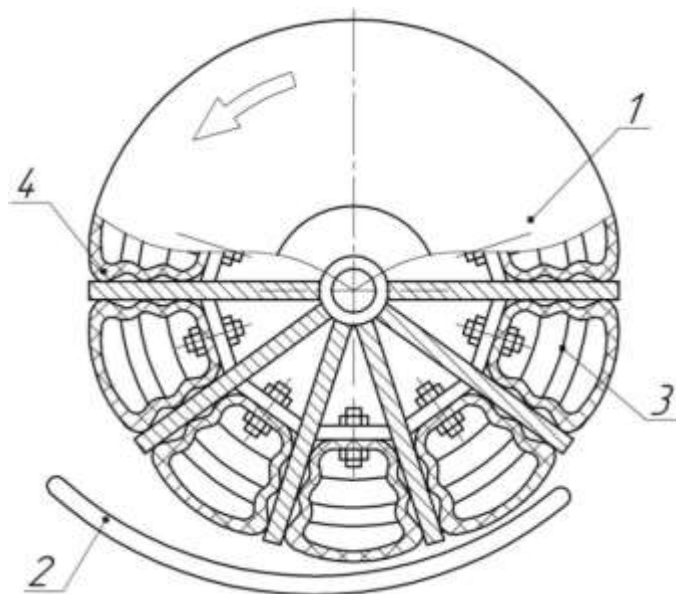


Рисунок 1.24 – Молотильное устройство (SU авторское свидетельство № 1056952): 1 – молотильный барабан; 2 – дека; 3 – гофрированные секционные камеры; 4 – бичи

Третий ряд разработок направлен на предварительный обмолот хлебной массы и подачи выделенного зерна в отдельный бункер. Для этого между жаткой и наклонной камерой размещают вальцовое устройство (рис. 1.25), рабочие органы которого подпружинены и снабжены механизмом регулировки зазора [210]. При уборке зерновых культур стебли растений срезаются и подаются в сторону вальцового устройства. В результате того, что зазор между его рабочими органами невелик, то происходит частичное выделение наиболее спелых зерновок, которые направляются в бункер для сбора нетравмированного зерна.

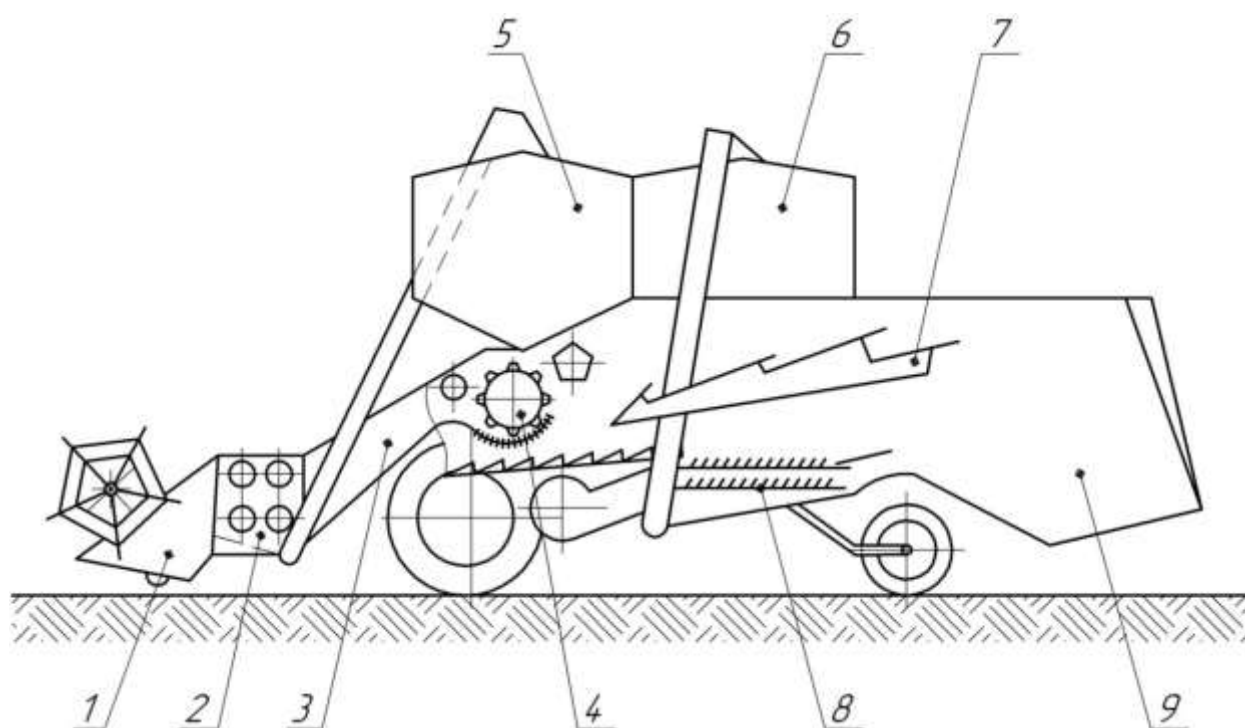


Рисунок 1.25 – Зерноуборочный комбайн (Патент РФ № 2202165): 1 – жатка; 2 – устройство для предварительного обмолота зерна; 3 – наклонная камера; 4 – молотильное устройство; 5 – бункер для сбора нетравмированного зерна; 6 – основной бункер; 7 – соломотряс; 8 – копнитель

Данная группа изобретений обладает рядом недостатков. В частности в связи с тем, что устройство для предварительного обмолота хлебной массы выполнено в виде ряда последовательно расположенных вальцов, имеющих гладкую цилиндрическую поверхность, то эффективно оно может воздей-

ствовать только на плодосодержащие части бобовых культур. Кроме того, размещение устройства для предварительного обмолота зерна между жаткой и наклонной камерой создает избыточный опрокидывающий момент, что может привести к опасному уменьшению давления на управляемые (задние) колеса и существенно ослабить прочность остова молотилки.

Наиболее удачным местом размещения устройства для предварительного обмолота хлебной массы является пространство, расположенное между наклонной камерой и молотильным устройством (рис. 1.26) [211]. Устройство для предварительного обмолота хлебной массы выполнено в виде пары валцов, вращающихся навстречу друг другу. При этом верхний валец смонтирован подвижно и подпружинен, а нижний снабжен желобчатой поверхностью.

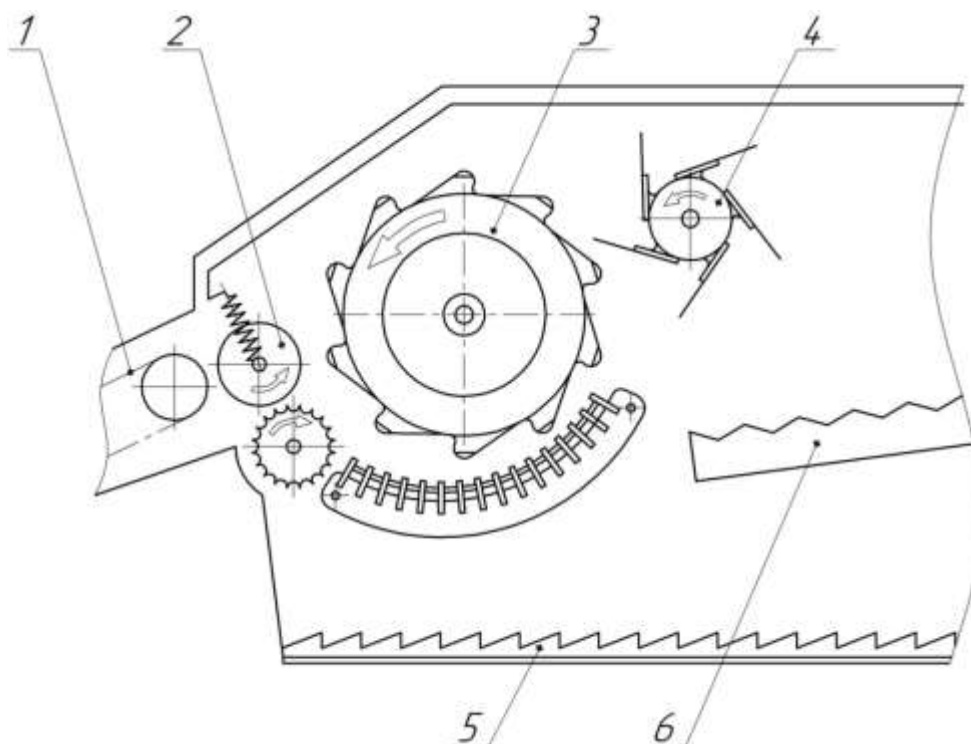


Рисунок 1.26 – Молотильно-сепарирующий аппарат зерноуборочного комбайна (Патент РФ № 2340159): 1 – наклонная камера; 2 – устройство для предварительного обмолота хлебной массы; 3 – молотильное устройство; 4 – отбойный битер; 5 – транспортная доска; 6 – соломотряс

Однако, в связи с тем, что хлебная масса деформируется только на ребрах нижнего вальца (причем она подвергается при этом деформации сжа-

тия), то эффективного разрушения чешуйчатых структур колоса не происходит. То есть, указанное устройство, по сути, выполняет только функцию формирования и перемещения потока растительной массы, тогда как технологическую функцию разрушения чешуйчатой структуры колоса с целью подготовки его к более эффективному взаимодействию с бичами барабана оно выполнить не в состоянии.

## **1.6 КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЧЕСУ РАСТЕНИЙ НА КОРНЮ, ОБМОЛОТУ ХЛЕБНОЙ МАССЫ И СЕПАРАЦИИ СВОБОДНОГО ЗЕРНА**

Изучением вопросов технологии очеса растений на корню занимались многие исследователи как у нас в стране, так и за рубежом. Наиболее значимый вклад в развитие конструкции очесывающих устройств и разработку теории очеса растений на корню внесли: П.А. Шабанов, Л.В. Погорелов, В.И. Кравчук, М.М. Мороз, А.С. Кушнарев, А.Н. Леженкин, Н.И. Кленин, А.И. Бурьянов, Э.В. Жалнин, Н.В. Алдошин, А.К. Скворцов и другие [276, 124, 258, 106, 36, 149, 91, 93-94, 244, 236, 271, 272, 238, 239]. Основным объемом научных исследований профессора П.А. Шабанова посвящен разработке и сопоставлению конструкций одно- и двухбарабанной жатки. Кроме того, им подробно изучен характер взаимодействия гребенок очесывающего устройства с колосом и движения свободной зерновки после ее отделения от его стержня. Оценено влияние кинематических параметров и режимов работы адаптера на качество уборки урожая. Так, согласно результатам лабораторных и экспериментальных исследований установлено, что окружная скорость очесывающих барабанов должна находиться в пределах 10-16 м/с [227]. В результате чего сокращается количество ударов гребенки о свободное зерно, и как следствие этого, снижается его дробление внутри корпуса очесывателя. Однако, несмотря на это, ряд вопросов технологии очеса растений на корню изучен недостаточно. Прежде всего, они касаются дальнейшего обмолота

хлебной массы (практически лишенной соломы), и исключения попадания свободного зерна в молотильную камеру зерноуборочного комбайна.

Несмотря на то, что история молотильного барабана насчитывает свыше 200 лет, его теория и расчет находятся, по существу, еще в зачаточном состоянии. Прежде всего, это объясняется чрезвычайной сложностью технологического процесса, происходящего в молотильном устройстве, а также большими колебаниями в свойствах и состоянии обмолачиваемого материала [227].

Разработкой теории обмолота и совершенствованием молотильных устройств занимались многие ученые. Среди наиболее значимых, следует отметить работы В.П. Горячкина, М.А. Пустыгина, И.Ф. Василенко, Г.Ф. Серого, Э.В. Жалнина, Н.И. Кленина, В.М. Халанского, В.Е. Бердышева, И.В. Горбачева, А.И. Ряднова, Н.В. Алдошина, С.А. Родимцева и других [14-15, 22, 23, 26, 43, 46, 58-60, 67, 85-87, 95, 100, 105, 107, 127-130, 134, 227, 229-234, 242, 243, 273-275, 283, 284]. Анализ указанных работ свидетельствует о том, что при многочисленных испытаниях молотилок и комбайнов основным объектом изучения является барабан, так как именно он определяет наиболее существенные показатели машины – недомолот и дробление зерна. Кроме того, барабан является основным потребителем энергии.

Согласно исследованиям В.П. Горячкина, хлебная масса при поступлении в молотильное устройство, в результате неупругого удара приобретает скорость, равную окружной скорости барабана. Удары сообщаются непрерывно поступающим массам  $\Delta m$ , которые получают скорость  $v$  за время  $\Delta t$  [67]. Таким образом, работа барабана сводится к сумме импульсов, следующим один за другим. Импульс силы равен приращению количества движения

$$P' \cdot \Delta t = \Delta m \cdot v. \quad (1.1)$$

Откуда окружное усилие на зубьях барабана, преодолевающее силу инерции хлебной массы, равно

$$P' = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot v = m' \cdot v, \quad (1.2)$$

где  $m'$  – масса подачи в единицу времени (секундная масса).

Немного позже В.П. Горячкин ввел понятие коэффициента перетирания  $f$ , понимая уже под  $m'$  не фиктивную, а действительную массу подачи в секунду и учитывая сопротивление деки этим коэффициентом. Кроме усилия, идущего на преодоление сил инерции хлебной массы  $P'$ , барабан испытывает усилие вследствие сопротивления деки  $P''$ , которое пропорционально всему окружному усилию барабана  $P$ , с коэффициентом пропорциональности  $f$  (коэффициентом перетирания)

$$P'' = f \cdot P. \quad (1.3)$$

Тогда полное окружное усилие барабана

$$P = P' + P'' = m' \cdot v + f \cdot P. \quad (1.4)$$

При решении уравнения (1.4) относительно  $P$ , получено

$$P = \frac{m' \cdot v}{1 - f}. \quad (1.5)$$

Умножив обе части равенства (1.5) на скорость  $v$ , определена мощность, необходимая для работы барабана

$$75 \cdot N = \frac{m' \cdot v^2}{1 - f}. \quad (1.6)$$

С другой стороны, двигатель мощностью  $N$  при моменте инерции барабана  $J$  даст угловое ускорение разгона согласно уравнению

$$75 \cdot N = J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.7)$$

Приравняв уравнения (1.6) и (1.7), получим уравнение В.П. Горячкина в окончательной форме, характеризующее связь между тремя элементами процесса: двигателем ( $N$ ), барабаном ( $J$ ) и хлебом ( $m'$ )

$$75 \cdot N = J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{m' \cdot v^2}{1 - f}. \quad (1.8)$$

Следует отметить, что данная формула справедлива лишь в том случае, если хлебная масса в результате удара действительно приобретает скорость, равную окружной скорости барабана. Несомненно, что часть стеблей, попадающая непосредственно на зубья барабана, приобретает скорость послед-

них, но основная масса стеблей движется со скоростью, значительно меньшей окружной скорости барабана.

Исследования молотильных устройств проводились по различным областям и направлениям. Так, например, работы доктора технических наук М.А. Пустыгина посвящены выявлению влияния окружной скорости барабана и соотношения зерна к соломе ( $\beta_{зер}$ ) на величину дробления зерновок рабочими органами молотилки [227]. Согласно результатам проведенных научных исследований установлено, что дробление зерна находится в прямой зависимости от окружной скорости барабана. Его оптимальные значения находятся в интервале 0,3-2,2%, что соответствует окружной скорости 26-34 м/с и соотношению зерна к соломе  $\beta_{зер}=0,71$ . Что касается дробления зерна в зависимости от коэффициента  $\beta_{зер}$ , то с его увеличением от 0,42 до 1,5 наблюдается значительный рост дробления зерновок в пределах 2,3-4,8%.

Обзор теоретических исследований сепарации зерна через плоское решето и транспортировку вороха с помощью скребков показал, что этими вопросами занимались С.А. Алферов, В.И. Василенко, В.П. Горячкин, А.А. Долголенко, Ю.И. Ермольев, В.А. Кубышев, И.П. Лапшин, А.И. Любимов, В.И. Оробинский, А.П. Тарасенко и другие [20, 21, 40, 55, 56, 67, 77, 79-83, 107, 119, 120, 123, 138, 140, 145, 146, 187-189, 225, 226, 249, 253-254]. Однако свойства материалов, на которых они проводили свои научные исследования, во многом отличаются от свойств очесанного зернового вороха.

В.П. Горячкин рассматривал перемещение зерен по решету (рис. 1.27) с той целью, чтобы поставить их в наиболее выгодное положение отверстий при прохождении через них [67]. По результатам научных исследований определена длина отверстия, обеспечивающая выделение отдельного зерна сквозь решето

$$l \geq (r + v) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot r}{g}}, \quad (1.9)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$v$  – скорость движения зерна, м/с;

$r$  – радиус зерна, м.

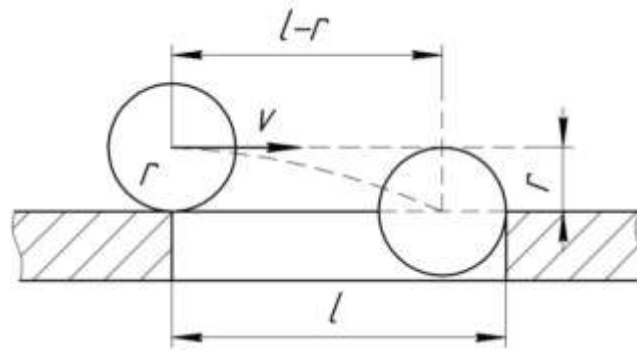


Рисунок 1.27 – Расчетная схема прохождения зерна сквозь отверстие

Н.П. Шабанов [279] в кандидатской диссертации рассматривал просеивание свободного зерна в наклонной камере зерноуборочного комбайна, имеющей прутково-планчатое днище (рис. 1.28).

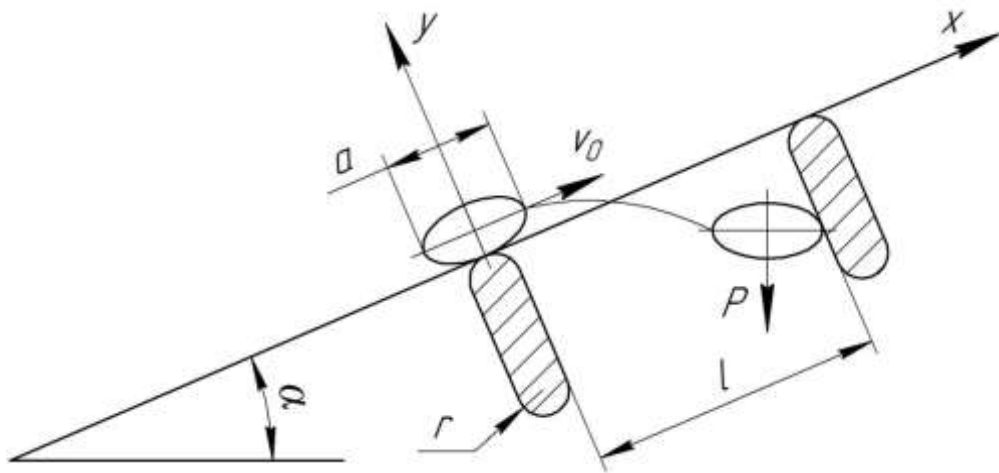


Рисунок 1.28 – Расчетная схема движения отдельного зерна по наклонной сепарирующей поверхности

При рассмотрении движения свободного зерна по наклонной сепарирующей поверхности определено расстояние между поперечными планками днища наклонной камеры

$$l = \frac{a}{2} \cdot (1 - \operatorname{tg} \alpha) - r + v_0 \cdot \sqrt{\frac{a}{g \cdot \cos \alpha}}, \quad (1.10)$$

где  $a$  – максимальная длина зерна, м;

$l$  – расстояние между поперечными планками, м;



$r$  – радиус закругления планки,  $m$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;

$v_0$  – скорость движения зерна,  $m/c$ .

В результате реализации такого технического решения на опытном образце зерноуборочного комбайна Н.П. Шабанову удалось исключить повторное воздействие рабочих органов молотильного устройства на свободное зерно и направить его на очистку, минуя молотильную камеру. Оптимальными параметрами устройства, обеспечивающие максимальную сепарацию свободного зерна (до 85%) из очесанного зернового вороха, являются: расстояние между планками решета 36 мм и между прутками – 32 мм.

Между тем, несмотря на ряд положительных моментов, автором отмечено, что при таких параметрах отверстий сепарирующей решетки сквозь нее беспрепятственно проходит как свободное зерно, так оставшаяся колосовая часть урожая. Это существенным образом увеличивает нагрузку на домолачивающее устройство, лимитируя его пропускную способность, в то время как молотилка наоборот остается недогруженной и фактически работает «в холостую». Таким образом, проблема повышения эффективности работы сепарирующего устройства в наклонной камере зерноуборочного комбайна остается не до конца решенной.

## 1.7 ФОРМИРОВАНИЕ НАУЧНОЙ ГИПОТЕЗЫ

В условиях господства на рынке сельскохозяйственных машин транснациональных финансово-промышленных групп конкурентные позиции отечественных производителей за последнее десятилетие заметно ухудшились. Впервые в истории отечественного комбайностроения в 2013 году на долю машин ОАО «Ростсельмаш» приходилось менее половины отечественного рынка. Что касается Красноярского комбайнового завода, то (вместе с его новым Владимирским филиалом) он удерживает всего чуть более 3% рынка. При этом на вторую позицию вышло ЗАО СП «Брянксельмаш» (27,28%

рынка), осуществляющее сборку комбайнов «Десна-Полесье» в кооперации с белорусской фирмой «Гомсельмаш» [170].

Во-первых, заметное снижение объема продаж обусловлено тем, что существенно ухудшилось финансовое положение сельхозтоваропроизводителей [218], что резко сузило рынок сбыта. Во-вторых, встраивание российского машиностроения в технологическую структуру зарубежных фирм приводит к тому, что почти половина стоимости зерноуборочного комбайна приходится на покупные изделия. Так, завод «Ростсельмаш» только импортирует более 15% комплектующих [161, 179, 182]. Девальвация национальной валюты делает такое разделение труда экономически не целесообразным, поскольку рост цен на импортные комплектующие значительно опережает уровень инфляции.

В условиях кризиса сбыта отечественные машиностроители привычно ориентируются на финансовую поддержку со стороны правительства, не в полной мере используя возможности конструктивного совершенствования техники. Это относится и к зерноуборочным комбайнам, потенциал совершенствования конструкций которых далеко не исчерпан.

Непременным условием успеха в усиливающейся конкурентной борьбе становится ориентация на инновации, опирающиеся на нереализованные пока оптимальные алгоритмы воздействия на убираемую культуру и ее отдельные элементы. В этом отношении разработка ОАО «Ростсельмаш» роторного комбайна «RSM-181 Торум» не может быть отнесена к категории инновационного прорыва. Аналогичные роторные комбайны производят зарубежные конкуренты, а отсутствие у их машин вращающейся деки не сказывается отрицательно на потребительских свойствах продукции [172].

В связи с этим, целесообразно углубить изучение физико-механических свойств объекта воздействия и сформулировать более целесообразный алгоритм взаимодействия с ним рабочих органов комбайна. Объектом воздействия будем считать колосовые зерновые культуры, которые составляют более 80% объема убираемых зерноуборочным комбайном площадей.

Целесообразно выделить три базовых физико-механических свойства колосовых зерновых культур, перспективные для использования их в качестве отправных точек для совершенствования алгоритма воздействия рабочих органов на убираемые растения. Во-первых, следует учитывать соотношение зерна и соломы, в поступающем в молотилку ворохе (рис. 1.29). Уменьшить негативное влияние излишней соломистости на энергоемкость процесса обмолота позволяет переход на очесывание растений на корню [92]. При таком способе уборки уменьшается поступление технологической массы в комбайн в 1,5-2 раза, что приводит к экономии до 70% энергии, которую комбайн, как правило, расходует на деформацию соломы в молотилке.

Вторым важным обстоятельством является то, что усилие отрыва зерна от стержня колоса при воздействии на него в поперечном направлении существенно меньше, чем при воздействии вдоль зерновки. Реализовать в максимальной степени имеющееся различие позволяет колебательное воздействие на колос в перпендикулярном направлении [162, 164].

Третье свойство заключается в том, что у большинства колосовых зерновых культур чешуи, охватывающие каждую зерновку, дополнительно укрепляют ее положение и препятствуют эффективной реализации ударного воздействия на нее в процессе обмолота бичей молотильного барабана, демпфируя ударный импульс. Следовательно, вне зависимости от способа отделения плодосодержащей части растения от земли (срезание традиционной жаткой или очес на корню), целесообразно предварительно разрушить или хотя бы ослабить чешуйчатое окружение каждой зерновки. Уменьшить упрочняющее положение зерновки позволяет поперечная деформация колоса.

По мере реализации указанных алгоритмов первого порядка (рис. 1.29) актуальной задачей становится максимальная адаптация последующих фаз технологического процесса к физико-механическим свойствам полученного вороха. Так, в случае очеса растений на корню при осуществлении последующих фаз технологического процесса уборки в качестве проблемы начинает доминировать чрезмерное содержание в ворохе мелких легких примесей и

наличие свободных колосьев разной длины, содержащих различное количество оставшихся в них зерен [165].

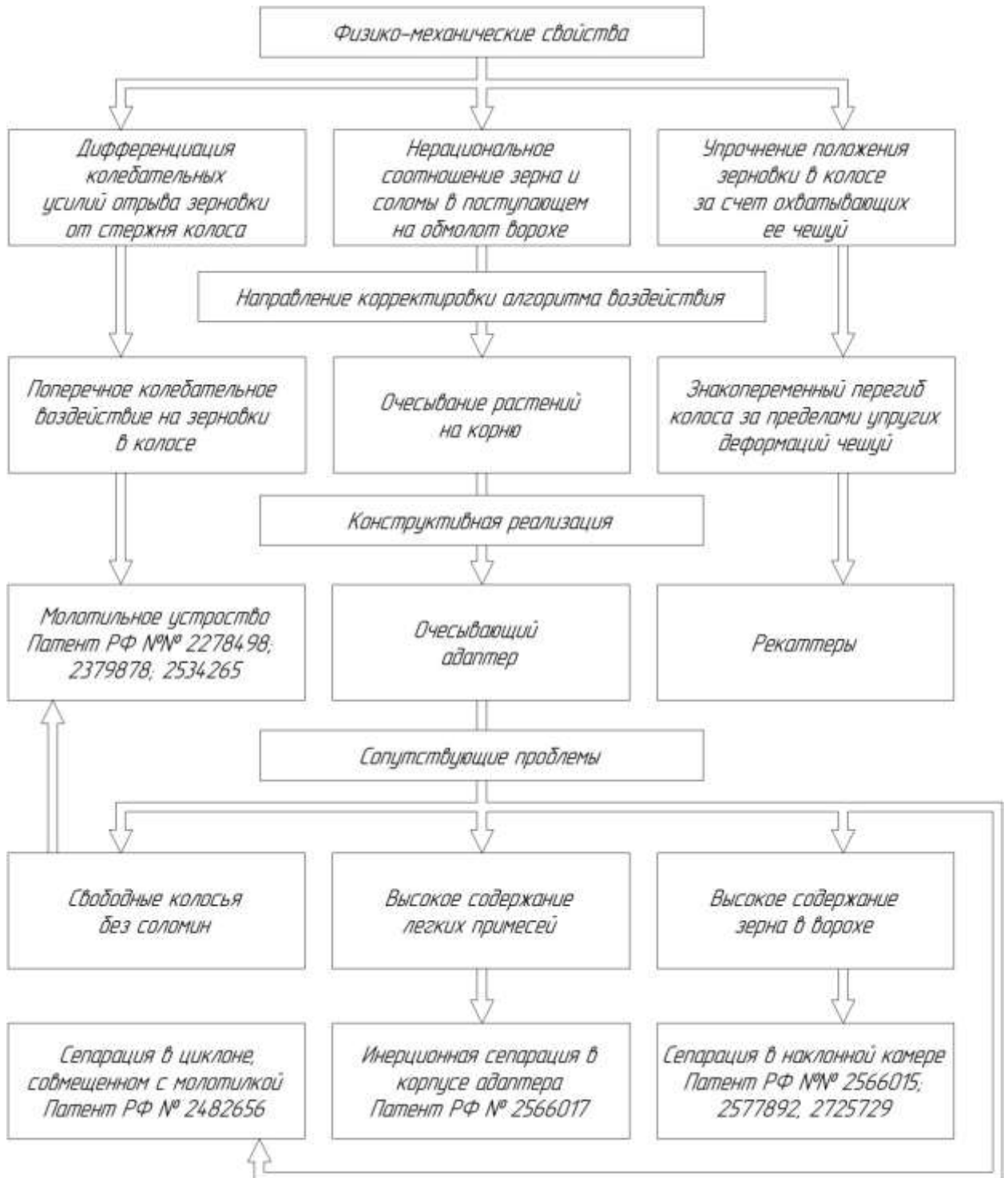


Рисунок 1.29 – Стратегия совершенствования зерноуборочного комбайна

При этом в связи с практически полным отсутствием соломы, резко уменьшается эффективность работы молотильного барабана, недогруженным

оказывается соломотряс, а очистка, наоборот, оказывается перегруженной. Кроме того, велик риск дробления свободного зерна, поступающего в молотильную камеру без технологической цели. Следовательно, целесообразно было бы осуществить предварительную сепарацию очесанного вороха до его поступления в молотильное устройство.

Что касается наличия в ворохе недомолоченных колосьев, практически лишенных соломины, то подход к выбору способа дальнейшего технологического воздействия на них должен быть аналогичен подходу к выбору типа автономного домолачивающего устройства.

Наиболее сложной задачей являлся синтез молотильного устройства, способного эффективно реализовать поперечное колебательное воздействие на колос. Конструктивное решение было найдено, и устройство успешно было испытано [164]. Поперечное воздействие на колос возникает в результате его взаимодействия с коническими поверхностями неподвижной деки и совершающей угловые колебания вокруг вертикальной оси подвижной перфорированной деки молотильного устройства. Обмолачиваемые колосья под действием силы тяжести и колебаний перемещаются в молотильном зазоре вниз, а выделенные зерна просыпаются сквозь отверстия внутри деки и вместе с мелкими примесями поступают на очистку.

Для подтверждения исходной гипотезы исследования были проведены лабораторные измерения удельной работы, необходимой для выделения из колоса одной зерновки. В результате было достоверно установлено, что использование поперечного колебательного нагружения связей зерновки со стержнем колоса обеспечивает по сравнению с традиционным барабаном бильного типа снижение энергоемкости обмолота в 3 раза [166]. Кроме того, были экспериментально установлены оптимальные параметры рифов, выполненных на рабочих поверхностях дек молотильного аппарата [168].

Переход от лабораторного образца, успешно осуществляющего перспективный алгоритм воздействия на колос, к конструированию комбайна сопряжен с рядом трудно разрешимых проблем. Во-первых, при измерениях

не учитывались дополнительные затраты энергии на деформацию соломы, что должно уменьшить положительный эффект, зафиксированный в лабораторном опыте. Во-вторых, требуется радикальная перекомпоновка комбайна, на что пока не готовы согласиться производители зерноуборочной техники. Успешные лабораторные опыты не являются также убедительным мотивом для поддержки проекта инвесторами. В связи с этим план исследований был скорректирован в пользу интенсификации работы с очесанным зерновым ворохом, в котором присутствует минимум соломы, вследствие чего молотилка колебательного воздействия на колос могла бы максимально реализовать свой потенциал. Более того, оправданным является ожидание возникновения синергетического эффекта от одновременного внедрения в конструкцию комбайна двух указанных технических решений.

На протяжении многих десятилетий конструктивные параметры рабочих органов зерноуборочного комбайна и режимы их работы оптимизировались на работу с соломистой массой. Естественно, что ворох, поступающий от очесывающего адаптера, предъявляет к конструкции комбайна и режиму его работы специфические требования. Опыт практической эксплуатации уборочной техники свидетельствует о том, что даже изменение ориентации колосьев в результате подачи обмолачиваемой массы «комлем вперед» резко изменяет характер взаимодействия с ней молотильного аппарата. Еще более существенных изменений параметров процесса требует обработка практически бесстебельного вороха, содержащего большую долю свободного зерна.

Двухлетние испытания очесывающих адаптеров различной конструкции позволили сформировать принципиальные подходы к выбору направления адаптации зерноуборочного комбайна к наиболее эффективной работе с очесанным зерновым ворохом. Основные усилия должны быть сосредоточены на решении трех технологических проблем:

- исключение поступления большей части свободного зерна в молотильный аппарат;

- исключение поступления значительной части мелких легких примесей в очистку комбайна;
- гашение (или технологическое использование) избыточного воздушного потока, создаваемого очесывающим барабаном.

Возможны два варианта использования энергии генерируемого очесывающим барабаном воздушного потока. Во-первых, он может быть использован для пневмотранспортирования и предварительного разделения вороха на фракции в циклоне. Причем циклон удачно компоуется с молотильным устройством колебательного воздействия на колос, на которое должна поступать только тяжелая фракция (недомолоченные колосья, отдельные соломины и свободное зерно) [165]. Дальнейшая сепарация тяжелой фракции вороха на верхней (перфорированной) поверхности подвижной части молотильного устройства должна исключить попадание свободного зерна в молотильный зазор между ней и неподвижной декой.

Следует отметить, что этот вариант решения проблемы также требует радикальной перекомпоновки комбайна, что в сложившихся условиях предполагает расход значительных средств и времени на реализацию. В связи с этим был рассмотрен вариант использования воздушного потока для отделения легких примесей непосредственно в корпусе очесывающего адаптера. С этой целью синтезирована конструкция пластинчатого сепаратора инерционного типа, способного вывести за пределы корпуса вместе с воздушным потоком значительную часть легких примесей, превышающих по размерам свободное зерно [199]. В испытанном ранее прототипе (конструкция завода ПАО «Пензмаш») избыточный воздух выбрасывался из корпуса адаптера через сетчатое окно, в связи с чем, удалялись только примеси, не превышающие по размерам свободное зерно. Более крупные компоненты беспрепятственно поступали в систему очистки, в связи с чем они становились главным препятствием увеличения производительности комбайна, существенно уменьшая положительный эффект от очеса растений на корню.

Таким образом, конструкция пластинчатого инерционного сепаратора решает две проблемы: рационально (в технологических целях) используется избыточный воздушный поток и освобождается от перегрузки система очистки комбайна.

Выделение из вороха свободного зерна до его поступления в молотилку возможно на основе высокой степени дифференциации зерновок и недомоленного колоса. То есть в качестве рабочего органа может быть использована решетчатая или перфорированная поверхность. Если на первом этапе модернизации зерноуборочного комбайна ориентироваться на его минимальную перекомпоновку, то в качестве второй ступени предварительной сепарации вороха целесообразно использовать перфорированное днище наклонной камеры (рис. 1.29) [171, 198, 199].

## **ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ**

1. Поскольку порядка 50% от всей посевной площади в России занимают колосовые зерновые культуры, то более полная адаптация конструкции уборочной техники к их физико-механическим свойствам является актуальной научной и практической задачей.

2. С точки зрения энергоемкости и экологичности процесса очеса растений на корню является одним из наиболее перспективных способов уборки зерновых культур для значительной части зерносеющих регионов России.

3. Хлебная масса, полученная в результате очеса растений на корню, может содержать до 85% свободного зерна, поступление которого в молотильную камеру зерноуборочного комбайна не целесообразно, поскольку это способствует его чрезмерному дроблению рабочими органами молотилки и повышению энергоемкости процесса обмолота.

4. Минимизировать поступление в молотильную камеру свободного зерна, содержащегося в очесанном ворохе, можно как посредством его сепарации в наклонной камере, так и путем выделения на специальном сепари-



рующем устройстве, размещенном непосредственно перед барабаном зерноуборочного комбайна.

5. Большая часть поступающих в молотилку колосьев, оборванных в результате очеса, практически лишена соломин, что нарушает традиционный технологический процесс обмолота и делает актуальным изыскание альтернативных способов воздействия на практически дезинтегрированную хлебную массу.

6. Теоретические и конструктивные аспекты повышения качества уборки урожая методом очеса растений на корню и снижения энергоемкости данной операции до конца не решены, что предопределяет наличие существенных резервов и перспективных направлений совершенствования уборочной техники.

7. Наиболее перспективными направлениями модернизации технологического процесса зерноуборочного комбайна являются уменьшение энергозатрат и минимизация дробления свободного зерна, полученного при очесе растений на корню, путем удаления его из очесанного вороха до поступления последнего в молотильное устройство, а также реализация молотильным устройством поперечного колебательного характера нагружения связей зерна с колосом.

## 1.8 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

**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 необходимо было решить 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.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕПАРАЦИИ СВОБОДНОГО ЗЕРНА ИЗ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА

### 2.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СЕПАРАЦИИ СВОБОДНОГО ЗЕРНА В НАКЛОННОЙ КАМЕРЕ

Известно что, очесанный зерновой ворох содержится до 85% свободного зерна [91, 124, 278]. Как отмечалось выше, не целесообразно направлять ворох такого состава в молотилку без его предварительной сепарации. Предложенный выше радикальный способ решения проблемы за счет полной переконфигурации комбайна и использования воздушного потока для транспортировки и разделения смеси пока реализовать не удалось, ввиду финансовых затруднений. Поэтому были разработаны промежуточные варианты технических решений, не связанные с радикальной переконфигурацией комбайна и чрезмерными финансовыми затратами.

Сами по себе аналогичные технические решения (прототипы) были известны еще в 1960-х годах. В них днище наклонной камеры предполагалось выполнить решетчатым и снабдить его устройством для отвода свободного зерна [4, 5, 7]. При этом оценка работоспособности, предлагаемой, по сути, умозрительной идеи, проведена не была. Дело в том, что в предлагаемых прототипах форма и размеры отверстий не оговаривались, что свидетельствует, скорее всего, об отсутствии у данных авторов изобретения теоретических и экспериментальных исследований.

Очевидно, что размеры отверстий решетчатого днища должны обеспечивать прохождение сквозь них зерен, в каком бы положении они не находились. А это означает, что и длина и ширина отверстий решетчатого днища должны быть не менее длины зерна. При этом отверстия должны иметь продолговатую форму по отношению к направлению движения вороха. Иначе, за счет инерции своего движения зерна, попадая на отверстия, могут их перескочить. Между тем, отверстия решетчатого днища не должны быть излишне

большими из-за возможности прохождения сквозь них колосовой части урожая. Кроме того, это может снизить прочность решетчатого днища наклонной камеры комбайна.

При проведении теоретических исследований сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха в наклонной камере зерноуборочного комбайна введем ряд **допущений и ограничений**:

1. Зерно имеет форму эллипсоида вращения с размерами  $l_{зер}$  и  $b_{зер}$ ;
2. Перемещаемый объем очесанного зернового вороха представляет собой однородную несжимаемую массу с поперечным (по отношению к скребку) сечением, содержащим прямоугольный треугольник, одним из катетов которого является высота указанного скребка;
3. Элементарный объем очесанного зернового вороха скользит вдоль плоскости раздела, представляющей собой прямую, сориентированную под углом внутреннего трения к горизонту;
4. Поперечное сечение зерна моделируем в виде двух тел: круглого и обрезанного цилиндров. Первая модель поперечного сечения характерна для зерен овса и ячменя, а вторая модель – для зерен пшеницы, ржи и тритикале [71, 101, 147, 220, 221];
5. Угол внутреннего трения очесанного зернового вороха к горизонту в покое равен  $\alpha=40^\circ$ , а в движении –  $\alpha_1=35^\circ$ .

К основным параметрам наклонной камеры зерноуборочного комбайна относятся:

1. Скорость плавающего транспортера  $v_{тр}=3$  м/с [102, 112, 283];
2. Угол наклона днища наклонной камеры к горизонту равен  $\alpha_{нак}=45^\circ$  [282, 283];
3. Длина днища наклонной камеры комбайна равна 1,3 м [112];
4. Высота скребка плавающего транспортера  $h_{скр}=0,030$  м [112].

В связи с этим, нами была сформулирована теоретическая модель процесса прохождения зерна сквозь отверстие. Она рассматривала два варианта поведения зерна на наклонной решетчатой поверхности. В первом варианте

процесса прохождения зерна 1 сквозь сепарирующее отверстие 2 было предложено рассматривать как свободное падение тела, брошенного под углом  $\alpha_{\text{нак}}$  к горизонту (рис. 2.1).

Для этого в исходном положении поместим зерно 1 над передней кромкой отверстия 2, сориентировав его длину  $l_{\text{зер}}$  вдоль скребка 3 транспортера, а ширину  $b_{\text{зер}}$  перпендикулярно поверхности днища 4. Начало координат  $O$  совместим с центром тяжести зерна 1, а оси  $x$  и  $y$  направим по направлению движения скребка 3 транспортера и перпендикулярно днищу 4, соответственно (рис. 2.1).

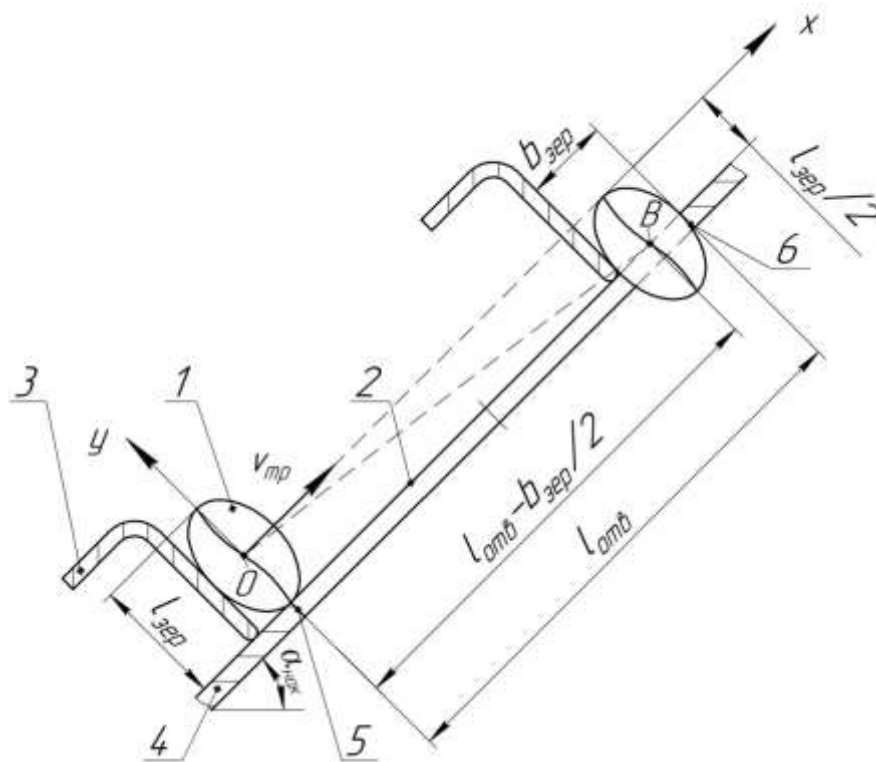


Рисунок 2.1 – Расчетная схема к определению длины отверстий решетчатого днища (зерно расположено поперечно по отношению к поверхности днища наклонной камеры): 1 – зерно; 2 – отверстие; 3 – скребок; 4 – днище наклонной камеры; 5 – передняя кромка отверстия; 6 – дальняя кромка отверстия

Специфика процесса заключается в том, что при перемещении зерна над отверстием оно не теряет контакта со скребком, поэтому скорость его перемещения вверх по днищу наклонной камеры остается неизменной и рав-

ной скорости плавающего транспортера  $v_{mp}$ . Когда зерно сползает с переднего края 5 и располагается над отверстием, оно получает возможность под действием своей тяжести падать со скоростью  $gt$ , а, следовательно, должно описывать параболическую траекторию. При этом зерно не должно встречать помехи для этого движения со стороны поверхности решета [67, 171].

Для того чтобы зерно прошло через отверстие длиной  $l_{отв}$ , центр его тяжести должен пройти по направлению оси  $x$  путь:

$$l_{отв} - \frac{b_{зер}}{2} = v_{mp} \cdot t, \quad (2.1)$$

где  $l_{отв}$  – длина отверстия,  $m$ ;

$b_{зер}$  – ширина зерна,  $m$ ;

$v_{mp}$  – скорость плавающего транспортера наклонной камеры,  $m/c$ ;

$t$  – время,  $c$ .

Считаем, что зерно успешно пройдет через сепарирующее отверстие, если центр его тяжести при перемещении вверх по днищу наклонной камеры (по оси  $x$ ) опустится вниз по оси  $y$  на половину длины, то есть на  $l_{зер}/2$ . Тогда оно может вступить в контакт с дальней кромкой 6 отверстия 2 и в результате торможения потерять скорость  $v_{mp}$  вдоль днища 1.

Перемещение зерна в вертикальном направлении ( $l_{зер}/2$ ) определим следующим образом

$$\frac{l_{зер}}{2 \cdot \cos \alpha_{нак}} = \frac{g \cdot t^2}{2}; \Rightarrow \frac{l_{зер}}{\cos \alpha_{нак}} = g \cdot t^2, \quad (2.2)$$

где  $l_{зер}$  – длина зерна,  $m$ ;

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

$g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Следовательно, для опускания зерна относительно поверхности днища на половину его длины ( $l_{зер}/2$ ) необходимо время

$$t = \sqrt{\frac{l_{зер}}{g \cdot \cos \alpha_{нак}}}. \quad (2.3)$$

Подставив полученное выражение в (2.1) и преобразовав, находим минимальную длину сепарирующего отверстия, необходимую для прохождения через него зерна

$$l_{отв} = \frac{b_{зер}}{2} + v_{мп} \cdot \sqrt{\frac{l_{зер}}{g \cdot \cos \alpha_{нак}}} \quad (2.4)$$

При средних размерах зерна пшеницы сорта «Московская 56»:  $b_{зер}=3,9$  мм,  $l_{зер}=6,5$  мм [266, 267], угле наклона днища наклонной камеры к горизонту  $\alpha_{нак}=45^\circ$  и скорости плавающего транспортера  $v_{мп}=3$  м/с [102, 112, 283], длина сепарирующего отверстия  $l_{отв}$  составит 0,094 м. При этом время движения зерна окажется равным  $t=0,031$  с.

В случае расположения длины  $l_{зер}$  зерна параллельно поверхности днища наклонной камеры (рис. 2.2)

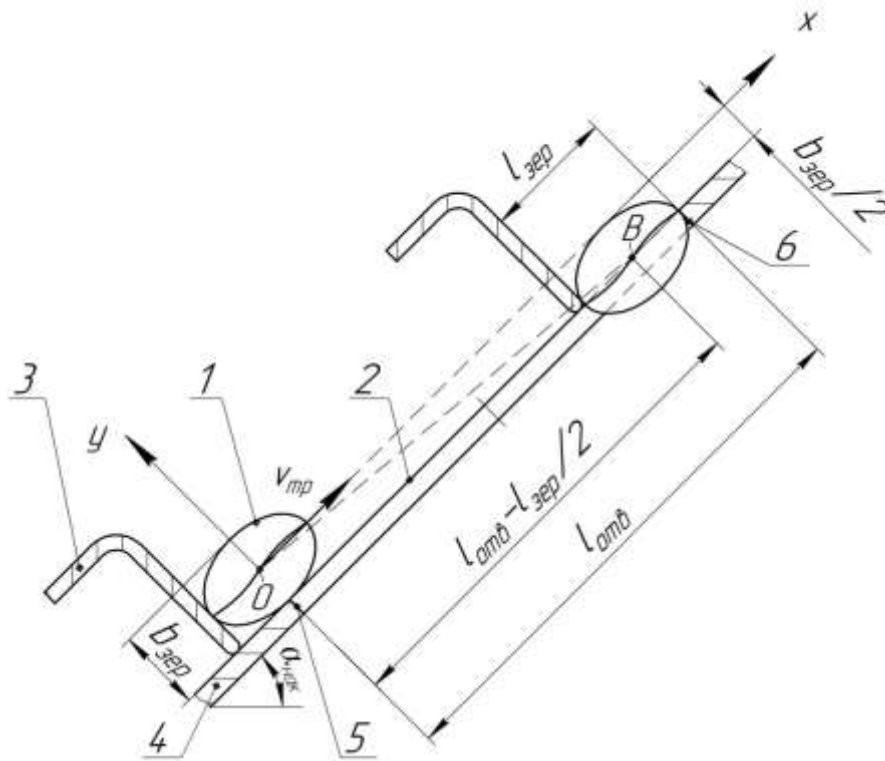


Рисунок 2.2 – Расчетная схема к определению длины отверстий решетчатого днища (зерно расположено продольно по отношению к поверхности днища наклонной камеры): 1 – зерно; 2 – отверстие; 3 – скребок; 4 – днище наклонной камеры; 5 – передняя кромка отверстия; 6 – дальняя кромка отверстия

уравнения (2.3) и (2.4) примут вид:

$$t = \sqrt{\frac{b_{\text{зер}}}{g \cdot \cos \alpha_{\text{нак}}}}, \quad (2.5)$$

$$l_{\text{отв}} = \frac{l_{\text{зер}}}{2} + v_{\text{тр}} \cdot \sqrt{\frac{b_{\text{зер}}}{g \cdot \cos \alpha_{\text{нак}}}}. \quad (2.6)$$

Тогда при тех же параметрах ( $b_{\text{зер}}$ ,  $l_{\text{зер}}$ ,  $\alpha_{\text{нак}}$  и  $v_{\text{тр}}$ ) получим следующие значения:  $l_{\text{отв}}=0,074$  м,  $t=0,024$  с. Таким образом, средняя длина отверстия, обеспечивающая сепарацию свободного зерна через днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна, должна быть не менее  $l_{\text{отв}}=0,084$  м.

Поскольку часть зерен 1 в исходный момент может не располагаться полностью над отверстием 2 решетчатого днища 3, то была выдвинута гипотеза о том, что в этом случае увеличить эффективность сепарации позволяет выполнение боковых кромок отверстий под острым углом  $\gamma_{\text{отв}}$  к направлению перемещения  $v_{\text{тр}}$  скребков 4 плавающего транспортера 5 (рис. 2.3) [173, 198].

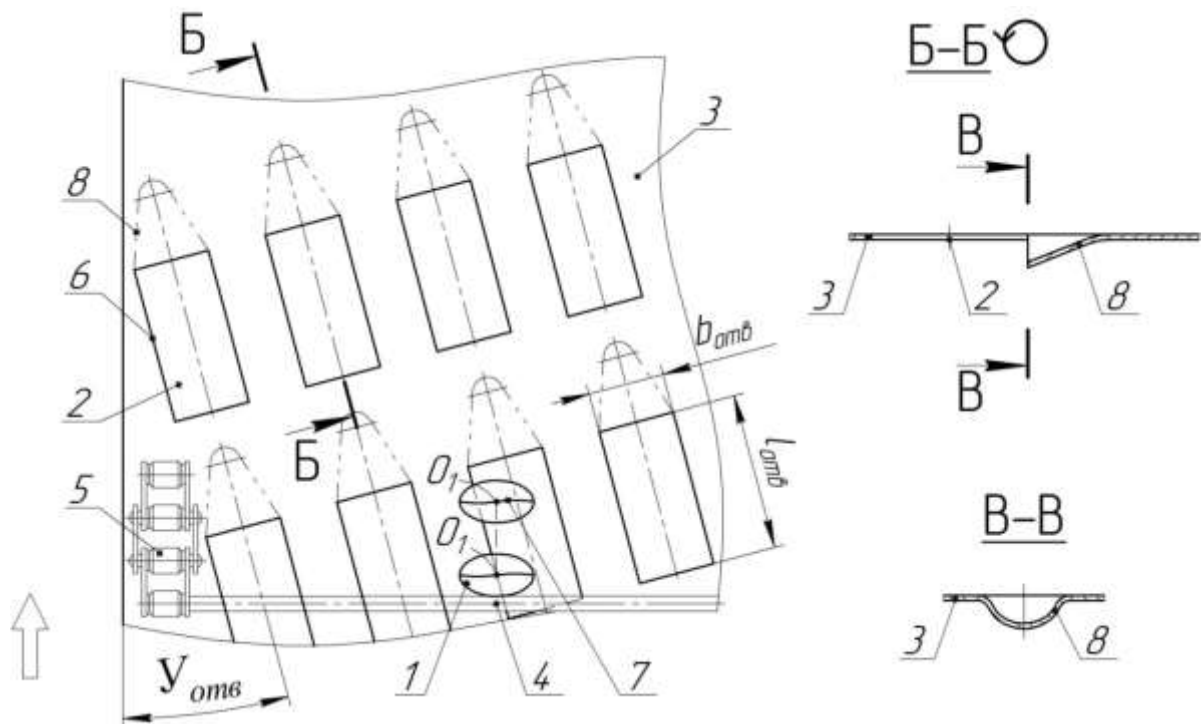


Рисунок 2.3 – Расположение отверстий решетчатого днища под острым углом к направлению движения скребков транспортера: 1 – зерно; 2 – отверстие; 3 – днище; 4 – скребок; 5 – плавающий транспортер; 6 – боковая кромка отверстия; 7 – положение зерна при его опрокидывании; 8 – выемка



Для оценки возможности осуществления данного технологического процесса рассмотрим перемещение зерна 1, проекция центра масс  $O_1$  (рис. 2.3) которого в начальный момент времени совпадает с боковой (наклонной) кромкой 6 одного из сепарирующих отверстий, выполненных в днище 3 наклонной камеры.

По мере перемещения зерно 1 оказывается в положении 2, в котором проекция центра масс  $O_1$  оказывается правее боковой кромки 6 отверстия (рис. 2.4), в связи с чем возникает опрокидывающий момент от силы тяжести  $m_{\text{зер}}g$ . Вследствие этого левый конец зерна поднимается вверх, и оно принимает наклонное положение, изображенное пунктиром на рисунке 2.5 [182].

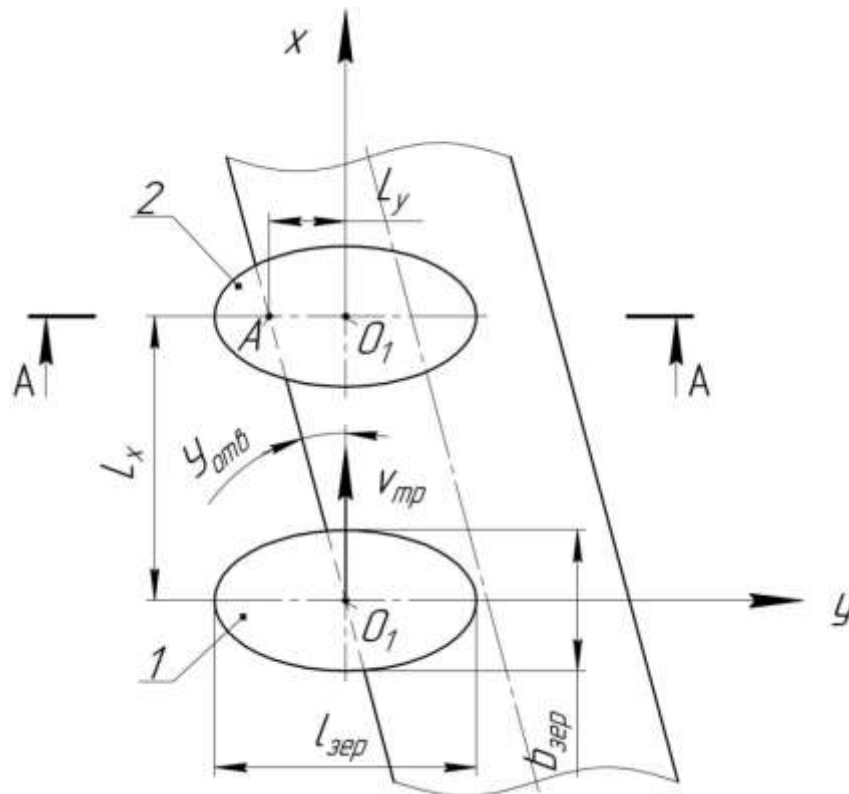


Рисунок 2.4 – Поперечное смещение центра тяжести зерна ( $L_y$ ) относительно боковой кромки сепарирующего отверстия при продольном перемещении ( $L_x$ ) по днищу наклонной камеры: 1 – исходное положение зерна; 2 – текущее положение зерна при его перемещении вдоль днища на величину  $L_x$

Для того чтобы зерно гарантированно прошло сквозь сепарирующее отверстие, оно должно повернуться относительно точки  $A$  хотя бы на мини-

мальный угол  $\varphi_{\min}$ , при котором крайняя правая точка продольной оси  $B$  опустится на поверхность дна наклонной камеры зерноуборочного комбайна, приняв положение  $B_1$  (рис. 2.5).

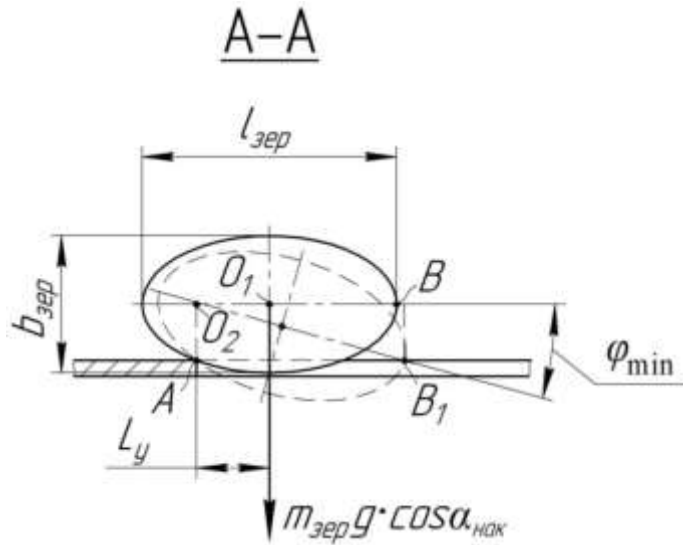


Рисунок 2.5 – Опрокидывание зерна в сепарирующее отверстие (сечение А-А на рис. 2.4)

Согласно рисунку 2.5 угол  $\varphi_{\min}$  равен

$$\varphi_{\min} = \arctg\left(\frac{AO_2}{AB_1}\right) \approx \arctg\left(\frac{b_{\text{зер}}/2}{2/3 \cdot l_{\text{зер}}}\right) = \arctg\left(\frac{3 \cdot b_{\text{зер}}}{4 \cdot l_{\text{зер}}}\right). \quad (2.7)$$

При средних размерах зерна пшеницы сорта «Московская 56» ( $b_{\text{зер}}=3,9$  мм,  $l_{\text{зер}}=6,5$  мм)  $\varphi_{\min} \approx 24^\circ$  ( $0,423$  рад).

Для определения величины перемещения  $L_x$  зерна по направлению скорости  $v_{\text{тр}}$  (рис. 2.4) за время его поворота от горизонтальной оси  $O_2B$  до положения  $O_2B_1$  на угол  $\varphi_{\min}$  (рис. 2.5), составим дифференциальное уравнение движения в плоскости, перпендикулярной вектору скорости  $v_{\text{тр}}$  [214, 215]

$$m_{\text{зер}} \cdot g \cdot L_y \cdot \cos \alpha_{\text{нак}} = J_{O_2} \cdot \varepsilon, \quad (2.8)$$

где  $m_{\text{зер}}$  – масса зерна, кг;

$g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;

$L_y$  – поперечное смещение центра тяжести зерна относительно боковой кромки сепарирующего отверстия, м;

$\alpha_{\text{нак}}$  – угол наклона днища наклонной камеры к горизонту, град;  
 $J_{O_2}$  – момент инерции зерна относительно точки  $O_2$ , кг·м<sup>2</sup>;  
 $\varepsilon$  – угловое ускорение, с<sup>-2</sup>.

Используя теорему Гюйгенса-Штейнера, определим момент инерции зерна относительно точки  $O_2$  [287, 288]

$$J_{O_2} = J_{O_1} + m_{\text{зер}} \cdot L_y^2, \quad (2.9)$$

где  $J_{O_1}$  – момент инерции зерна относительно точки  $O_1$ , кг·м<sup>2</sup>;

$L_y$  – расстояние между точками  $O_1$  и  $O_2$ , м.

Для упрощения расчетов примем, что зерно представляет собой эллипсоид вращения с размерами  $l_{\text{зер}}$  и  $b_{\text{зер}}$  [147]. Следовательно, момент инерции зерна относительно центра масс (точки  $O_1$ ) равен [256]

$$J_{O_1} = \frac{m_{\text{зер}}}{5} \cdot \left( \frac{l_{\text{зер}}^2}{4} + \frac{b_{\text{зер}}^2}{4} \right), \quad (2.10)$$

где  $l_{\text{зер}}$  – длина зерна, м;

$b_{\text{зер}}$  – ширина зерна, м.

С учетом того, что  $L_x = v_{\text{мп}} \cdot t$ , то поперечное смещение центра тяжести зерна относительно боковой кромки сепарирующего отверстия равно

$$L_y = L_x \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}} = v_{\text{мп}} \cdot t \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}}, \quad (2.11)$$

где  $L_x$  – продольное смещение центра тяжести зерна вдоль оси  $x$ , м;

$Y_{\text{отв}}$  – угол наклона отверстий, град;

$v_{\text{мп}}$  – скорость плавающего транспортера наклонной камеры, м/с;

$t$  – время, с.

Согласно (2.9) и (2.10), выражение (2.8) примет вид

$$J_{O_2} = \frac{m_{\text{зер}} \cdot (l_{\text{зер}}^2 + b_{\text{зер}}^2)}{20} + m_{\text{зер}} \cdot (v_{\text{мп}} \cdot t \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}})^2. \quad (2.12)$$

Выполнив подстановку (2.11) и (2.12) в (2.8), окончательно получим

$$m_{\text{зер}} \cdot g \cdot v_{\text{мп}} \cdot t \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}} \cdot \cos \alpha_{\text{нак}} = \left( \frac{m_{\text{зер}} \cdot (l_{\text{зер}}^2 + b_{\text{зер}}^2)}{20} + m_{\text{зер}} \cdot (v_{\text{мп}} \cdot t \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}})^2 \right) \cdot \varepsilon. \quad (2.13)$$

Если пренебречь вторым выражением в скобках ( $v_{\text{мп}} \cdot t \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}} = 0$ ), имеем

$$g \cdot v_{mp} \cdot t \cdot tg Y_{отв} \cdot \cos \alpha_{нак} = \frac{(l_{зер}^2 + b_{зер}^2)}{20} \cdot \varepsilon. \quad (2.14)$$

Или

$$g \cdot v_{mp} \cdot t \cdot tg Y_{отв} \cdot \cos \alpha_{нак} = \frac{(l_{зер}^2 + b_{зер}^2)}{20} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.15)$$

Разделим переменные

$$\int d\omega \cdot \frac{(l_{зер}^2 + b_{зер}^2)}{20} = \int g \cdot v_{mp} \cdot t \cdot tg Y_{отв} \cdot \cos \alpha_{нак} dt. \quad (2.16)$$

Проинтегрировав (2.16)

$$\omega \cdot \frac{(l_{зер}^2 + b_{зер}^2)}{20} = \frac{g \cdot v_{mp} \cdot t^2 \cdot tg Y_{отв} \cdot \cos \alpha_{нак}}{2} + C_1, \quad (2.17)$$

где  $\omega$  – угловая скорость поворота зерна,  $c^{-1}$ ;

$t$  – время,  $c$ .

Начальными условиями для (2.17) являются

$$t(0) = 0; \quad \omega(0) = 0. \quad (2.18)$$

Используя начальные условия (2.18), найдем неопределенную константу интегрирования

$$C_1 = 0. \quad (2.19)$$

Уравнение (2.17) запишем как

$$\frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{(l_{зер}^2 + b_{зер}^2)}{20} = \frac{g \cdot v_{mp} \cdot t^2 \cdot tg Y_{отв} \cdot \cos \alpha_{нак}}{2}. \quad (2.20)$$

Разделив переменные, имеем

$$d\omega \cdot \frac{(l_{зер}^2 + b_{зер}^2)}{20} = \frac{g \cdot v_{mp} \cdot t^2 \cdot tg Y_{отв} \cdot \cos \alpha_{нак}}{2} dt. \quad (2.21)$$

Проинтегрируем теперь (2.21)

$$\omega \cdot \frac{(l_{зер}^2 + b_{зер}^2)}{20} = \frac{g \cdot v_{mp} \cdot t^3 \cdot tg Y_{отв} \cdot \cos \alpha_{нак}}{6} + C_2, \quad (2.22)$$

где  $\varphi$  – угол поворота зерна,  $рад$ .

Начальными условиями для (2.22) являются

$$t(0) = 0; \quad \varphi(0) = 0. \quad (2.23)$$

Подставив начальные условия (2.23) в (2.22), определим неопределенную константу интегрирования

$$C_2 = 0. \quad (2.24)$$

С учетом (2.24) уравнение (2.22) примет вид

$$3 \cdot \varphi \cdot (l_{\text{зер}}^2 + b_{\text{зер}}^2) = 10 \cdot g \cdot v_{\text{мп}} \cdot t^3 \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}} \cdot \cos \alpha_{\text{нак}}. \quad (2.25)$$

Тогда время опрокидывания зерна составит

$$t = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (l_{\text{зер}}^2 + b_{\text{зер}}^2) \cdot \varphi_{\text{min}}}{10 \cdot g \cdot v_{\text{мп}} \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}} \cdot \cos \alpha_{\text{нак}}}}. \quad (2.26)$$

Минимальная длина сепарирующего отверстия, обеспечивающая сепарацию свободного зерна в днище наклонной камеры, будет равна

$$l_{\text{отв}} = v_{\text{мп}} \cdot t = v_{\text{мп}} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (l_{\text{зер}}^2 + b_{\text{зер}}^2) \cdot \varphi_{\text{min}}}{10 \cdot g \cdot v_{\text{мп}} \cdot \text{tg} Y_{\text{отв}} \cdot \cos \alpha_{\text{нак}}}}, \quad (2.27)$$

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

$v_{\text{мп}}$  – скорость плавающего транспортера наклонной камеры,  $\text{м/с}$ ;

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

$\varphi_{\text{min}}$  – угол поворота зерна,  $\text{рад}$ ;

$t$  – время,  $\text{с}$ ;

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

При угле наклона днища наклонной камеры к горизонту  $\alpha_{\text{нак}}=45^\circ$ , угле наклона отверстий  $Y_{\text{отв}}=15^\circ$  и скорости плавающего транспортера  $v_{\text{мп}}=3 \text{ м/с}$  [102, 112, 137], получаем, что минимальная длина сепарирующего отверстия составит  $l_{\text{отв}} = 0,033 \text{ м}$ .

Следует иметь в виду, что при начале расчета были введены допущения и ограничения, которые могут оказать существенное влияние на результат. В частности, не учитывалась сила трения между поверхностью скребка 4 и зерном 1 (рис. 2.3). С другой стороны, момент инерции зерна определен по максимально возможному варианту, тогда как в начальный момент и в промежуточном положении, изображенном на рисунке 2.5, он (с учетом теоремы Гюйгенса) имеет существенно меньшую величину.

Существенное влияние на процесс оказывает и наличие поперечной щели, что может оказать заметное тормозящее воздействие на опрокидывающееся в сепарирующее отверстие зерно. Тем не менее, если даже на практике придется удвоить длину отверстия, то по длине днища может быть размещено несколько последовательных рядов отверстий, что увеличит сепарирующую способность поверхности.

Для того чтобы исключить торможение необмолоченных и недомолоченных колосьев, конструкция должна предусматривать на выходе каждого сепарирующего отверстия выемку, нижняя кромка которой (рис. 2.3) расположена ниже поверхности днища наклонной камеры. Она имеет переменное сечение криволинейного вида, причем ее глубина уменьшается по мере удаления от верхней кромки сепарирующего отверстия от максимального значения и до нуля. Для остей колоса, частично проникшего в сепарирующее отверстие, наклонная поверхность выемки должна служить средством их принудительного подъема на уровень поверхности днища наклонной камеры.

Таким образом, представленные теоретические исследования свидетельствуют о том, что значительная часть свободного зерна, содержащегося в очесанном ворохе, может быть выделена посредством решетчатого днища наклонной камеры и исключена из процесса нерационального взаимодействия с молотильным барабаном.

## **2.2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА НАКЛОННОЙ РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Экспериментальные исследования, выполненные на лабораторной установке, имитирующей работу наклонной камеры зерноуборочного комбайна и снабженной решетчатой поверхностью, свидетельствуют о том, что осуществить практически полную сепарацию очесанного вороха в пределах ее конструктивной длины возможно [155, 157, 182]. При этом установлено,

что длина отверстий существенным образом выходит за пределы, полученные при предварительном теоретическом моделировании процесса [169, 171, 173]. Это обусловлено тем, что на начальном этапе моделирования процесса сепарации рассматривалось равновесие и условие прохода сквозь отверстие отдельного зерна без учета его взаимодействия с окружающей массой вороха. В связи с этим, представляется целесообразным усложнить модель, что поможет выявить качественные и количественные параметры взаимодействия компонентов вороха и найти резервы для дальнейшего совершенствования конструкции.

Вопрос истечения сыпучих материалов сквозь отверстия рассматривается большинством ученых с точки зрения классической механики и гидравлики [20, 40, 83]. При этом отдельное зерно представляется в виде горизонтального параллелепипеда, на который действуют соответствующие силы, характерные для частицы жидкости. В условиях проектирования приемно-распределительных устройств зерновых бункеров такая гипотеза дает приемлемый результат [71], однако использовать ее на наклонной плоскости не представляется возможным. Прежде всего, это обусловлено тем, что характер процесса сепарации в наклонной камере имеет принципиальные отличия от истечения жидкости сквозь отверстие, в котором скорость зависит, в основном, от напора (высоты слоя), живого сечения и коэффициента вязкости.

В связи с этим, рассмотрим процесс перемещения очесанного зернового вороха по днищу наклонной камеры зерноуборочного комбайна, расположенного под углом  $\alpha_{нак}$  по отношению к горизонтальной плоскости (рис. 2.6).

В нижней части наклонной камеры зерноуборочного комбайна скребок совершает движение по дуге окружности, вследствие чего он внедряется в поступающий от очесывающего адаптера слой вороха и захватывает его часть. Считаем, что после захвата скребком 1 вороха 5 в нижней части наклонной камеры комбайна поперечное (по отношению к скребку) сечение перемещаемого объема представляет собой прямоугольный треугольник, одним из катетов которого является высота указанного скребка (рис. 2.6, а).

При этом считаем, что перемещаемый объем очесанного зернового вороха представляет собой однородную несжимаемую массу.

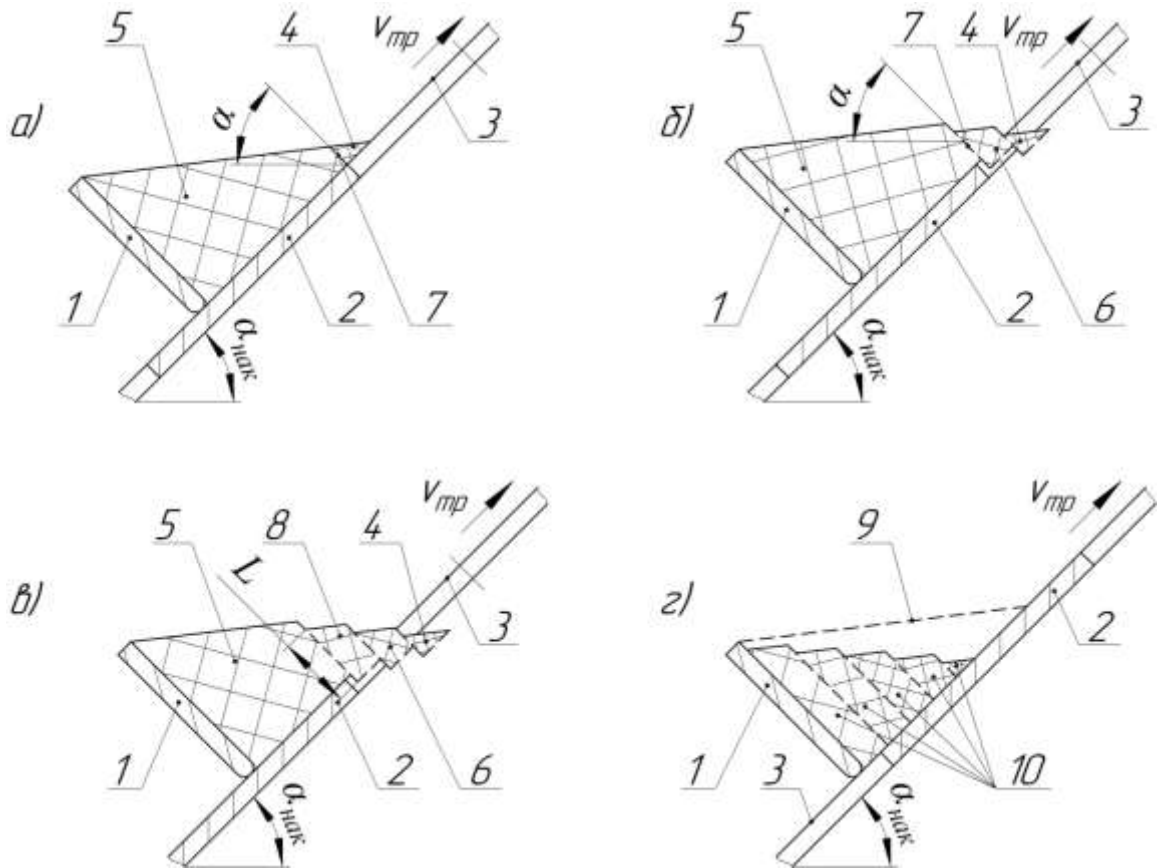


Рисунок 2.6 – Фазы процесса прохождения вороха сквозь отверстие решетчатой поверхности: а) начальная фаза; б), в) скольжение зернового вороха вдоль плоскости раздела; г) конечная фаза; 1 – скребок; 2 – решетчатое днище; 3 – продольное отверстие; 4 – элементарный объем вороха; 5 – очесанный ворох; 6, 8, 10 – второй и последующие слои схода вороха; 7 – поверхность раздела; 9 – первоначальное положение очесанного вороха

В результате преодоления границы между сплошной поверхностью решетчатого днища 2 и нижней кромкой продольного отверстия 3 потерявший опору снизу элементарный объем (слой) 4 вороха начинает скольжение вдоль плоскости раздела 7, сориентированной под углом внутреннего трения  $\alpha$  к горизонту. По мере перемещения скребка 1 по направлению скорости плавающего транспортера  $v_{mp}$  начинается скольжение второго слоя 6 (рис. 2.6, б). Далее к процессу подключается очередной слой 8 (рис. 2.6, в) и, таким



образом, в движение скольжения вдоль наклонных плоскостей раздела 7 приходят и все остальные слои 10 поперечного сечения вороха 5. Проходя сквозь отверстие 3, слой вороха дезинтегрируется, и на дальнейшее течение процесса не влияет [175].

При изучении характера движения зернового вороха вычленим из элементарного объема вороха 4 отдельное зерно и рассмотрим его движение вдоль наклонной поверхности раздела 7 (рис. 2.6).

### 2.2.1 СКАТЫВАНИЕ КРУГЛОГО ЗЕРНА С НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрим первую теоретическую модель поперечного сечения зерна, скатывающегося с наклонной плоскости (рис. 2.7).

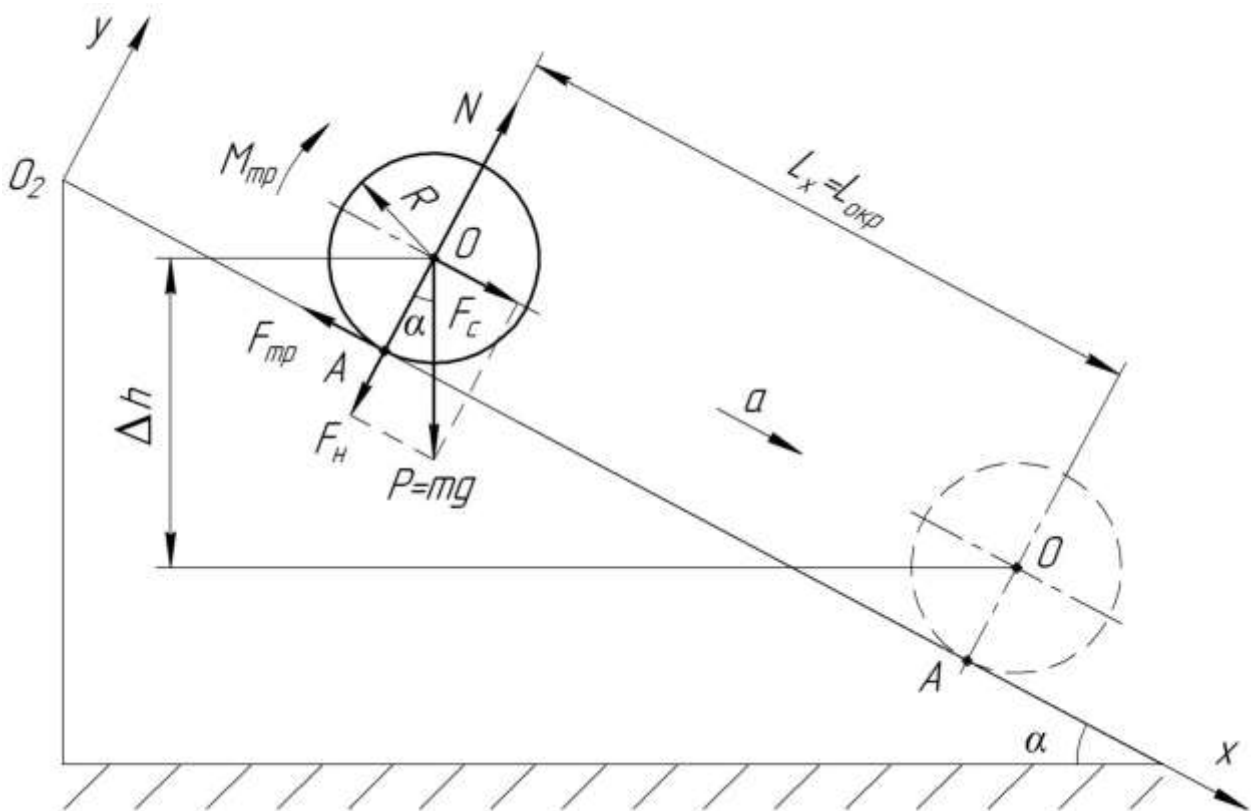


Рисунок 2.7 – Силы, действующие на зерно, имеющее круглое поперечное сечение и находящееся на наклонной поверхности

Здесь изображено сечение цилиндра плоскостью, перпендикулярной его оси. На цилиндр радиусом  $R$  (равный половине ширины зерна  $b_{зер}$ ) и массой  $m$  действует вес тела  $\vec{P} = m\vec{g}$ , разложенный на свои составляющие:  $\vec{F}_c$  – скатывающую силу, и  $\vec{F}_n$  – силу нормального давления зерна на наклонную плоскость. Силу  $\vec{F}_n$  уравнивает сила  $\vec{N}$  реакции плоскости на тело. В точке  $A$  соприкосновения зерна с наклонной плоскостью действует сила трения  $\vec{F}_{тр}$  [159].

Очевидно, что при малых углах  $\alpha$  зерно будет скатываться с наклонной плоскости медленно и без проскальзывания. С увеличением угла  $\alpha$  оно будет скатываться все быстрее (получая большее ускорение скатывания). При некотором критическом угле  $\alpha_1$  начнется скатывание зерна с проскальзыванием между ним и наклонной плоскостью. Будем считать этот критический угол, а также ускорение и скорость, которые приобретает зерно, скатываясь с наклонной плоскости.

Запишем второй закон Ньютона для зерна, отнеся все силы, приложенные к нему, к его центру – точке  $O$ :

$$m\vec{g} + \vec{F}_{mp} + \vec{N} = m\vec{a}, \quad (2.28)$$

где  $m$  – масса цилиндра, кг;

$g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$F_{mp}$  – сила трения, Н;

$N$  – реакция наклонной плоскости на тело, Н;

$\vec{a}$  – ускорение центра  $O$ ,  $\text{м/с}^2$ .

В проекциях на оси координат векторное равенство (2.28) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} O_x: \quad mg \cdot \sin \alpha - F_{mp} &= ma; \\ O_y: \quad -mg \cdot \cos \alpha + N &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

При углах  $\alpha < \alpha_1$  (нет проскальзывания) сила трения  $F_{mp}$  – это сила трения покоя. При  $\alpha = 0$  и  $F_{mp} = 0$ . С увеличением  $\alpha$  увеличивается и  $F_{mp}$ . При  $\alpha = \alpha_1$  сила трения покоя достигает своего максимального значения – силы тре-

ния скольжения –  $\mu N$ , и при дальнейшем увеличении угла  $\alpha$  силой трения скольжения и остается.

Сила трения  $F_{mp}$  – единственная из трех сил ( $\vec{P} = m\vec{g}$ ;  $\vec{F}_{mp}$ ;  $\vec{N}$ ), приложенных к зерну, которая заставляет его вращаться вокруг своей оси  $O$ . Поскольку только она создает относительно точки  $O$  вращающий момент

$$M_{mp} = F_{mp} \cdot R. \quad (2.30)$$

Две другие силы проходят через центр зерна и вращающего момента не создают.

Запишем второй закон Ньютона для вращающегося тела [256]:

$$M_{mp} = J \cdot \varepsilon, \quad (2.31)$$

где  $J = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{зер}} \cdot R^2$  – момент инерции зерна, имеющего сплошное круглое поперечное сечение,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\varepsilon$  – угловое ускорение,  $\text{с}^{-2}$ .

На основании (2.31) уравнение (2.30) примет вид:

$$F_{mp} \cdot R = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2 \cdot \varepsilon \Rightarrow F_{mp} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R \cdot \varepsilon. \quad (2.32)$$

Если проскальзывания при скатывании зерна нет, то ускорение его центра равно

$$R \cdot \varepsilon = a. \quad (2.33)$$

И тогда из (2.32) получаем:

$$F_{mp} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot a. \quad (2.34)$$

Выражение (2.34) для силы трения получено при условии, что проскальзывание отсутствует. То есть для случая, когда  $\alpha < \alpha_1$ . Мы пока это и будем предполагать. При  $\alpha > \alpha_1$ , то есть при крутых углах наклона  $\alpha$ , когда имеет место проскальзывание, сила трения  $F_{mp}$  будет не сила трения покоя (2.34), а силой трения скольжения  $F_{mp} = \mu \cdot N$ .

Подставив выражение (2.34) в первое из уравнений (2.29):

$$mg \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot ma = ma \Rightarrow a = \frac{2g \cdot \sin \alpha}{3}. \quad (2.35)$$

С учетом (2.35) сила  $F_{mp}$  примет вид:

$$F_{mp} = \frac{1}{3} \cdot \sin \alpha \cdot mg. \quad (2.36)$$

Зная ускорение (2.35), с которым скатывается зерно, можем найти и скорость его скатывания (без скольжения). Очевидно, что наиболее важно найти скорость  $v$  зерна в нижней точке наклонной плоскости – максимальную скорость, которую оно наберет. Этим и ограничимся.

Будем считать, что свое движение зерно начинает в верхней точке  $A$  наклонной плоскости. Тогда за один оборот оно пройдет расстояние  $L_x$ , равное длине своей окружности  $L_{окр}$ . Пусть  $t$  – время, которое на это будет затрачено. Тогда

$$L_{окр} = \frac{a \cdot t^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2 \cdot L_{окр}}{a}} = \sqrt{\frac{3 \cdot L_{окр}}{g \cdot \sin \alpha}}. \quad (2.37)$$

С учетом того, что  $L_{окр} = 2 \cdot \pi \cdot R$ , то время одного оборота зерна будет равно

$$t = \sqrt{\frac{6 \cdot \pi \cdot R}{g \cdot \sin \alpha}} = \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \pi}{\sin \alpha}}. \quad (2.38)$$

Следовательно, скорость зерна к концу его одного оборота

$$v = a \cdot t = \frac{2 \cdot g \cdot \sin \alpha}{3} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot L_{окр}}{g \cdot \sin \alpha}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot L_{окр} \cdot \sin \alpha}{3}}. \quad (2.39)$$

Левую часть выражения (2.39) запишем в виде уравнения Эйлера [256]

$$v = \omega \cdot R. \quad (2.40)$$

Тогда угловая скорость может быть определена следующим образом

$$\omega = \frac{2}{R} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot L_{окр} \cdot \sin \alpha}{3}}. \quad (2.41)$$

Или с учетом подстановки  $L_{окр} = 2 \cdot \pi \cdot R$ , окончательно получим

$$\omega = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \sin \alpha}{3}}. \quad (2.42)$$

А теперь перейдем к углам  $\alpha \geq \alpha_1$ , когда начнется проскальзывание. Оно начнется, когда станет  $F_{mp} = \mu \cdot N$ , где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения. Значение  $N$  возьмем из второго уравнения (2.29):  $N = mg \cdot \cos \alpha$ . Сила трения определяется формулой (2.36). В итоге получим, полагая в этих двух формулах  $\alpha = \alpha_1$ :

$$F_{mp} = \mu \cdot N; \Rightarrow \frac{1}{3} \cdot \sin \alpha_1 \cdot mg = \mu \cdot mg \cdot \cos \alpha_1.$$

Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = 3\mu, \quad (2.43)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения.

При  $\alpha \geq \alpha_1$ , когда имеет место проскальзывание, изменится и величина ускорения  $a$  катящегося по наклонной плоскости зерна. Мы его найдем, подставив в первое из уравнений (2.29) выражение

$$F_{mp} = \mu \cdot N = \mu \cdot mg \cdot \cos \alpha. \quad (2.44)$$

Тогда получим

$$a = g(\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha). \quad (2.45)$$

Аналогичная задача может быть решена при помощи энергетического подхода. Применим его для определения линейной и угловой скорости, а также времени одного оборота зерна. Для этого запишем закон сохранения энергии в следующем виде [27, 159]

$$m \cdot g \cdot \Delta h = E_k, \quad (2.46)$$

где  $m$  – масса цилиндра, кг;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\Delta h$  – изменение высоты центра тяжести зерна, м;

$E_k$  – полная кинетическая энергия, Дж.

Согласно теореме Кенига полная кинетическая энергия тела, совершающего сложное движение, равна сумме кинетической энергии в поступательном движении и кинетической энергии во вращательном движении вокруг центра масс [256]. То есть

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{J_o \cdot \omega^2}{2}, \quad (2.47)$$

где  $v$  – линейная скорость зерна,  $m/c$ ;

$J_o$  – момент инерции зерна проходящий через точку  $O$ ,  $кг \cdot м^2$ ;

$\omega$  – угловая скорость зерна,  $c^{-1}$ .

Момент инерции поперечного сечения зерна равен [33, 115]

$$J_o = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2. \quad (2.48)$$

Подставив (2.40) и (2.48) в уравнение (2.47), получим

$$E_k = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot R^2}{2} + \frac{m \cdot R^2}{2} \cdot \frac{\omega^2}{2} = \frac{3}{4} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R^2. \quad (2.49)$$

Тогда закон сохранения энергии можно записать в следующем виде

$$m \cdot g \cdot \Delta h = \frac{3}{4} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R^2. \quad (2.50)$$

Преобразовав выражение (2.50), окончательно имеем

$$\omega = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot \Delta h}{3 \cdot R^2}}. \quad (2.51)$$

С учетом того, что  $\Delta h = L_{окр} \cdot \sin \alpha$  (рис. 2.7), а  $L_{окр} = 2 \cdot \pi \cdot R$ , то

$$\omega = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot g \cdot \sin \alpha}{3 \cdot R}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \sin \alpha}{3}}.$$

Поскольку зерно движется по наклонной поверхности равноускорено, то время его одного оборота составит

$$t = \frac{\varphi}{\omega_{ср}} = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{\omega_{нач} + \omega_{кон}}{2}} = \frac{4 \cdot \pi}{\omega_{нач} + \omega_{кон}}, \quad (2.52)$$

где  $\varphi$  – угол поворота зерна,  $рад$ ;

$\omega_{ср}$  – средняя угловая скорость зерна,  $c^{-1}$ ;

$\omega_{нач}$  – начальная угловая скорость зерна,  $c^{-1}$ ;

$\omega_{кон}$  – конечная угловая скорость зерна,  $c^{-1}$ .

Время, которое потратит зерно на один оборот, может быть определено по следующему выражению

$$t = \sqrt{\frac{3 \cdot L_{окр}}{g \cdot \sin \alpha}}, \quad (2.53)$$

где  $L_{окр}$  – путь пройденный зерном за один его оборот, м;

$\alpha$  – угол наклона поверхности, град.

Поскольку  $L_{окр} = 2 \cdot \pi \cdot R$ , то (2.53) примет вид

$$t = \sqrt{\frac{6 \cdot \pi \cdot R}{g \cdot \sin \alpha}}. \quad (2.54)$$

Согласно рисунку 2.7, путь пройденный зерном [121]

$$L_{окр} = \frac{\Delta h}{\sin \alpha}. \quad (2.55)$$

Тогда подставив (2.55) в (2.53), получим

$$t = \sqrt{\frac{3 \cdot \Delta h}{g \cdot \sin^2 \alpha}}. \quad (2.56)$$

Полученные уравнения понадобятся нам ниже при исследовании пропускной способности решетчатой поверхности.

## 2.2.2 СКАТЫВАНИЕ ОБРЕЗАННОГО ЦИЛИНДРА С НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрим вторую теоретическую модель поперечного сечения зерна, скатывающегося с наклонной плоскости. На рисунке 2.8 изображено поперечное сечение зерна, имеющего форму обрезанного цилиндра. Оно представляет собой обрезанную окружность [114].

Здесь  $R$  – радиус цилиндра (равный половине ширины зерна  $b_{зер}$ );  $\beta$  – центральный угол, характеризующий степень обрезанности цилиндра;  $xO_1y$  – декартова система координат, в которой рассматривается сечение цилиндра;  $O(0; b)$  – центр сечения цилиндра;  $A(a; 0)$  и  $A_1(-a; 0)$  – концы линии обреза.

Согласно рисунку 2.8 [121]

$$a = R \cdot \sin \beta; \quad b = R \cdot \cos \beta. \quad (2.57)$$

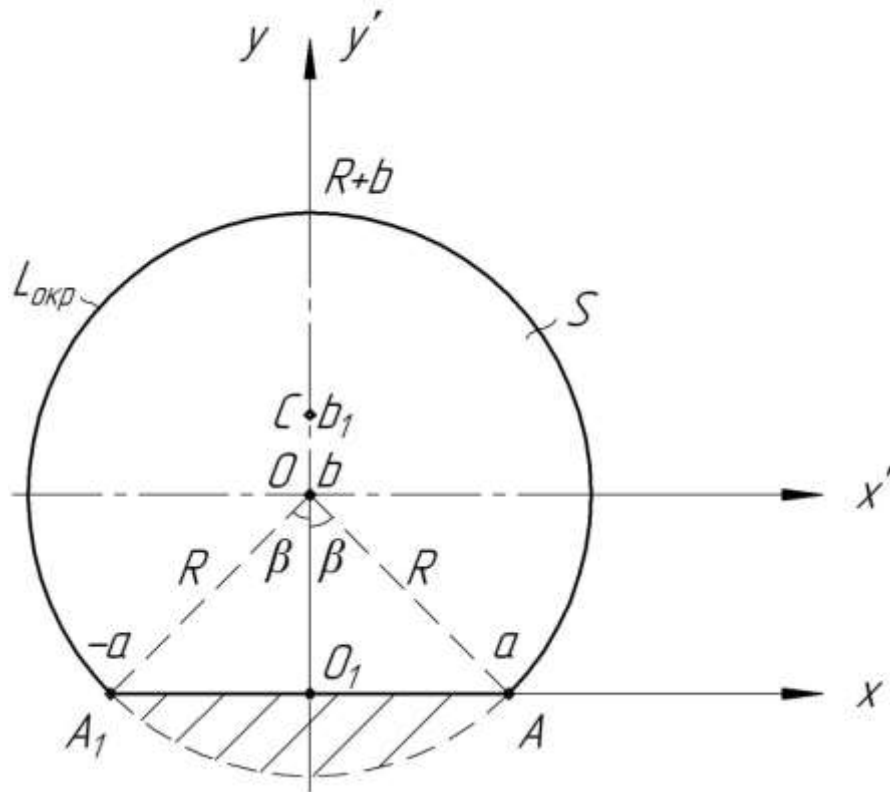


Рисунок 2.8 – Поперечное сечение обрезанного цилиндра

Так как цилиндр обрезан, то центр тяжести его сечения находится не в точке  $O$ , а выше – в некоторой точке  $C(0; b_1)$ . Найдем эту точку.

$$b_1 = \frac{M_x}{S}, \quad (2.58)$$

где  $M_x$  – статический момент относительно оси  $Ox$  пластины  $S$ , представляющей собой сечение обрезанного цилиндра, площадь которого  $S$ .

Статический момент относительно оси  $Ox$  пластины  $S$  определим как

$$M_x = \iint_S y dx dy. \quad (2.59)$$

Площадь  $S$  сечения обрезанного цилиндра находим элементарно. Она равна площади целого круга радиусом  $R$  за вычетом заштрихованного сегмента [115]. То есть

$$S = (\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) \cdot R^2. \quad (2.60)$$

Теперь найдем статический момент  $M_x$ . То есть вычислим двойной интеграл (2.59). Разобьем область  $S$  интегрирования на две части:  $S_{\circlearrowleft}$  и  $S_{\triangle}$ .



Здесь  $S_{\cap}$  – часть области  $S$ , ограниченной отрезками  $OA$  и  $OA_1$ , и замыкающей их дугой  $L_{окр}$  окружности. А  $S_{\Delta}$  – это треугольник  $\Delta AOA_1$ .

Тогда

$$M_x = \iint_{S_{\cap}} y dx dy + \iint_{S_{\Delta}} y dx dy. \quad (2.61)$$

Вычислим сначала первый из этих интегралов. Для этого перейдем от системы координат  $xO_1y$  к системе  $x'Oy'$ , связанной с центром окружности. То есть сделаем в первом из интегралов (2.61) замену:

$$x = x'; \quad y = y' + b; \quad dx = dx'; \quad dy = dy'. \quad (2.62)$$

Тогда

$$\iint_{S_{\cap}} y dx dy = \iint_{S_{\cap}} (y' + b) dx' dy' = \iint_{S_{\cap}} y' dx' dy' + b \iint_{S_{\cap}} dx' dy'. \quad (2.63)$$

В первом из интегралов (2.63) перейдем к полярным координатам:

$$x' = r \cdot \cos \varphi; \quad y' = r \cdot \sin \varphi; \quad dx dy = r dr d\varphi; \quad (2.64)$$

$$0 \leq r \leq R; \quad -\frac{\pi}{2} + \beta \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{2} - \beta.$$

Тогда получим

$$\begin{aligned} \iint_{S_{\cap}} y' dx' dy' &= \iint_{S_{\cap}} r \cdot \sin \varphi \cdot r dr d\varphi = \int_{-\frac{\pi}{2} + \beta}^{\frac{3\pi}{2} - \beta} \sin \varphi d\varphi \int_0^R r^2 dr = (-\cos \varphi) \left[ \frac{r^3}{3} \right]_0^R = \\ &= \frac{2}{3} \sin \beta \cdot R^3. \end{aligned} \quad (2.65)$$

А второй интеграл в (2.63) даст площадь области интегрирования  $S_{\cap}$ :

$$\iint_{S_{\cap}} dx' dy' = S_{\cap} = (\pi - \beta) \cdot R^2. \quad (2.66)$$

Таким образом, на основании (2.65), (2.66) и (2.57) получаем следующее значение интеграла (2.63):

$$\iint_{S_{\cap}} y dx dy = \left[ \frac{2}{3} \cdot \sin \beta + (\pi - \beta) \cdot \cos \beta \right] \cdot R^3. \quad (2.67)$$

Это первый из интегралов (2.63). Найдём второй. Учитывая, что стороны  $AO$  и  $A_1O$  треугольника  $\Delta AOA_1$  имеют уравнения

$$x = (b - y) \cdot \operatorname{tg} \beta \quad \text{и} \quad x = (y - b) \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (2.68)$$

соответственно, получим

$$\begin{aligned} \iint_{S_{\Delta}} y dx dy &= \int_0^b y dy \int_{(y-b)\operatorname{tg}\beta}^{(b-y)\operatorname{tg}\beta} dx = \int_0^b y dy \cdot x \Big|_{(y-b)\operatorname{tg}\beta}^{(b-y)\operatorname{tg}\beta} = 2 \int_0^b (b-y) \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot y dy = \frac{1}{3} \cdot b^3 \cdot \operatorname{tg} \beta = \\ &= \frac{1}{3} \cdot R^3 \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta. \end{aligned} \quad (2.69)$$

Таким образом, на основании (2.63), (2.67) и (2.69) получаем:

$$M_x = \left[ \frac{2}{3} \cdot \sin \beta + (\pi - \beta) \cdot \cos \beta + \frac{1}{3} \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta \right] \cdot R^3. \quad (2.70)$$

И тогда, согласно (2.58), (2.60) и (2.70), получаем положение  $b_1$  в центре тяжести поперечного сечения обрезанного цилиндра

$$b_1 = \frac{\frac{2}{3} \cdot \sin \beta + (\pi - \beta) \cdot \cos \beta + \frac{1}{3} \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} \cdot R, \quad (2.71)$$

где  $\beta$  – центральный угол обрезанного цилиндра, *рад*;

$R$  – радиус цилиндра, *м*.

А теперь рассмотрим обрезанный цилиндр на наклонной плоскости (рис. 2.9). Находясь в положении 1, цилиндр будет падать своей плоской гранью на наклонную плоскость. И если в результате падения он окажется в положении 2, то он в этом положении и останется.

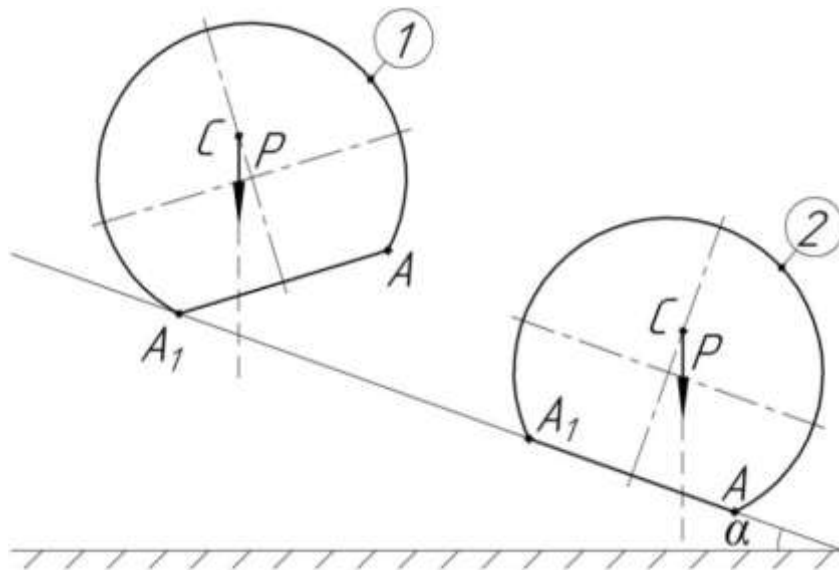


Рисунок 2.9 – Положение обрезанного цилиндра на наклонной плоскости

Упав на наклонную плоскость, он мгновенно затормозится, а свою кинетическую энергию вращения вокруг точки  $A_1$  он обратит в тепловую энергию – свою и наклонной плоскости. Здесь предполагается, что удар будет не упругим – отскока цилиндра от плоскости при ударе не будет.

И только если угол  $\beta$  (рис. 2.8), определяющий степень обрезанности цилиндра, и угол  $\alpha$  будут связаны таким образом, что линия действия веса  $P$  цилиндра пройдет через точку  $A$  (рис. 2.10) или угол  $\alpha$  будет еще круче, цилиндр после удара своей плоской частью о наклонную плоскость и своей остановки затем опять продолжит свое скатывание.

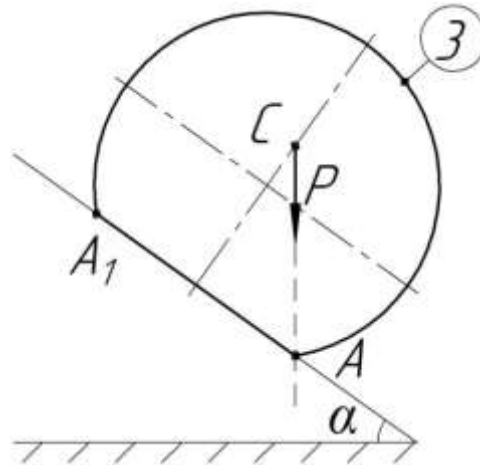


Рисунок 2.10 – Условие скатывания обрезанного цилиндра с наклонной плоскости

Таким образом, осталось найти связь между углами  $\beta$  и  $\alpha$ , соответствующих рисунку 2.10. Для этого рассмотрим рисунок 2.11.

В треугольнике  $\Delta AOC$  углы  $(\alpha; \gamma; \pi - \beta)$ . Причем  $\beta = \alpha + \gamma$ . Применим к этому треугольнику теорему синусов:

$$\frac{OA}{\sin \alpha} = \frac{OC}{\sin \gamma}; \Rightarrow \frac{R}{\sin \alpha} = \frac{b_1 - b}{\sin(\beta - \alpha)}. \quad (2.72)$$

Согласно (2.71) и (2.57)

$$b_1 - b = \frac{2}{3} \cdot R \cdot \frac{\sin^3 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta}. \quad (2.73)$$

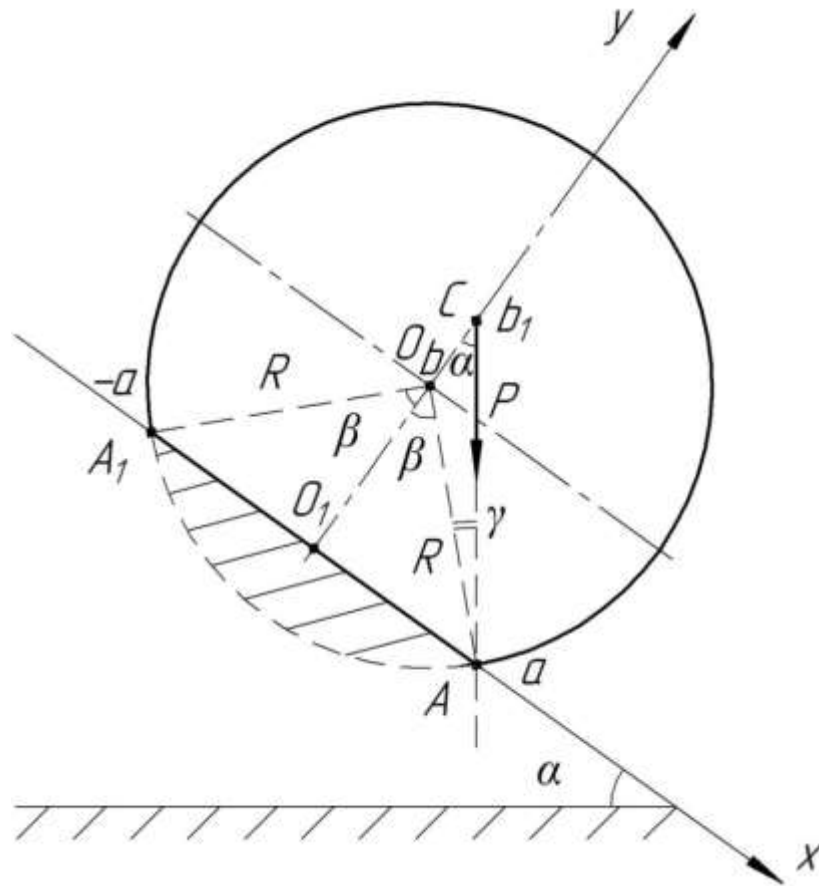


Рисунок 2.11 – К определению связи между углами  $\beta$  и  $\alpha$

Поэтому

$$\frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \alpha} = \frac{b_1 - b}{R} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^3 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta};$$

$$\frac{\sin \beta \cdot \cos \alpha - \cos \beta \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^3 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta};$$

$$\sin \beta \cdot \operatorname{ctg} \alpha - \cos \beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^3 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta};$$

$$\sin \beta \cdot \operatorname{ctg} \alpha = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^3 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} + \cos \beta.$$

Окончательно получим

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^2 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta. \quad (2.74)$$

Или

$$\alpha = \operatorname{arcctg} \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^2 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta \right). \quad (2.75)$$

По этому уравнению по заданному углу  $\beta$  можно найти угол  $\alpha$ . Это те углы  $\beta$  и  $\alpha$ , которые соответствуют рисунку 2.11.

Построим график функции, определяющий соотношение между углами  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 2.12), при которых положение обрезанного цилиндра, лежащего своей плоской частью, становится неустойчивым [114].

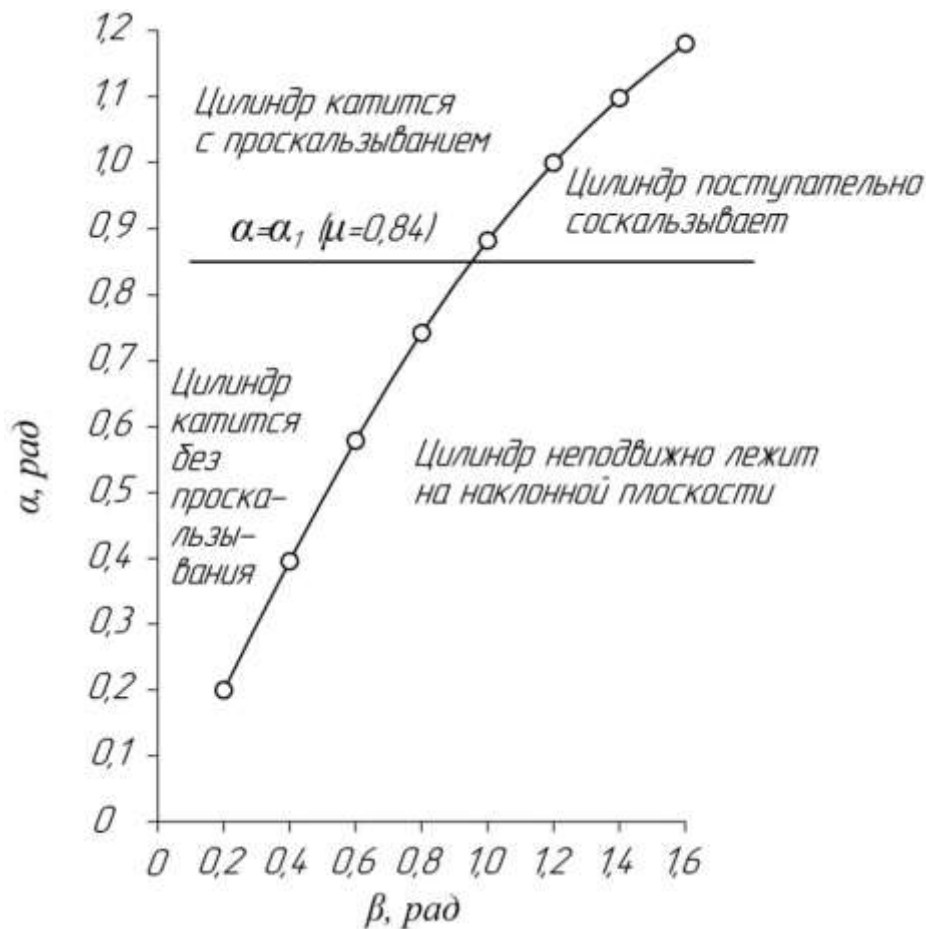


Рисунок 2.12 – График функции, определяющей соотношение между углами  $\alpha$  и  $\beta$

Кривая, изображенная выше, и горизонтальная прямая  $\alpha = \alpha_1$  разбивают область значений  $(\beta; \alpha)$  на четыре части. Суть их указана на рисунке 2.12. Так при  $\alpha \leq \alpha_1$  и  $\beta > \alpha_1$  – цилиндр покоится, а если  $\beta < \alpha$  – цилиндр катится без проскальзывания. При  $\alpha > \alpha_1$  и  $\beta > \alpha_1$  – цилиндр скользит, а если  $\beta < \alpha$  – цилиндр катится со скольжением.

Рассмотрим динамику качения обрезанного цилиндра по наклонной плоскости. Будем считать, что угол  $\beta$  задан. Он характеризует степень обрезанности цилиндра и определяется формой зерна. Его можно измерить (или определить графически). А соответствующий его критический угол  $\alpha$  будем обозначать  $\alpha_1$

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sin^2 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta. \quad (2.76)$$

Если считать что,  $\alpha \geq \alpha_1$ , то цилиндр, положенный своей плоской гранью на наклонную плоскость, начнет по ней катиться. При  $\alpha < \alpha_1$  он останется неподвижно лежать на ней. Естественно, что этот последний случай интереса не представляет. Поэтому будем рассматривать катящийся цилиндр ( $\alpha \geq \alpha_1$ ).

Конечной целью такого рассмотрения будем считать время, за которое цилиндр сделает один полный оборот вокруг своей оси. Тогда можно будет найти и полное время, за которое цилиндр скатится с наклонной плоскости. Именно оно и определит производительность наклонной плоскости.

Совершив полный оборот, обрезанный цилиндр пройдет несколько характерных стадий (рис. 2.13). Здесь позиция 1 и 5 – означают начальную и конечную стадию; 2 – вращение вокруг угловой точки  $A$ ; 3 – качение по дуге; 4 – вращение вокруг угловой точки  $A_1$ .

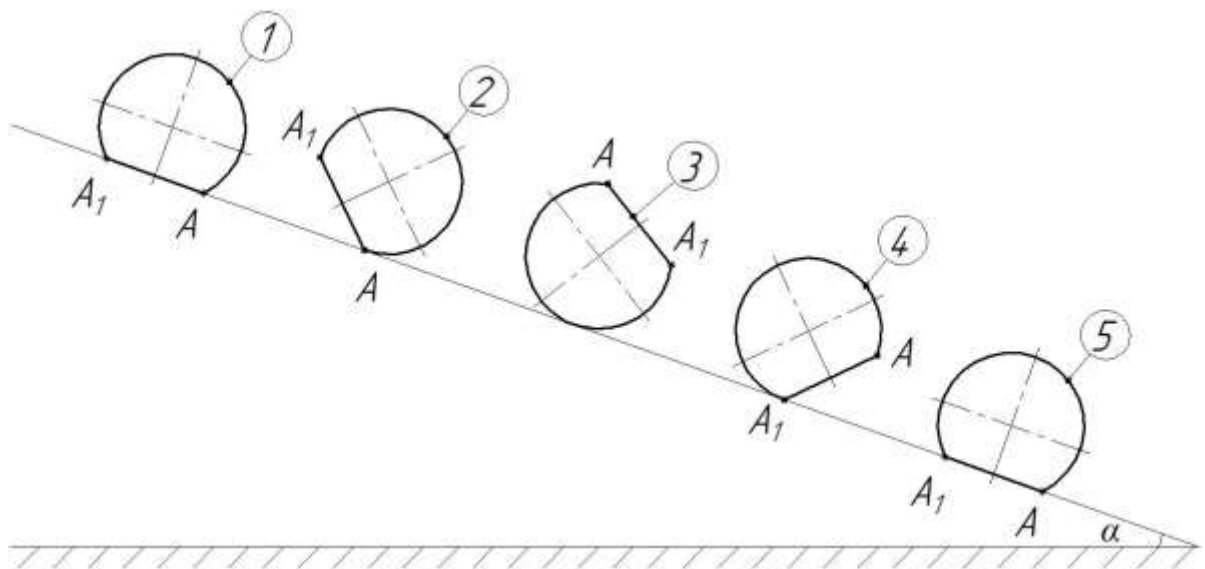


Рисунок 2.13 – Стадии движения обрезанного цилиндра по наклонной плоскости

Каждая из стадий 2-4 займет некоторое время. Сумма этих времен и даст полное время одного полного оборота обрезанного цилиндра.

Прежде, чем перейти к исследованию указанных выше стадий, найдем моменты инерции относительно тех осей вращения, которые соответствуют позициям 2-4.

### Определение моментов инерции обрезанного цилиндра

Найдем момент инерции обрезанного цилиндра относительно его центра – точки  $O$ . Именно он и будет нужен при рассмотрении стадии 3 качения цилиндра по дуге, поскольку на этой стадии цилиндр вращается вокруг своего центра. Обозначим его  $J_O$ .

Рассмотрим рисунок 2.8. Согласно своему определению [256]

$$J_O = \rho \iint_S r^2 dx dy, \quad (2.77)$$

где  $r^2 = x^2 + (y-b)^2$  – квадрат расстояния от точек  $(x; y)$  цилиндра до его центра – точки  $O$ ,  $m^2$ ;

$\rho$  – поверхностная плотность материала цилиндра,  $кг/м^2$ ;

$S$  – пластина, представляющая собой сечение цилиндра.

Разобьем область интегрирования  $S$  на две части:  $S_{\cap}$  и  $S_{\Delta}$ . Тогда

$$J_O = \rho \iint_{S_{\cap}} [x^2 + (y-b)^2] dx dy + \rho \iint_{S_{\Delta}} [x^2 + (y-b)^2] dx dy. \quad (2.78)$$

В первом из этих интегралов сделаем замену (см. формулу (2.62)):

$$x = x'; \quad y = y' + b; \quad dx = dx'; \quad dy = dy'.$$

Перейдя к полярным координатам

$$0 \leq r \leq R; \quad -\frac{\pi}{2} + \beta \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{2} - \beta,$$

получим

$$\rho \iint_{S_{\cap}} [(x')^2 + (y')^2] dx' dy' = \rho \iint_{S_{\cap}} [r^2 \cdot r dr d\varphi] = \rho \int_{-\frac{\pi}{2} + \beta}^{\frac{3\pi}{2} - \beta} d\varphi \int_0^R r^3 dr = \rho(\pi - \beta) \cdot \frac{R^4}{2}. \quad (2.79)$$

Вычислим второй интеграл (2.78)

$$\begin{aligned}
\rho \iint_{S_{\Delta}} [x^2 + (y-b)^2] dx dy &= |см. (2.69)| = \rho \int_0^b dy \int_{(y-b) \cdot \operatorname{tg} \beta}^{(b-y) \cdot \operatorname{tg} \beta} [x^2 + (y-b)^2] dx = \\
&= \rho \int_0^b dy \left[ \frac{x^3}{3} \Big|_{(y-b) \cdot \operatorname{tg} \beta}^{(b-y) \cdot \operatorname{tg} \beta} + (y-b)^2 \cdot x \Big|_{(y-b) \cdot \operatorname{tg} \beta}^{(b-y) \cdot \operatorname{tg} \beta} \right] = \\
&= \rho \int_0^b dy \left\{ \frac{\operatorname{tg}^3 \beta}{3} [(b-y)^3 - (y-b)^3] + (y-b)^2 \cdot \operatorname{tg} \beta [(b-y) - (y-b)] \right\} = \quad (2.80) \\
&= \rho \int_0^b dy \left[ \frac{2}{3} \operatorname{tg}^3 \beta \cdot (b-y)^3 + 2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot (b-y)^3 \right] = 2 \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} \beta \left( \frac{1}{3} \operatorname{tg}^2 \beta + 1 \right) \int_0^b (b-y)^3 dy = \\
&= 2 \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} \beta \left( \frac{1}{3} \operatorname{tg}^2 \beta + 1 \right) \cdot \frac{b^4}{4} = \frac{1}{2} \rho \cdot b^4 \cdot \operatorname{tg} \beta \left( \frac{1}{3} \operatorname{tg}^2 \beta + 1 \right).
\end{aligned}$$

Так как  $b=R \cdot \cos \beta$  (см. формулу (2.57)), то получаем окончательно:

$$\rho \iint_{S_{\Delta}} [x^2 + (y-b)^2] dx dy = \rho \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot \left( \frac{1}{3} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \right) \cdot \frac{R^4}{2}. \quad (2.81)$$

На основании (2.79) и (2.81) получим, согласно (2.78):

$$J_O = \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot \left[ \pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta \left( \frac{1}{3} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \right) \right], \quad (2.82)$$

где  $R$  – радиус обрезанного цилиндра,  $m$ .

Используя теорему Гюйгенса-Штейнера, найдем  $J_C$  – момент инерции поперечного сечения цилиндра относительно точки  $C$  – его центра тяжести:

$$J_C = J_O - \rho \cdot S \cdot (b_1 - b)^2, \quad (2.83)$$

где  $J_O$  – момент инерции обрезанного цилиндра относительно точки  $O$ ,  $кг \cdot м^2$ ;

$\rho$  – поверхностная плотность материала цилиндра,  $кг/м^2$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения обрезанного цилиндра,  $м^2$ .

И по этой же теореме Гюйгенса-Штейнера можем записать моменты инерции цилиндра относительно точек  $A$  и  $A_1$ :

$$J_A = J_{A_1} = J_C + \rho \cdot S \cdot (AC)^2 = J_O - \rho \cdot S \cdot (b_1 - b)^2 + \rho \cdot S \cdot (AC)^2. \quad (2.84)$$

По теореме косинусов, примененной к треугольнику  $\Delta AOC$ , имеем:

$$\begin{aligned}
AC^2 &= AO^2 + OC^2 - 2 \cdot AO \cdot OC \cdot \cos(\pi - \beta) = \\
&= R^2 + (b_1 - b)^2 + 2 \cdot R \cdot (b_1 - b) \cdot \cos \beta.
\end{aligned} \quad (2.85)$$



Поэтому, на основании (2.84) и (2.85), получаем:

$$J_A = J_{A_1} = J_o + \rho \cdot S \cdot R \cdot [R + 2(b_1 - b) \cdot \cos \beta]. \quad (2.86)$$

Или, используя (2.82), (2.73) и (2.60) получим окончательно:

$$J_A = J_{A_1} = \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot [3(\pi - \beta) + \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot (3 + 2 \cdot \sin^2 \beta)]. \quad (2.87)$$

Теперь, имея моменты инерции относительно всех интересующих нас осей вращения цилиндра, можем приступить к исследованию стадий вращения 2, 3 и 4 (рис. 2.13).

### Вращение обрезанного цилиндра вокруг угловой точки $A$ (стадия 2)

На рисунке 2.14 изображен обрезанный цилиндр, повернутый на некоторый угол  $\varphi$  относительно угловой точки  $A$ . Это – единственная точка, в которой поперечное сечение цилиндра соприкасается с наклонной плоскостью, поэтому этот угол находится в пределах  $0 \leq \varphi \leq \beta$ .

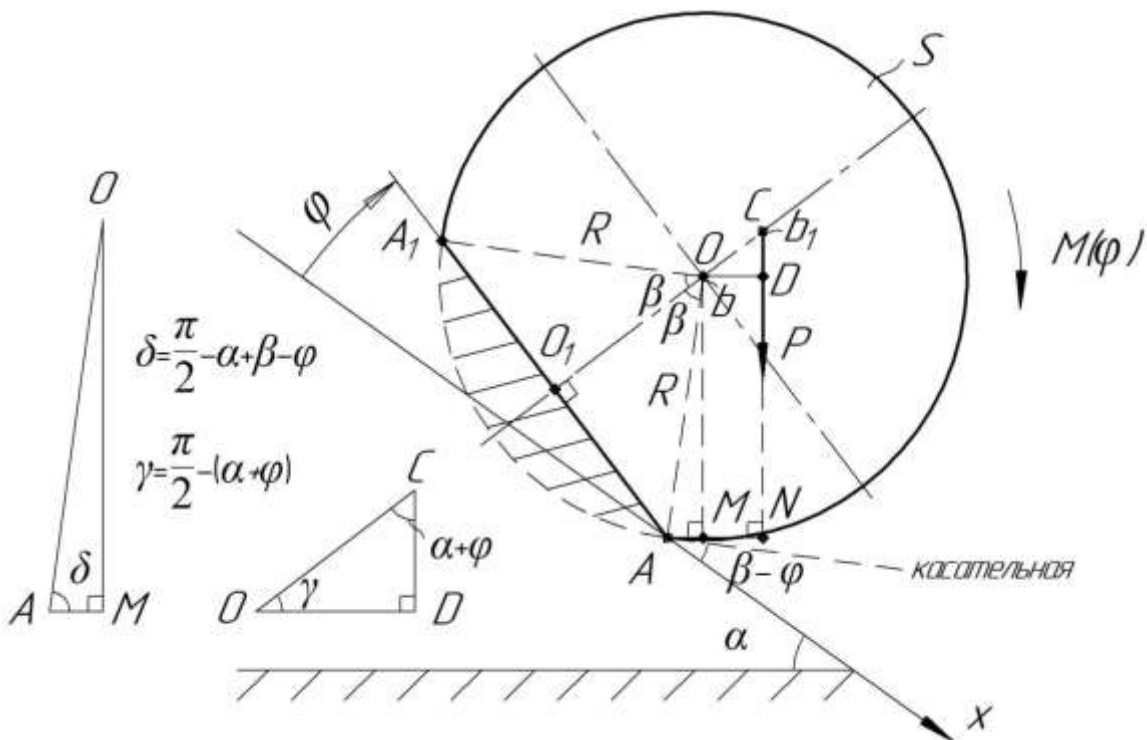


Рисунок 2.14 – Вращение обрезанного цилиндра вокруг угловой точки  $A$

Вращение цилиндра вокруг точки  $A$  создает только его вес

$$P = m \cdot g = \rho \cdot S \cdot g = \rho \cdot g \cdot R^2 \cdot (\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta), \quad (2.88)$$

где  $m$  – масса цилиндра, кг;

$g=9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho$  – поверхностная плотность материала цилиндра, кг/м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения обрезанного цилиндра, м<sup>2</sup>;

$\beta$  – центральный угол обрезанного цилиндра, рад.

Плечо  $AN$  силы  $P$ , как показывает анализ рисунка 2.14, равно

$$AN = MN + AM = (b_1 - b) \cdot \sin(\alpha + \varphi) + R \cdot \sin(\alpha - \beta + \varphi). \quad (2.89)$$

Поэтому вес  $P$  цилиндра создает относительно точки  $A$  вращающий  
МОМЕНТ

$$M(\varphi) = P \cdot AN = \rho \cdot g \cdot R^2 \cdot (\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) \cdot \left[ \frac{2}{3} R \cdot \frac{\sin^3 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} \cdot \sin(\alpha + \varphi) + R \cdot \sin(\alpha - \beta + \varphi) \right]. \quad (2.90)$$

То есть

$$M(\varphi) = \rho \cdot g \cdot R^3 \cdot \left[ \frac{2}{3} \sin^3 \beta \cdot \sin(\alpha + \varphi) + (\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) \cdot \sin(\alpha - \beta + \varphi) \right]. \quad (2.91)$$

По второму закону Ньютона для вращательного движения получаем:

$$J_A \cdot \varphi''(t) = M(\varphi), \quad (2.92)$$

где  $J_A$  – момент инерции обрезанного цилиндра относительно точки  $A$ , выражающийся формулой (2.87), кг·м<sup>2</sup>;

$\varphi''(t)$  – угловое ускорение обрезанного цилиндра, с<sup>-2</sup>.

Таким образом, получаем следующее дифференциальное уравнение второго порядка относительно угла  $\varphi = \varphi(t)$  поворота цилиндра относительно угловой точки  $A$ :

$$\varphi'' = \frac{2 \cdot g}{R} \cdot \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \sin(\alpha + \varphi) + \frac{M_2}{M_3} \cdot \sin(\alpha - \beta + \varphi) \right], \quad (0 \leq \varphi \leq \beta). \quad (2.93)$$

Здесь

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{2}{3} \sin^3 \beta; \quad M_2 = \pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta; \\ M_3 &= 3(\pi - \beta) + \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot (3 + 2 \sin^2 \beta). \end{aligned} \quad (2.94)$$

Дифференциальное уравнение (2.93) следует дополнить начальными условиями для начального момента времени  $t = 0$ :

$$\varphi(0) = 0; \quad \varphi'(0) = 0. \quad (2.95)$$

Уравнение (2.93) вместе с начальными условиями составляют задачу Коши. Ее следует рассматривать для  $0 \leq \varphi \leq \beta$ , поскольку при  $\varphi = \beta$  уже начинается стадия 3 – качения цилиндра по его дуге.

Наша задача – найти время  $t_2$ , за которое цилиндр закончит стадию 2, то есть повернется на угол  $\varphi = \beta$ , начиная с угла  $\varphi = 0$ .

Рассмотрим дифференциальное уравнение (2.93). Понизим его порядок со второго до первого. Для этого введем новую неизвестную функцию  $z=z(\varphi)$ :

$$\varphi' = \frac{d\varphi}{dt} = z(\varphi).$$

Тогда

$$\varphi'' = (\varphi')' = z' = \frac{dz}{dt} = \frac{dz}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = z \frac{dz}{d\varphi}. \quad (2.96)$$

Тогда уравнение (2.93) примет вид:

$$\begin{aligned} z \frac{dz}{d\varphi} &= \frac{2 \cdot g}{R} \cdot \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \sin(\alpha + \varphi) + \frac{M_2}{M_3} \cdot \sin(\alpha - \beta + \varphi) \right]; \\ z dz &= \frac{2 \cdot g}{R} \cdot \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \sin(\alpha + \varphi) + \frac{M_2}{M_3} \cdot \sin(\alpha - \beta + \varphi) \right] d\varphi; \\ \int z dz &= \frac{2 \cdot g}{R} \cdot \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \sin(\alpha + \varphi) + \frac{M_2}{M_3} \cdot \sin(\alpha - \beta + \varphi) \right] d\varphi; \\ \frac{z^2}{2} &= \frac{2 \cdot g}{R} \int \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \sin(\alpha + \varphi) + \frac{M_2}{M_3} \cdot \sin(\alpha - \beta + \varphi) \right] d\varphi; \\ \frac{z^2}{2} &= -\frac{2 \cdot g}{R} \cdot \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \cos(\alpha + \varphi) + \frac{M_2}{M_3} \cdot \cos(\alpha - \beta + \varphi) \right] + C_1; \\ (\varphi')^2 &= -\frac{4 \cdot g}{R} \cdot \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \cos(\alpha + \varphi) + \frac{M_2}{M_3} \cdot \cos(\alpha - \beta + \varphi) \right] + C_1. \end{aligned} \quad (2.97)$$

Используя начальные условия (2.95), найдем неопределенную константу интегрирования:

$$0 = -\frac{4 \cdot g}{R} \cdot \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \cos \alpha + \frac{M_2}{M_3} \cdot \cos(\alpha - \beta) \right] + C_1; \Rightarrow$$

$$C_1 = \frac{4 \cdot g}{R} \cdot \left[ \frac{M_1}{M_3} \cdot \cos \alpha + \frac{M_2}{M_3} \cdot \cos(\alpha - \beta) \right]. \quad (2.98)$$

С учетом (2.98) уравнение (2.97) примет вид:

$$(\varphi')^2 = \frac{4 \cdot g}{R} \left\{ \frac{M_1}{M_3} \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \varphi)] + \frac{M_2}{M_3} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta + \varphi)] \right\}. \quad (2.99)$$

Отсюда

$$\varphi' = \frac{d\varphi}{dt} = 2 \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \varphi)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta + \varphi)]}; \quad (2.100)$$

$$dt = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot \frac{d\varphi}{\sqrt{\frac{M_1}{M_3} \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \varphi)] + \frac{M_2}{M_3} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta + \varphi)]}}. \quad (2.101)$$

Интегрируя обе части равенства (2.100), получим искомое время  $t_2$ :

$$t_2 = \int_0^{t_2} dt = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot \int_0^{\beta} f(\varphi) d\varphi. \quad (2.102)$$

Здесь

$$f(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{\frac{M_1}{M_3} \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \varphi)] + \frac{M_2}{M_3} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta + \varphi)]}}. \quad (2.103)$$

Интеграл (2.102) следует найти численно, что никакой проблемы составить не должно.

Чтобы завершить рассмотрение стадии 2, отметим, что при  $t = t_2$  будем иметь

$$\varphi(t_2) = \beta; \quad (2.104)$$

$$\varphi'(t_2) = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]}. \quad (2.105)$$

Значения  $\varphi(t_2)$  и  $\varphi'(t_2)$  будут начальными условиями для следующего этапа работы – для стадии 3.

Решим эту же задачу посредством энергетического подхода. Для этого рассмотрим рисунок 2.15.

Начальная высота центра тяжести обрезанного цилиндра (точка  $b_1$ ) над горизонтальной прямой  $LL_1$ , проходящей через точку вращения  $A$  (рис. 2.15) равна

$$h_{нач} = h_1 + h_2, \quad (2.106)$$

где  $h_1$  – расстояние между точкой вращения цилиндра  $A$  и центром тяжести круглого цилиндра  $O$ , взятое в вертикальной плоскости,  $м$ ;

$h_2$  – расстояние между центром тяжести круглого и обрезанного цилиндра (между точками  $b_1$  и  $b$ ), взятое в вертикальной плоскости,  $м$ .

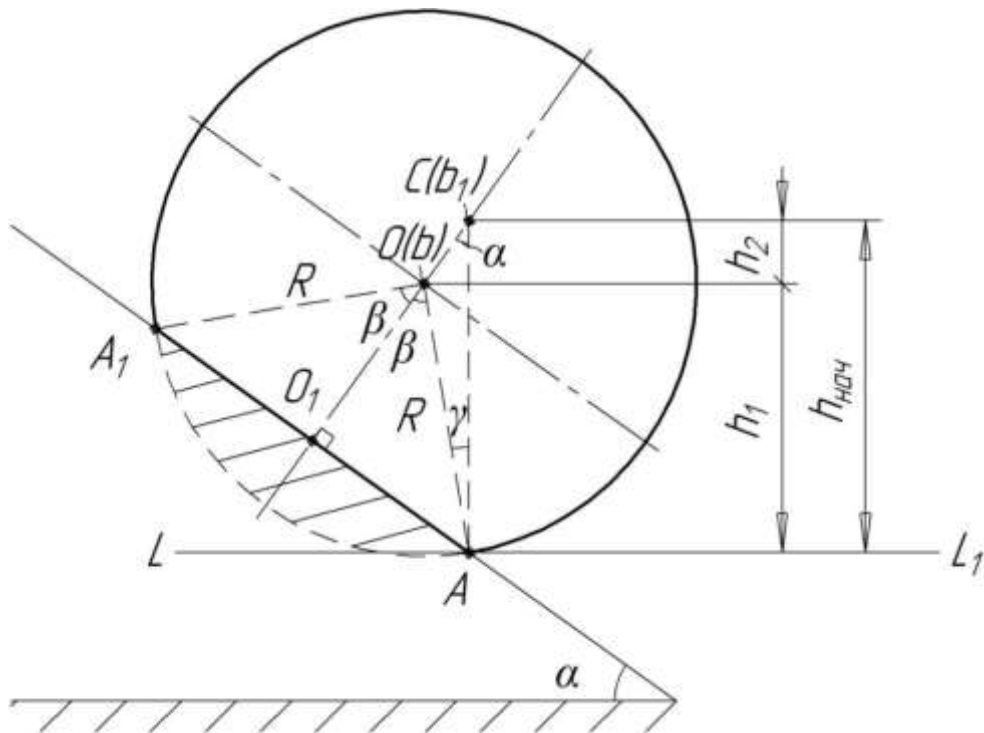


Рисунок 2.15 – Начальная стадия вращения обрезанного цилиндра вокруг точки  $A$

Указанные величины определим следующим образом

$$h_1 = R \cdot \cos \gamma = R \cdot \cos(\beta - \alpha); \quad h_2 = (b_1 - b) \cdot \cos \alpha, \quad (2.107)$$

где  $R$  – радиус цилиндра,  $м$ ;

$\alpha$  – угол наклона плоскости раздела вороха к горизонту,  $рад$ ;

$\beta$  – центральный угол обрезанного цилиндра,  $рад$ .

С учетом подстановки уравнение (2.106) примет вид

$$h_{нач} = h_1 + h_2 = R \cdot \cos(\beta - \alpha) + (b_1 - b) \cdot \cos \alpha. \quad (2.108)$$

Теперь представим рисунок 2.16, на котором изображен обрезанный цилиндр в момент времени  $t_2$ , когда цилиндр закончит свое вращение вокруг точки  $A$  и начнет свое качение.

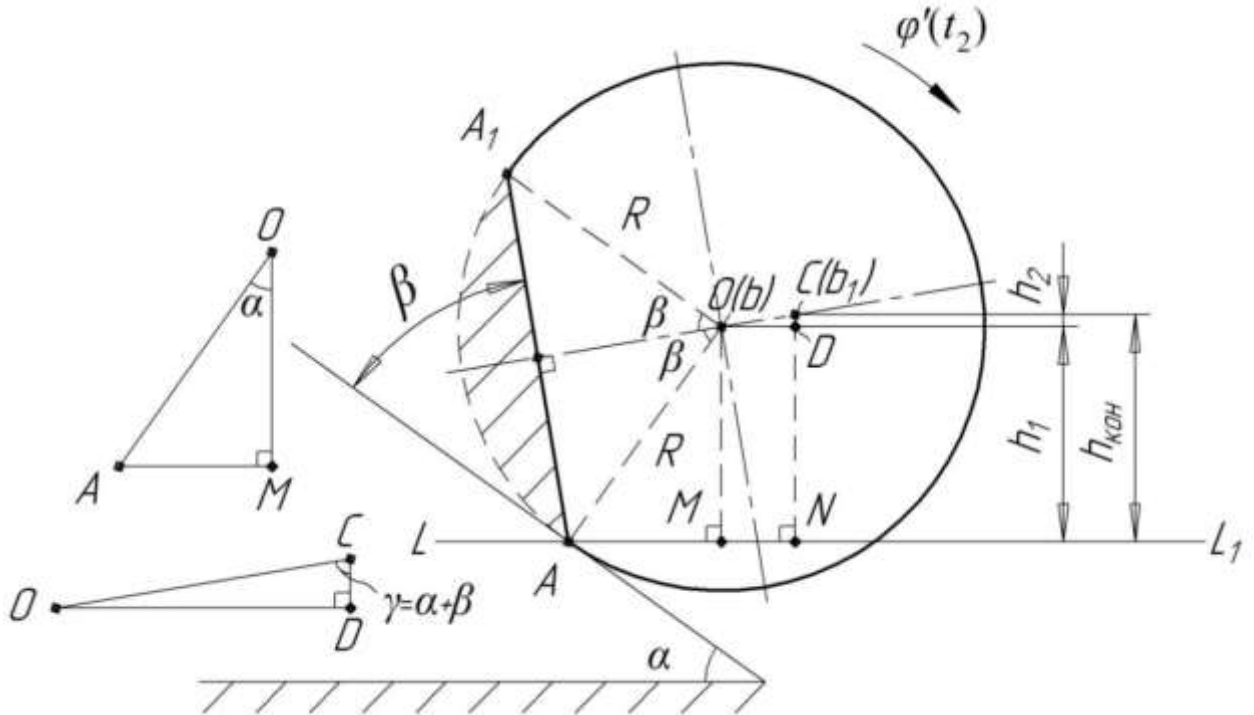


Рисунок 2.16 – Заключительная стадия вращения обрезанного цилиндра вокруг точки  $A$

Конечную высоту центра тяжести цилиндра (точка  $b_1$ ) над горизонтальной прямой  $LL_1$ , проходящей через точку вращения  $A$  определим как (рис. 2.16)

$$h_{кон} = h_1 + h_2. \quad (2.109)$$

Согласно рисунку 2.16

$$h_1 = R \cdot \cos \alpha; \quad h_2 = (b_1 - b) \cdot \cos(\alpha + \beta). \quad (2.110)$$

Таким образом

$$h_{кон} = h_1 + h_2 = R \cdot \cos \alpha + (b_1 - b) \cdot \cos(\alpha + \beta). \quad (2.111)$$

Согласно (2.108) и (2.111), высота точки  $b_1$  над горизонталью  $LL_1$  уменьшилась на величину (рис. 2.17)

$$\Delta h_1 = h_{нач} - h_{кон} = R \cdot [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha] + (b_1 - b) \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)]. \quad (2.112)$$

Следовательно, потенциальная энергия  $\Pi$  цилиндра уменьшилась на величину [159]

$$\Delta \Pi = m \cdot g \cdot \Delta h_1, \quad (2.113)$$

где  $m$  – масса цилиндра, кг;

$g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\Delta h_1$  – изменение высоты центра тяжести обрезанного цилиндра, м.

Масса цилиндра

$$m = \rho \cdot S = \rho \cdot (\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) \cdot R^2 = \rho \cdot R^2 \cdot M_2. \quad (2.114)$$

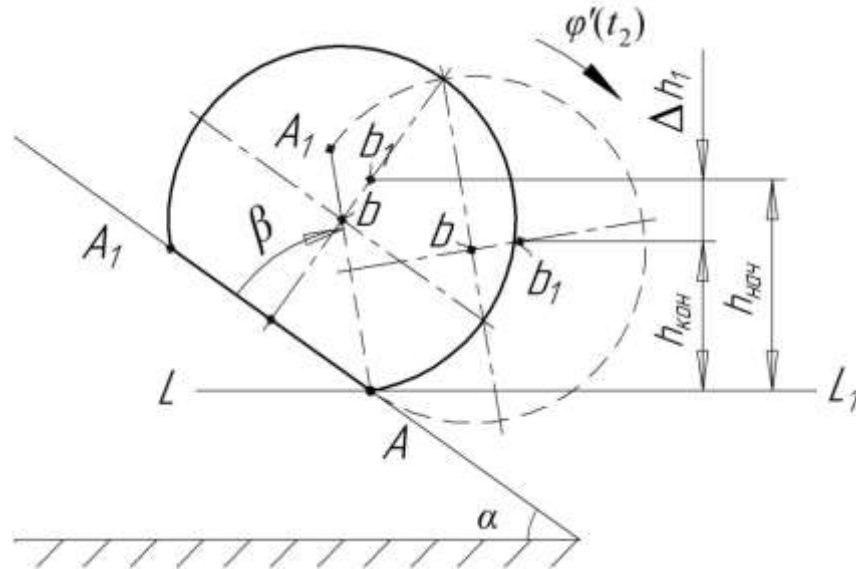


Рисунок 2.17 – К определению потенциальной энергии обрезанного цилиндра при его вращении вокруг точки  $A$

Согласно закону сохранения энергии, настолько же увеличилась кинетическая энергия  $E$  вращения цилиндра вокруг точки  $A$

$$\Delta E = E_{кон} = \frac{J_A \cdot (\varphi'(t_2))^2}{2}, \quad (2.115)$$

где  $J_A$  – момент инерции обрезанного цилиндра вокруг точки  $A$  (см. формулу 2.87),  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\varphi'(t_2)$  – угловая скорость вращения цилиндра в момент времени  $t_2$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

Учтем, что

$$b_1 - b = \frac{2}{3} \cdot R \cdot \frac{\sin^3 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} = R \cdot \frac{M_1}{M_2}. \quad (2.116)$$

Тогда

$$\Delta\Pi = m \cdot g \cdot \Delta h_1 = \rho \cdot g \cdot R^3 \{M_2 [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha] + M_1 [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)]\}; \quad (2.117)$$

$$\Delta E = \frac{\rho \cdot R^4}{4} \cdot M_3 \cdot (\varphi'(t_2))^2. \quad (2.118)$$

Так как  $\Delta\Pi = \Delta E$ , то

$$(\varphi'(t_2))^2 = \frac{4 \cdot g}{R} \left\{ \frac{M_2}{M_3} [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha] + \frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] \right\}. \quad (2.119)$$

Тогда окончательно получаем

$$\varphi'(t_2) = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_2}{M_3} [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha] + \frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)]}. \quad (2.120)$$

Теперь найдем время  $t_2$  вращения обрезанного цилиндра вокруг точки  $A$ . Начальными условиями для этой стадии являются следующие данные:

$$\varphi(0) = 0; \quad \varphi'(0) = 0. \quad (2.121)$$

К моменту  $t_2$  цилиндр повернется вокруг точки  $A$  на угол  $\beta$  (с  $\varphi=0$  по  $\beta$ ), то

$$t_2 = \frac{\beta}{\frac{\varphi'(0) + \varphi'(t_2)}{2}} = \frac{2 \cdot \beta}{\varphi'(0) + \varphi'(t_2)}. \quad (2.122)$$

Чтобы завершить рассмотрение стадии 2, отметим, что при  $t=t_2$

$$\varphi(t_2) = \beta; \quad (2.123)$$

$$\varphi'(t_2) = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_2}{M_3} [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha] + \frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)]}. \quad (2.124)$$

Значения  $\varphi(t_2)$  и  $\varphi'(t_2)$  будут начальными условиями при применении энергетического подхода для следующего этапа работы – для стадии 3.

### Качение обрезанного цилиндра по его круговой дуге (стадия 3)

Рассмотрим вращение цилиндра вокруг точки  $O$  под действием момента инерции  $J_O$ , определяемый по выражению (2.83). Вес цилиндра  $P$  прило-



жен в центре масс  $C(0; b_1)$ , не совпадающем с точкой  $O(0; b)$ . И он будет создавать вращающий момент вокруг точки  $O$ .

Но этот момент в разных положениях вращающегося цилиндра имеет разное направление. Для подтверждения этого рассмотрим рисунок 2.18.

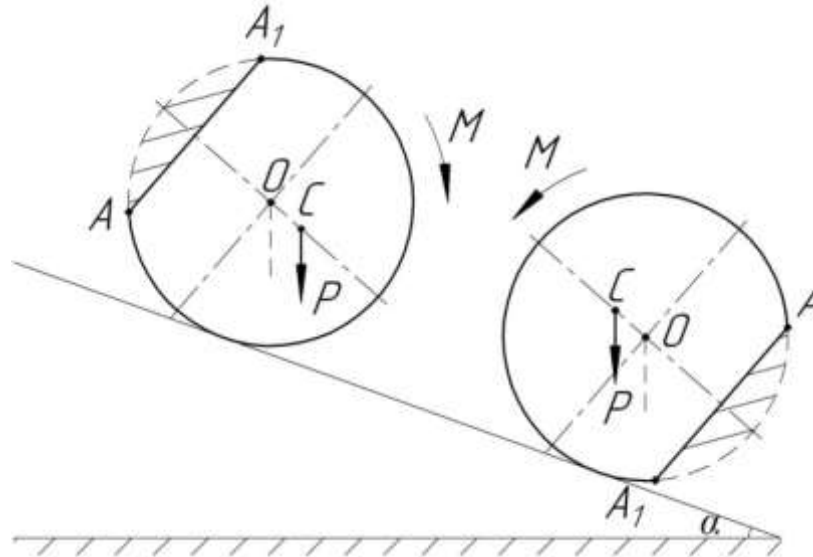


Рисунок 2.18 – Качение обрезанного цилиндра по его круговой дуге

Здесь изображены два симметричных положения цилиндра. Но в одном из них момент  $M$  веса  $P$  относительно точки  $O$  направлен по часовой стрелки, а в другом против часовой стрелки. И эти моменты одинаковы по величине. Поэтому результирующее вращающее действие на цилиндр этих моментов равно нулю. И так для любых двух симметричных позиций цилиндра. Значит, и общее вращающее действие веса на цилиндр отсутствует. Но в таком случае мы можем поместить вес  $P$  в центр цилиндра.

Рассмотрим, с учетом вышесказанного, рисунок 2.19.

Запишем второй закон Ньютона для этого цилиндра, отнеся все силы, приложенные к нему, к его центру – точке  $O$ :

$$m\vec{g} + \vec{F}_{mp} + \vec{N} = m\vec{a}, \quad (2.125)$$

где  $m$  – масса цилиндра, кг;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$F_{mp}$  – сила трения, Н;

$N$  – сила нормального давления,  $H$ ;

$\vec{a}$  – ускорение центра  $O$ ,  $m/c^2$ .

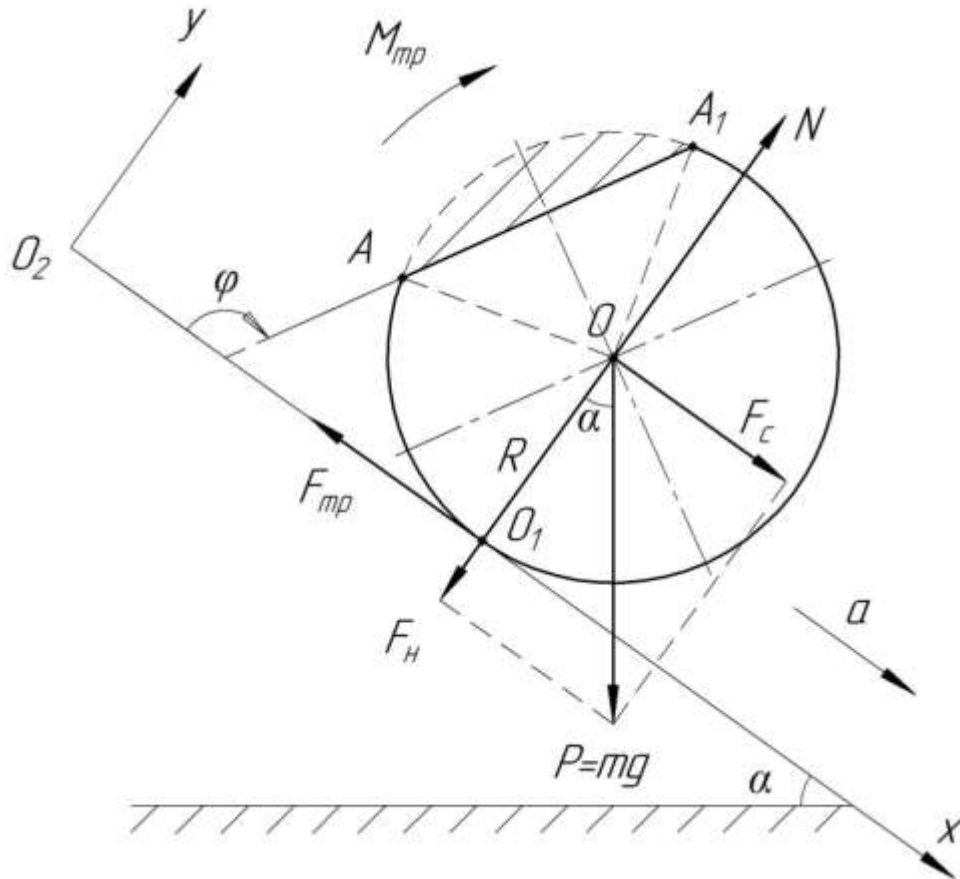


Рисунок 2.19 – Силы, действующие на обрубанный цилиндр при его качении по наклонной плоскости

В проекциях на оси  $O_2x$  и  $O_2y$  векторное равенство (2.125) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} mg \cdot \sin \alpha - F_{mp} &= ma; \\ -mg \cdot \cos \alpha + N &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.126)$$

Согласно рисунку 2.19, единственная сила, которая заставляет вращаться цилиндр, это сила  $F_{mp}$ . Она создает вращающий момент

$$M_{mp} = F_{mp} \cdot R, \quad (2.127)$$

где  $R$  – радиус цилиндра,  $m$ .

Запишем второй закон Ньютона для вращения цилиндра:

$$J_O \cdot \varphi'' = M_{mp}; \quad (2.128)$$

или

$$\frac{\rho \cdot R^3}{2} \cdot \left[ \pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta \left( \frac{1}{3} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \right) \right] \cdot R \varphi'' = F_{mp} \cdot R. \quad (2.129)$$

Если цилиндр катится без проскальзывания, то  $R\varphi''=a$ , и тогда получаем:

$$\frac{\rho \cdot R^2}{2} \cdot \left[ \pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta \left( \frac{1}{3} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \right) \right] \cdot a = F_{mp}. \quad (2.130)$$

Подставим полученное выражение (2.130) для  $F_{mp}$  в первое уравнение (2.126), учтя при этом, что масса  $m$  сечения цилиндра определяется по формуле (2.114), получим

$$\rho \cdot g \cdot R^2 \cdot \sin \alpha \cdot (\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) - \frac{\rho \cdot R^2}{2} \cdot \left[ \pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot \left( \frac{1}{3} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \right) \right] \cdot a = \rho \cdot R^2 (\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) \cdot a. \quad (2.131)$$

Отсюда

$$a = R\varphi'' = \frac{(\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) \cdot \sin \alpha}{\frac{3(\pi - \beta)}{2} + \cos \beta \cdot \sin \beta \left( 1 + \frac{1}{6} \sin^2 \beta + \frac{1}{2} \cos^2 \beta \right)} \cdot g. \quad (2.132)$$

Это – дифференциальное уравнение для угла  $\varphi = \varphi(t)$  поворота цилиндра в стадии 3. Эта стадия начинается с  $\varphi = \beta$  и заканчивается стадией при  $\varphi = 2\pi - \beta$ , поскольку с угла  $\varphi = 2\pi - \beta$  начинается стадия 4 – стадия вращения цилиндра вокруг его угловой точки  $A_1$  (см. рисунок 2.13).

Дифференциальное уравнение (2.132) следует дополнить двумя начальными условиями (2.104) и (2.105), являющимися конечными для стадии 2.

Решим уравнение (2.132). Но предварительно введем обозначение:

$$M_4 = \frac{(\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta) \cdot \sin \alpha}{\frac{3(\pi - \beta)}{2} + \cos \beta \cdot \sin \beta \left( 1 + \frac{1}{6} \sin^2 \beta + \frac{1}{2} \cos^2 \beta \right)}. \quad (2.133)$$

Тогда уравнение (2.132) примет вид:

$$\varphi'' = \frac{g}{R} \cdot M_4 \quad (\beta \leq \varphi \leq 2\pi - \beta). \quad (2.134)$$

Интегрируя (2.134), получаем

$$\varphi' = \frac{g}{R} \cdot M_4 t + C_1. \quad (2.135)$$

Используя начальное условие (2.105), находим константу интегрирования  $C_1$ :

$$C_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]} - \frac{g}{R} \cdot M_4 \cdot t_2. \quad (2.136)$$

С учетом (2.136) выражение (2.135) примет вид (при  $t \geq t_2$ ):

$$\varphi' = \frac{g}{R} \cdot M_4 (t - t_2) + 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]}. \quad (2.137)$$

Проинтегрируем теперь (2.137):

$$\varphi = \frac{g}{R} M_4 \frac{(t - t_2)^2}{2} + 2 \sqrt{\frac{g}{R}} \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]} \cdot t + C_2. \quad (2.138)$$

Константу  $C_2$  найдем из условия (2.104):

$$\beta = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]} \cdot t_2 + C_2 \Rightarrow$$

$$C_2 = \beta - 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]} \cdot t_2. \quad (2.139)$$

С учетом (2.139) выражение (2.138) примет вид ( $t_2 \leq t \leq t_3$ ):

$$\begin{aligned} \varphi = & \frac{g}{R} \cdot M_4 \cdot \frac{(t - t_2)^2}{2} + \\ & + 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]} \cdot (t - t_2) + \beta. \end{aligned} \quad (2.140)$$

Выражение (2.140) имеет место с момента времени  $t_2$ , когда начинается стадия 3, и до момента  $t_3$ , когда она заканчивается. Так как она заканчивается при угле  $\varphi = 2\pi - \beta$ , то получаем следующее уравнение для  $t_3$ :

$$\begin{aligned} & \frac{g}{R} \cdot M_4 \cdot \frac{(t_3 - t_2)^2}{2} + 2 \sqrt{\frac{g}{R}} \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]} \cdot \\ & \cdot (t_3 - t_2) - (2\pi - 2\beta) = 0. \end{aligned} \quad (2.141)$$

Это – квадратное уравнение для разности времен  $t_3 - t_2$  с положительным дискриминантом. Определяя его положительный корень, найдем  $t_3 - t_2$ . Это и будет время, в течение которого цилиндр будет находиться в стадии 3.

Выпишем указанный положительный корень квадратного уравнения (2.141) в явном виде. Для этого введем обозначение:

$$M_5 = \sqrt{\frac{M_1}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_2}{M_3} [\cos(\alpha - \beta) - \cos \alpha]}. \quad (2.142)$$

Тогда уравнение (2.141) примет вид:

$$\frac{g}{2 \cdot R} \cdot M_4 \cdot (t_3 - t_2)^2 + 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot M_5 \cdot (t_3 - t_2) - 2 \cdot (\pi - \beta) = 0. \quad (2.143)$$

Его положительный корень имеет вид:

$$t_3 - t_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot \frac{\sqrt{M_5^2 + M_4 \cdot (\pi - \beta)} - M_5}{M_4}. \quad (2.144)$$

В завершении исследования стадии 3 отметим, что при  $t = t_3$  (конец стадии 3) будем иметь:

$$\varphi(t_3) = 2\pi - \beta. \quad (2.145)$$

$$\varphi'(t_3) = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{M_5^2 + M_4 \cdot (\pi - \beta)}. \quad (2.146)$$

Последнее выражение следует из (2.137), (2.142) и (2.144). Эти конечные результаты для стадии 3 будут начальными для заключительной, четвертой стадии движения цилиндра (рис. 2.13), когда он, совершив вращение вокруг угловой точки  $A_1$ , упадет своей плоской гранью на наклонную плоскость.

Рассмотрим теперь данную стадию посредством энергетического подхода. Эта стадия начинается с  $\varphi = \beta$  и заканчивается стадией при  $\varphi = 2\pi - \beta$ , поскольку с угла  $\varphi = 2\pi - \beta$  начинается стадия 4 – стадия вращения цилиндра вокруг его угловой точки  $A_1$  (см. рисунок 2.20).

За время  $t_3 - t_2$  центр тяжести цилиндра пройдет путь  $L_2$ , равный длине дуге обрешанной окружности с центральным углом  $2 \cdot \pi - 2 \cdot \beta$

$$L_2 = \frac{\pi \cdot R \cdot (2 \cdot \pi - 2 \cdot \beta)}{180}. \quad (2.147)$$

Таким образом, высота точки  $b_1$  уменьшится на величину (рис. 2.20)

$$\Delta h_2 = L_2 \cdot \sin \alpha. \quad (2.148)$$

Потенциальная энергия  $\Pi$  цилиндра снизится на величину [159]

$$\Delta\Pi = m \cdot g \cdot \Delta h_2, \quad (2.149)$$

где  $m$  – масса цилиндра (2.114), кг;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\Delta h_2$  – изменение высоты центра тяжести зерна, м.

С учетом подстановки (2.114) и (2.148), уравнение (2.149) примет вид

$$\Delta\Pi = \rho \cdot R^2 \cdot M_2 \cdot L_2 \cdot \sin \alpha, \quad (2.150)$$

где  $\rho$  – поверхностная плотность материала цилиндра, кг/м<sup>2</sup>;

$R$  – радиус цилиндра, м;

$\alpha$  – угол наклона плоскости раздела вороха к горизонту, рад.

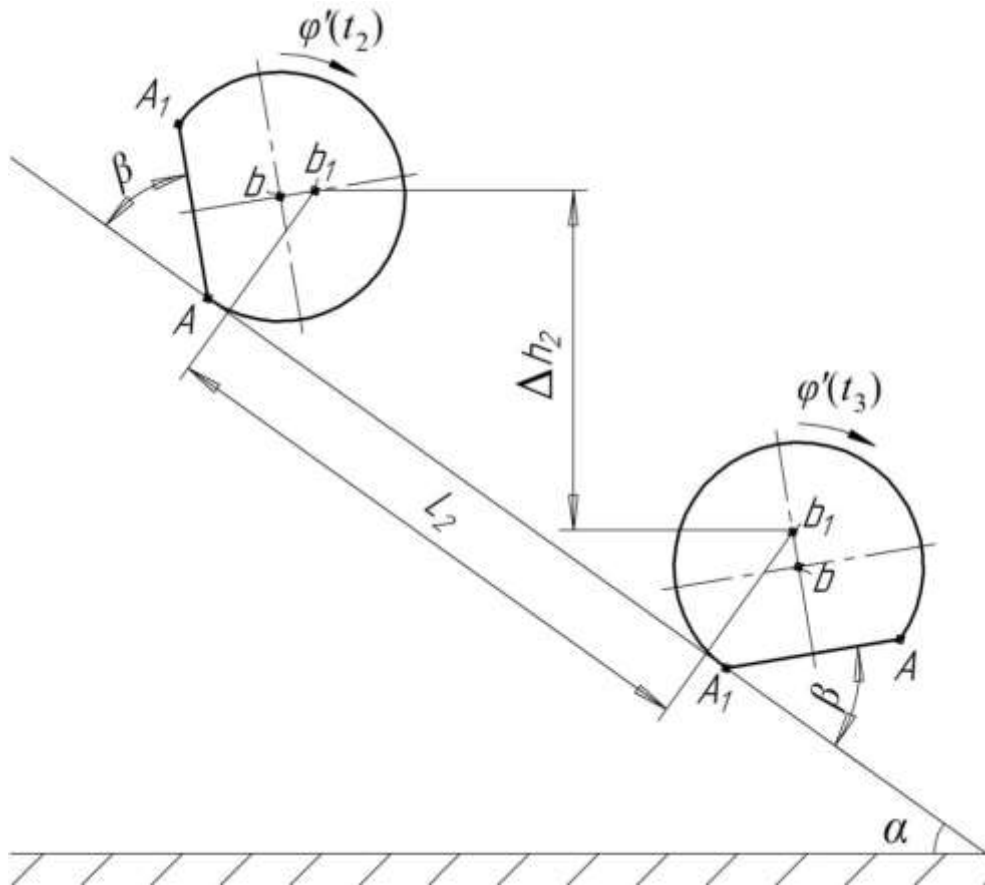


Рисунок 2.20 – К определению потенциальной энергии обрезанного цилиндра при его качении по наклонной плоскости

Поскольку тело совершает сложное движение: вращаясь, поступательно перемещается по наклонной поверхности, то полная кинетическая энергия

цилиндра равна сумме кинетической энергии в поступательном движении и энергии вращения вокруг оси центра масс. Следовательно, кинетическая энергия от сложного движения увеличится

$$\Delta E = \left( \frac{m \cdot v_3^2}{2} + \frac{J_O \cdot (\varphi'(t_3))^2}{2} \right) - \left( \frac{m \cdot v_2^2}{2} + \frac{J_O \cdot (\varphi'(t_2))^2}{2} \right), \quad (2.151)$$

где  $J_O$  – момент инерции цилиндра проходящий через его центр масс (точку  $O$ ),  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\varphi'(t_2)$  – угловая скорость цилиндра в момент времени  $t_2$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\varphi'(t_3)$  – угловая скорость цилиндра в момент времени  $t_3$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

Момент инерции цилиндра, проходящий через его центр масс равен

$$J_O = \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot \left[ \pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta \left( \frac{1}{3} \sin^2 \beta + \cos^2 \beta \right) \right] = \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot M_6. \quad (2.152)$$

Преобразуем выражение (2.151), с учетом того что

$$v = \varphi' \cdot R. \quad (2.153)$$

где  $\varphi'$  – угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ .

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta E &= \left( \frac{m \cdot (\varphi'(t_3))^2 \cdot R^2}{2} + \frac{J_O \cdot (\varphi'(t_3))^2}{2} \right) - \left( \frac{m \cdot (\varphi'(t_2))^2 \cdot R^2}{2} + \frac{J_O \cdot (\varphi'(t_2))^2}{2} \right), \\ \Delta E &= \left( \frac{(\varphi'(t_3))^2}{2} - \frac{(\varphi'(t_2))^2}{2} \right) \cdot (m \cdot R^2 + J_O), \\ \Delta E &= \frac{1}{2} \cdot ((\varphi'(t_3))^2 - (\varphi'(t_2))^2) \cdot (m \cdot R^2 + J_O). \end{aligned} \quad (2.154)$$

Так как  $\Delta \Pi = \Delta E$ , то

$$m \cdot g \cdot \Delta h_2 = \frac{1}{2} \cdot ((\varphi'(t_3))^2 - (\varphi'(t_2))^2) \cdot (m \cdot R^2 + J_O), \quad (2.155)$$

где  $\Delta h_2$  – изменение высоты центра тяжести зерна (рис. 2.20),  $\text{м}$ .

Отсюда

$$\varphi'(t_3) = \sqrt{(\varphi'(t_2))^2 + \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \Delta h_2}{m \cdot R^2 + J_O}}. \quad (2.156)$$

С учетом (2.114), (2.150) и (2.152) выражение (2.156) примет окончательно вид

$$\varphi'(t_3) = \sqrt{(\varphi'(t_2))^2 + \frac{2 \cdot g \cdot L_2 \cdot \sin \alpha}{R^2 \left(1 + \frac{M_6}{M_2}\right)}}. \quad (2.157)$$

За время качения по дуговой дуге  $t_3 - t_2$  цилиндр повернется на угол  $2 \cdot \pi - 2 \cdot \beta$  (с  $\varphi = \beta$  по  $2 \cdot \pi - \beta$ ), то

$$t_3 - t_2 = \frac{2 \cdot \pi - 2 \cdot \beta}{\frac{\varphi'(t_2) + \varphi'(t_3)}{2}} = \frac{4 \cdot (\pi - \beta)}{\varphi'(t_2) + \varphi'(t_3)}. \quad (2.158)$$

В завершении исследования стадии 2 отметим, что при  $t = t_3$  (конец стадии 2) будем иметь:

$$\varphi(t_3) = 2\pi - \beta. \quad (2.159)$$

$$\varphi'(t_3) = \sqrt{(\varphi'(t_2))^2 + \frac{2 \cdot g \cdot L_2 \cdot \sin \alpha}{R^2 \left(1 + \frac{M_6}{M_2}\right)}}. \quad (2.160)$$

#### **Вращение обрезанного цилиндра вокруг угловой точки $A_1$ (стадия 4)**

Эта стадия в принципе повторяет стадию 2, рассмотренную выше, когда цилиндр поворачивается вокруг точки  $A$ . Разница лишь в том, что в стадии 2 цилиндр, поворачиваясь на угол  $\beta$ , начинает свой поворот с состояния покоя, то есть с нулевой угловой скорости  $\varphi'$ . А в стадии 4 еще увеличится. Поэтому время  $t_4 - t_3$ , в течение которого цилиндр находится в стадии 4, меньше время  $t_2$ , которое затратит цилиндр на вторую стадию. Хотя угол поворота в стадии 4 тот же, что и в стадии 2 – это угол  $\beta$  (он меняется с  $2\pi - \beta$  до  $2\pi$ ) (рис. 2.13 и 2.14).

На рисунке 2.21 показаны следующие стадии: а)  $t = t_3$  – момент начала заключительной стадии (начало вращения вокруг точки  $A_1$ ); б)  $t = t_4$  – момент окончания стадии вращения вокруг точки  $A_1$ . Таким образом,  $t = t_4 - t_3$  – дли-



тельность заключительной стадии вращения обрезанного цилиндра вокруг точки  $A_1$ .

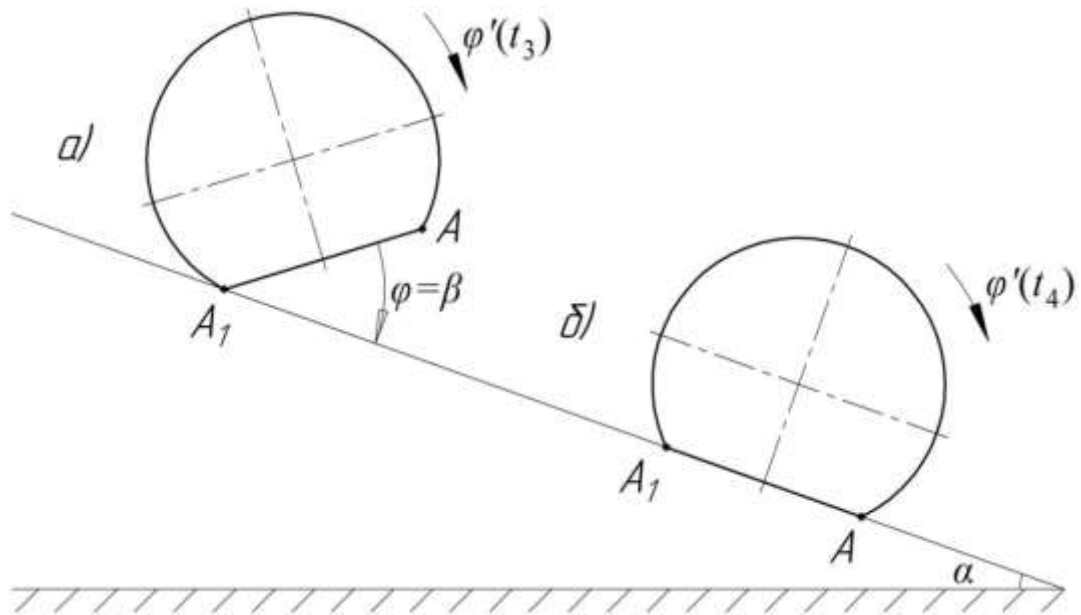


Рисунок 2.21 – Вращение обрезанного цилиндра вокруг точки  $A_1$ : а) начальная стадия вращения; б) заключительная стадия вращения

Для определения угловой скорости вращения обрезанного цилиндра будем использовать энергетический подход. Здесь необходимым и достаточным является исследование начальной и конечной стадий вращения обрезанного цилиндра вокруг точки  $A_1$ . Исходными данными для последней стадии являются величины, полученные в формулах 2.145 и 2.146.

Рассмотрим подробнее начало заключительной стадии (рис. 2.22). Здесь углы  $\alpha$  и  $\beta$  заданы (причем,  $\beta > \alpha$ ). В точке  $A_1$  окружность цилиндра касается наклонной плоскости.

Начальная высота центра тяжести обрезанного цилиндра (точка  $b_1$ ) над горизонтальной прямой  $LL_1$ , проходящей через точку вращения  $A_1$  (рис. 2.22) равна

$$h_{нач} = h_1 + h_2, \quad (2.161)$$

где  $h_1$  – расстояние между точкой вращения цилиндра  $A_1$  и центром тяжести круглого цилиндра  $O$ , взятое в вертикальной плоскости, м;



Согласно рисунку 2.23

$$h_1 = R \cdot \cos \gamma = |\gamma = \alpha + \beta| = R \cdot \cos(\alpha + \beta); \quad h_2 = (b_1 - b) \cdot \cos \alpha. \quad (2.165)$$

Таким образом

$$h_{\text{кон}} = h_1 + h_2 = R \cdot \cos(\alpha + \beta) + (b_1 - b) \cdot \cos \alpha. \quad (2.166)$$

Согласно (2.131) и (2.134), высота точки  $b_1$  над горизонталью  $LL_1$  уменьшилась на величину (рис. 2.24)

$$\Delta h_3 = h_{\text{нач}} - h_{\text{кон}} = R \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + (b_1 - b) \cdot [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha]. \quad (2.167)$$

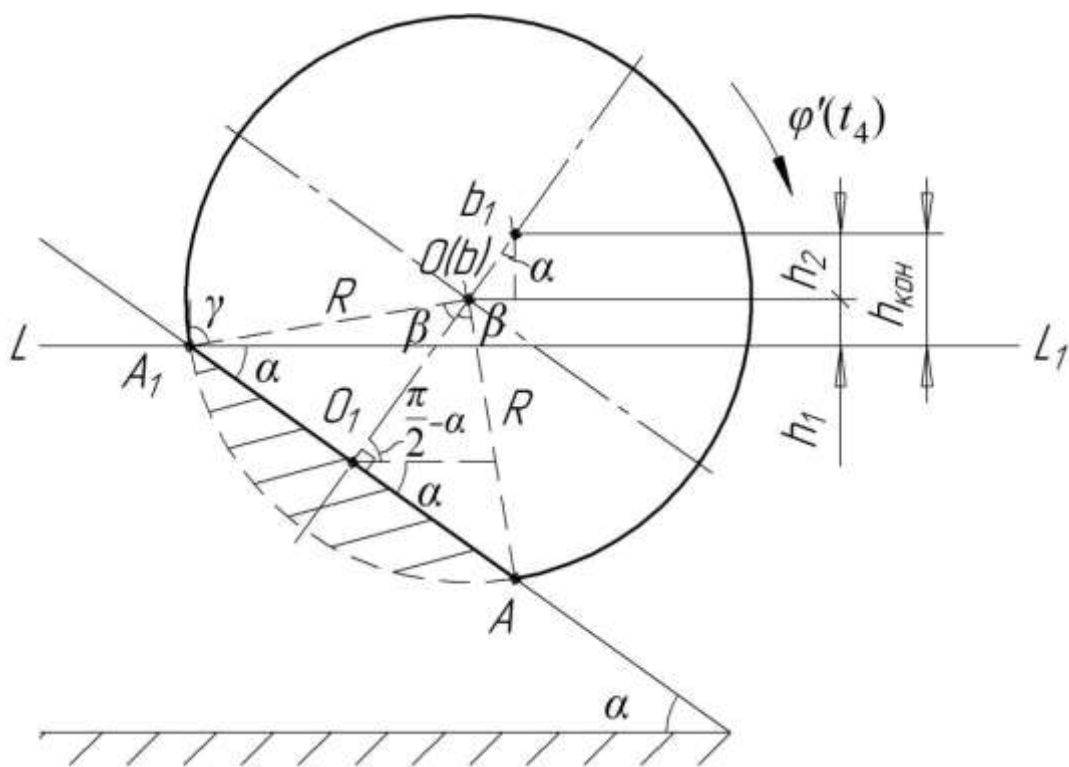


Рисунок 2.23 – Заключительная стадия вращения обрезанного цилиндра вокруг точки  $A_1$

Следовательно, потенциальная энергия  $\Pi$  цилиндра уменьшилась на величину [159]

$$\Delta \Pi = m \cdot g \cdot \Delta h_3, \quad (2.168)$$

где  $m$  – масса цилиндра (2.114), кг;

$g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\Delta h_3$  – изменение высоты центра тяжести зерна (рис. 2.24), м.

Согласно закону сохранения энергии, настолько же увеличилась кинетическая энергия  $E$  вращения цилиндра вокруг точки  $A_1$

$$\Delta E = E_{\text{кон}} - E_{\text{нач}} = \frac{J_{A_1} \cdot (\varphi'(t_4))^2}{2} - \frac{J_{A_1} \cdot (\varphi'(t_3))^2}{2}, \quad (2.169)$$

где  $J_{A_1}$  – момент инерции обрезанного цилиндра, проходящий через точку  $A_1$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\varphi'(t_4)$  – угловая скорость цилиндра в момент времени  $t_4$  (пока не известна),  $\text{с}^{-1}$ ;

$\varphi'(t_3)$  – угловая скорость цилиндра в момент времени  $t_3$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

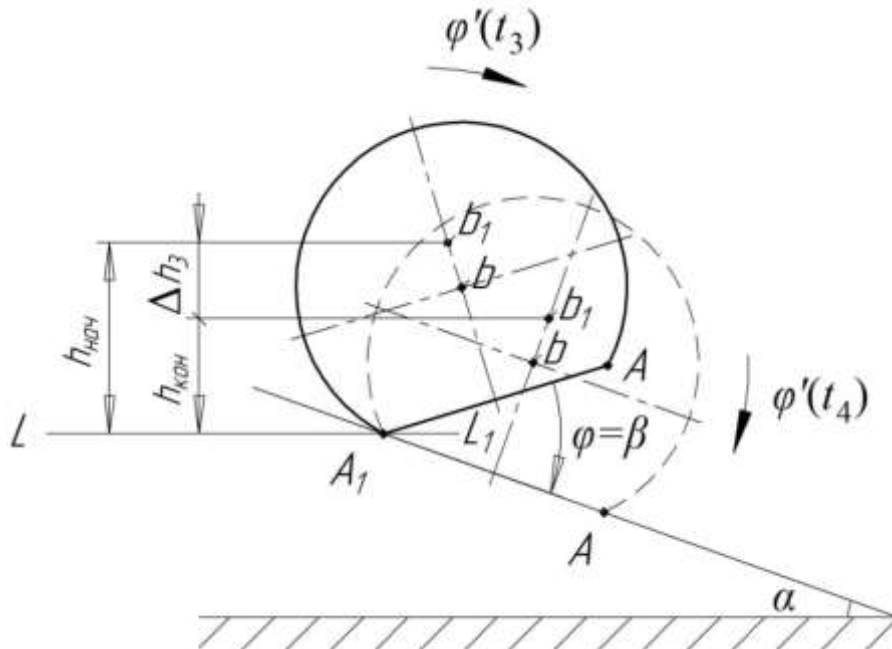


Рисунок 2.24 – К определению потенциальной энергии обрезанного цилиндра при его вращении вокруг точки  $A_1$

Поскольку

$$J_{A_1} = \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot [3(\pi - \beta) + \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot (3 + 2 \cdot \sin^2 \beta)] = \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot M_3; \quad (2.170)$$

$$b_1 - b = \frac{2}{3} \cdot R \cdot \frac{\sin^3 \beta}{\pi - \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} = R \cdot \frac{M_1}{M_2}. \quad (2.171)$$

Тогда

$$\Delta\Pi = m \cdot g \cdot \Delta h_3 = \rho \cdot g \cdot R^3 \{M_2 [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + M_1 [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha]\}, \quad (2.172)$$

где  $m$  – масса цилиндра (2.114), кг;

$g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\rho$  – поверхностная плотность материала цилиндра, кг/м<sup>2</sup>;

$R$  – радиус цилиндра, м;

$\Delta h_3$  – изменение высоты центра тяжести зерна, м;

$$\Delta E = \frac{\rho \cdot R^4}{4} \cdot M_3 \cdot [(\varphi'(t_4))^2 - (\varphi'(t_3))^2]. \quad (2.173)$$

Так как  $\Delta\Pi = \Delta E$ , то

$$(\varphi'(t_4))^2 = (\varphi'(t_3))^2 + \frac{4 \cdot g}{R} \left\{ \frac{M_2}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_1}{M_3} [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha] \right\}. \quad (2.174)$$

Так как (см. (2.146))

$$(\varphi'(t_3))^2 = \frac{4 \cdot g}{R} \cdot [M_5^2 + M_4 \cdot (\pi - \beta)], \quad (2.175)$$

то окончательно получаем

$$\varphi'(t_4) = 2 \sqrt{\frac{g}{R} \sqrt{M_5^2 + M_4(\pi - \beta) + \frac{M_2}{M_3} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] + \frac{M_1}{M_3} [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha]}}. \quad (2.176)$$

Теперь найдем время  $t_4 - t_3$  заключительной стадии вращения обрезаемого цилиндра вокруг точки  $A_1$ . Поскольку в момент  $t_3$  – окончания качения цилиндра набрал угловую скорость (2.175), то к моменту  $t_4$  эта скорость еще возрастет, и при вращении цилиндра вокруг точки  $A_1$  он повернется на угол  $\beta$  (с  $\varphi = 2\pi - \beta$  по  $2\pi$ ), то

$$t_4 - t_3 = \frac{\beta}{\varphi'(t_4)}. \quad (2.177)$$

Теперь можем записать и общее время  $t$ , за которое обрезаемый цилиндр сделает один полный оборот:

$$t = t_2 + (t_3 - t_2) + (t_4 - t_3). \quad (2.178)$$

Слагаемые этой суммы указаны в формулах (2.102), (2.144) и (2.177).

### Числовая интерпретация теоретических положений

Теперь выпишем последовательность действий для численной реализации изложенной выше схемы определения искомого времени  $t$ .

1) Обмеряем обрезанный цилиндр (зерно) и определяем угол  $\beta$ . Расчеты выполняем для зерна пшеницы сорта «Московская 56» с размерами: ширина зерна  $b_{зep}=3,9$  мм; толщина зерна  $h_{зep}=3,42$  мм и длина зерна  $l_{зep}=6,5$  мм.

2) Из равенства (2.75) определяем критический угол  $\alpha_1$  и выбираем угол  $\alpha > \alpha_1$ . При этом выбираем его так, чтобы одновременно  $\alpha < \alpha_2$ , где  $tg\alpha_2=3\mu$  (2.43), а  $\mu$  – коэффициент трения скольжения между поверхностями цилиндра и наклонной плоскости. Последнее условие – это условие того, чтобы в стадии 3 катящийся цилиндр не проскальзывал. Итак, в этом пункте выбираем  $\alpha$  с условием,  $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ .

3) Вычисляем константы  $M_1; M_2; M_3; M_4; M_5$  (формулы (2.94), (2.133), (2.142)).

4) Вводим функцию  $f(\varphi)$  (2.103) и вычисляем константу

$$a_2 = \int_0^{\beta} f(\varphi) d\varphi. \quad (2.179)$$

Тем самым получаем выражение для времени  $t_2$ :

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot a_2. \quad (2.180)$$

5) Вычисляем константу

$$a_3 = 4 \cdot \frac{\sqrt{M_5^2 + M_4(\pi - \beta) - M_5}}{M_4}, \quad (2.181)$$

фигурирующую в выражении (2.144) для времени  $t_3-t_2$ , и получаем выражение для этого времени:

$$t_3 - t_2 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot a_3. \quad (2.182)$$

Вычисляем время заключительной стадии

$$t_4 - t_3 = \frac{\beta}{\varphi'(t_4)}. \quad (2.183)$$

В соответствии с этим получаем искомое время  $t$ :

$$t = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot (a_2 + a_3) + (t_4 - t_3). \quad (2.184)$$

Полученные уравнения решены при помощи программы «Mathcad» [104, 216] (приложение Г), а их числовые значения представлены в виде итоговой таблицы 2.1. При этом следует отметить, что независимо от используемого подхода, результаты расчетов получаются одинаковыми, что свидетельствует об их высокой степени достоверности [113].

Таблица 2.1 – Результаты расчетов моделирования движения зерна по наклонной поверхности

Исходные данные	$\beta=41,08^\circ =$ $= 0,717 \text{ рад}$	$\alpha=40^\circ =$ $= 0,698 \text{ рад}$	$R=1,95 \text{ мм} =$ $= 1,95 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Фазы движения обрезанного цилиндра	$\varphi \text{ (рад)}$	$\varphi' \text{ (с}^{-1}\text{)}$	$t \text{ (с)}$
Начало движения (начало стадии 2)	0	$\varphi'(0)=0$	$t(0)=0$
Конец стадии 2	$\beta$	$\varphi'(t_2)=41,81$	$t_2=0,034$
Начало стадии 3	$\beta$	$\varphi'(t_2)=41,81$	$t_2=0,034$
Конец стадии 3	$2\pi-\beta$	$\varphi'(t_3)=151,67$	$t_3=0,084$
Начало стадии 4	$2\pi-\beta$	$\varphi'(t_3)=151,67$	$t_3=0,084$
Конец стадии 4	$2\pi$	$\varphi'(t_4)=164,34$	$t_4=0,089$
Полный (круговой) цилиндр после своего полного поворота	$2\pi$	$\omega=164,59$	$t=0,076$

Анализ полученных данных (табл. 2.1) свидетельствует о том, что время одного оборота обрезанного цилиндра в 1,17 раз больше аналогичного па-

раметра в сравнении с круглым цилиндром. При этом наиболее продолжительной является стадия 3 – качения цилиндра по его круговой дуге.

Видеосъемка движения отдельной зерновки пшеницы по наклонной поверхности позволила выявить то, что она может не только катиться по ней, но и скользить вдоль нее. Как правило, это наблюдается в случае, когда зерно лежит своей плоской гранью на наклонной поверхности и занимает на ней продольное положение. Таким образом, при описании теоретических исследований целесообразно рассмотреть и эту модель поведения зерна.

### 2.2.3 СКОЛЬЖЕНИЕ ОБРЕЗАННОГО ЦИЛИНДРА ПО НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Пусть обрезанный цилиндр своей плоской гранью лежит на наклонной шероховатой поверхности и сориентирован в пространстве продольно по отношению к направлению его движения (рисунок 2.25).

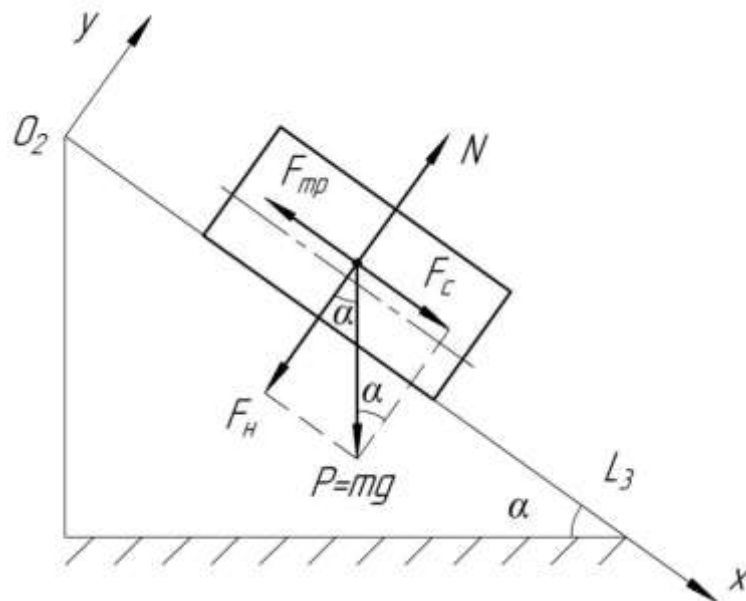


Рисунок 2.25 – Силы, действующие на обрезанный цилиндр, лежащий продольно своей плоской гранью на наклонной поверхности

Здесь  $\vec{P} = mg$  – вес цилиндра;  $\vec{F}_c$  и  $\vec{F}_n$  – компоненты веса  $\vec{P}$  (скатывающая сила и сила нормального давления соответственно);  $\vec{N}$  – реакция



наклонной плоскости на тело ( $\vec{N} = -\vec{F}_n$ );  $\vec{F}_{mp}$  – сила трения между телом и наклонной плоскостью. Очевидно, что при малых значениях угла  $\alpha$  обрезанный цилиндр двигаться не будет, так как скатывающая сила  $\vec{F}_c$  небольшая по величине, и ее будет уравнивать сила трения покоя  $\vec{F}_{mp}$ .

С увеличением угла  $\alpha$  будут увеличиваться и  $F_c$ , и уравнивающая ее  $F_{mp}$ . Наконец, при некотором угле  $\alpha_1$  сила трения покоя достигнет своего максимального значения – силы трения скольжения, и тело начнет медленно скатываться с наклонной плоскости [256]

$$F_{mp.ск} = \mu \cdot N, \quad (2.185)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения.

Найдем этот критический угол  $\alpha_1$ . Согласно рисунку 2.25, при  $\alpha = \alpha_1$  будем иметь:

$$F_c = F_{mp} \Rightarrow mg \cdot \sin \alpha_1 = \mu \cdot N.$$

Так как

$$N = F_n = mg \cdot \cos \alpha_1,$$

то

$$mg \cdot \sin \alpha_1 = \mu \cdot mg \cdot \cos \alpha_1.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \mu. \quad (2.186)$$

Если  $\alpha > \alpha_1$ , то  $F_c > F_{mp.ск}$ , и возникает результирующая сила

$$F_{рез} = F_c - F_{mp.ск} = mg \cdot \sin \alpha - \mu \cdot mg \cdot \cos \alpha = mg(\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha)$$

которая будет скатывать тело с наклонной плоскости, создавая ему ускорение

$$a = \frac{F_{рез}}{m} = g(\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha) \quad (2.187)$$

и скорость

$$v = a \cdot t = g \cdot t \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha). \quad (2.188)$$

Если тело начнет скатываться с верхней точки наклонной плоскости (с точки  $O_2$ ), то всю длину  $L_3$  наклонной плоскости тело пройдет за время  $t$ , которое найдем из равенства:

$$L_3 = \frac{a \cdot t^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2 \cdot L_3}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot L_3}{g \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha)}}. \quad (2.189)$$

При этом скорость  $v(t)$  в нижней точке наклонной плоскости будет такой:

$$v(t) = g \cdot t \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha) = \sqrt{2 \cdot L_3 \cdot g \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha)}. \quad (2.190)$$

Полученные уравнения потребуются нам ниже при оценке пропускной способности наклонной решетчатой поверхности.

### 2.3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НАКЛОННОЙ РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Известно, что сепарирующая способность решетчатой поверхности будет максимальной лишь в том случае, когда время нахождения свободного зерна над отверстием окажется больше времени сепарации через него элементарного объема (рис. 2.6) зернового вороха [71, 149].

Время нахождения свободного зерна над отверстием решетчатой поверхности определим как

$$t_{омв} = \frac{l_{омв}}{v_{мп}}, \quad (2.191)$$

где  $l_{омв}$  – длина отверстия решетчатой поверхности, м;

$v_{мп}$  – скорость плавающего транспортера наклонной камеры, м/с.

Расчет времени сепарации следует выполнять по длине отверстий решетчатой поверхности, взятой из лабораторного эксперимента [154, 300]. Это обусловлено тем, что при теоретическом моделировании процесса рассматривалась только сепарация отдельного свободного зерна через отверстие без учета его взаимодействия с окружающим ворохом. Тогда при длине отверстия решетчатой поверхности  $l_{омв}=0,16$  м [156] и скорости плавающего

транспортера  $v_{mp}=3 \text{ м/с}$  [102, 112], время нахождения свободного зерна над отверстием составит порядка  $t_{омв}=0,053 \text{ с}$ .

Время сепарации элементарного объема зернового вороха через отверстие можно найти следующим образом

$$t_{cen} = \frac{L_{вор}}{v_{cen}}, \quad (2.192)$$

где  $L_{вор}$  – путь, пройденный ворохом за время  $t_{омв}$ , м;

$v_{cen}$  – скорость сепарации вороха через отверстие, м/с.

Скорость сепарации для круглого и обрезанного цилиндра определим соответственно по формулам 2.39 и 2.188. Здесь для их вычисления необходимо выполнить замену: вместо времени одного оборота  $t$  – подставить время нахождения свободного зерна над отверстием решетчатой поверхности  $t_{омв}$ , а коэффициент трения скольжения  $\mu$  (2.186) рассчитать по углу внутреннего трения в движении ( $\alpha_1=35^\circ$ ) [71, 80].

Скорость сепарации обрезанного цилиндра, катящегося по наклонной плоскости, определена посредством энергетического подхода [приложение Г]. Согласно нему за время  $t_{омв}=0,053 \text{ с}$  она составляет  $0,163 \text{ м/с}$ . Результаты расчетов представим в виде таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета параметров для определения пропускной способности наклонной решетчатой поверхности

Параметры расчета	Круговой цилиндр катится	Обрезанный цилиндр	
		катится	скользит
Время нахождения свободного зерна над отверстием решетчатой поверхности $t_{омв}$ , с	0,053	0,053	0,053
Ускорение $a$ , м/с <sup>2</sup>	4,204	3,075	1,044
Путь, пройденный ворохом $L_{вор}$ за время $t_{омв}$ , $10^{-3}$ м	5,890	4,318	1,466
Скорость сепарации $v_{cen}$ , м/с	0,222	0,163	0,055
Средняя скорость сепарации $v_{cp.cen}$ , м/с	0,146		

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что максимальной сепарацией обладают зерна, поперечное сечение которых представляет собой форму кругового цилиндра. Такая форма поперечного сечения способствует увеличению скорости сепарации в 1,36 раза по сравнению с обрезанным цилиндром, катящимся по наклонной поверхности, и в 4,04 раза больше, чем при его скольжении. Средняя скорость сепарации для трех представленных моделей равна 0,146 м/с.

Однако следует отметить то, что при теоретическом моделировании процесса не учитывалось наличие в ворохе различных примесей (колосков, половы и соломы) и перемычек между отверстиями на решетчатой поверхности. Все это способствует снижению скорости сепарации. С учетом вышесказанного, фактическая скорость сепарации может быть определена следующим образом

$$v_{\text{фак.сеп}} = v_{\text{ср.сеп}} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (2.193)$$

где  $v_{\text{ср.сеп}}$  – средняя скорость сепарации зернового вороха через отверстия решетчатой поверхности, м/с;

$\eta_1$  – коэффициент замедления, учитывающий количество свободного зерна в очесанном ворохе;

$\eta_2$  – коэффициент замедления, учитывающий количество свободного зерна оставшегося на перемычках.

Поскольку в очесанном зерновом ворохе содержится порядка 80% свободного зерна [124, 184, 258], то считаем, что коэффициент замедления прямо пропорционален этому количеству, то есть  $\eta_1=0,8$ .

Коэффициент замедления  $\eta_2$ , определим по количеству свободного зерна остающегося на перемычках между отверстиями. Для этого рассмотрим рисунок 2.26, на котором показано поперечное сечение решетчатой поверхности. Здесь треугольниками 1 изображено количество свободного зерна оставшегося на продольных перемычках 2 между отверстиями 3. Считаем, что свободное зерно 1 располагается на перемычках 2 решетчатой поверхности под углом внутреннего трения в движении  $\alpha_1$ . Тогда его количество

(площадь заштрихованного треугольника) можно найти по следующему уравнению

$$C_{зер} = S_{\Delta} = \frac{1}{4} \cdot tg \alpha_1 \cdot b_{пер}^2, \quad (2.194)$$

где  $\alpha_1$  – угол внутреннего трения зернового вороха в движении, град;

$b_{пер}$  – ширина продольной перемычки между отверстиями, м.

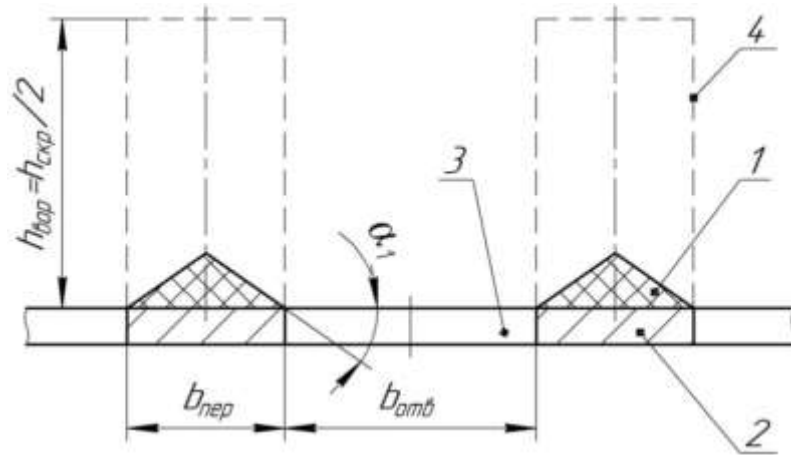


Рисунок 2.26 – Расчетная схема к определению количества свободного зерна оставшегося на перемычках между отверстиями: 1 – свободное зерно; 2 – продольные перемычки; 3 – отверстия решетчатой поверхности; 4 – первоначальный объем зерна

Сопоставим количество оставшегося свободного зерна с его первоначальным объемом 4 (рис. 2.26), приняв  $b_{пер}=0,005$  м и высоту зернового вороха, равную половине высоты скребка транспортера  $h_{вор}=h_{скр}/2=0,015$  м [112], получим, что  $\eta_2=0,9$ .

Подставив коэффициенты замедления в (2.193), найдем фактическую скорость сепарации

$$v_{фак.сен} = 0,146 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 0,105 \text{ м/с}. \quad (2.195)$$

Расчет количества рядов отверстий решетчатой поверхности выполним по максимальному времени сепарации. Для его вычисления разобьем продольное сечение зернового вороха на восемь плоскостей раздела под углом внутреннего трения в движении  $\alpha_1=35^\circ$  (рис. 2.27).

Согласно рисунку 2.27, максимальный путь, который пройдет элементарный объем вороха до отверстия, составит

$$L_{вор.макс} = \frac{h_{скр}}{\sin(\alpha_{нак} + \alpha_1)}, \quad (2.196)$$

где  $h_{скр}$  – высота скребка плавающего транспортера, м;

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

$\alpha_1$  – угол внутреннего трения зернового вороха в движении, град.

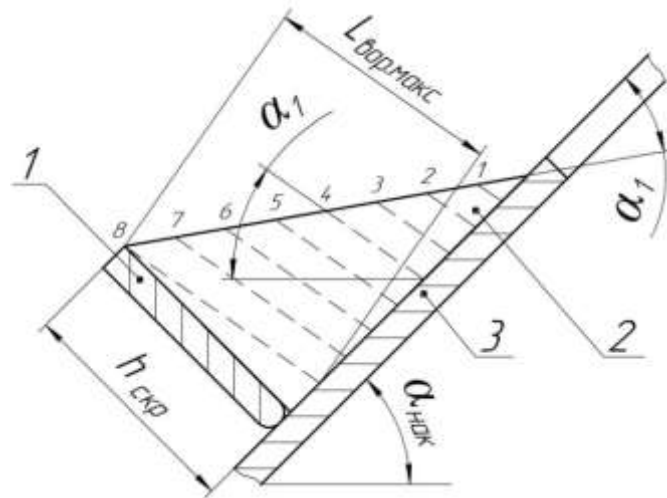


Рисунок 2.27 – К расчету пути движения элементарного объема вороха:

1 – скребок; 2 – ворох; 3 – решетчатая поверхность

При высоте скребков плавающего транспортера  $h_{скр}=0,030$  м и продольном угле наклона решетчатой поверхности  $\alpha_{нак}=45^\circ$ , максимальный путь, который пройдет элементарный объем вороха, составит  $L_{вор.макс}=30,46 \cdot 10^{-3}$  м. Тогда максимальное время сепарации при средней скорости (2.195) будет равно

$$t_{макс.сен} = \frac{L_{макс.вор}}{v_{ср.сен}} = \frac{30,46 \cdot 10^{-3}}{0,105} = 0,29 \text{ с.} \quad (2.197)$$

Отсюда, минимальное количество рядов отверстий решетчатого днища, обеспечивающее сепарацию свободного зерна, составит

$$n_{оме} = \frac{t_{макс.сен}}{t_{оме}} = \frac{0,29}{0,053} \approx 5. \quad (2.198)$$

В тоже время, при длине днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна 1,3 м [112], количество рядов отверстий с размерами 160 мм, окажется равным 8. При этом очевидно, что размещение восьми рядов с отверстиями в днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна обеспечит большую сепарацию свободного зерна из очесанного зернового вороха по сравнению с пятью рядами.

По результатам теоретических исследований установлено, что для повышения сепарирующей способности решетчатого днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна целесообразно выполнить отверстия сплошными по всей его длине. Это позволит непрерывно увеличить скорость сепарации вороха. Кроме того, скорость сепарации может быть увеличена за счет более частого размещения скребков наклонного плавающего транспортера, что позволяет уменьшить длину скольжения слоя и время, необходимое на его проход в отверстие.

## ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Для минимизации поступления в молотильную камеру свободного зерна, целесообразно подвергнуть его предварительной сепарации в наклонной камере зерноуборочного комбайна, имеющей решетчатое днище. Исходная гипотеза сепарации свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна рассматривала процесс как свободное падение единичной зерновки, брошенной под углом к горизонту. В этом случае для ее гарантированного прохода сквозь отверстие необходимо, чтобы длина последнего ( $l_{ome}$ ) была не менее 84 мм. Полученный результат позволил осуществить планирование установочного эксперимента.

2. 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 вдоль плоскости раздела возрастает линейно, а ее среднее значение (при длине отверстия 160 мм) равно  $v_{\text{фак.сен}}=0,105$  м/с.

3. Для обеспечения эффективной сепарации очесанного зернового вороха в наклонной камере зерноуборочного комбайна, необходимо в ее днище длиной 1,3 м, выполнить 8 продольных рядов отверстий.

4. Выявлен резерв увеличения сепарирующей способности решетчатого днища наклонной камеры за счет выполнения отверстий сплошными по всей его длине, поскольку при отсутствии поперечных перемычек процесс перестает быть дискретным, вследствие чего скорость сепарации должна увеличиваться непрерывно. Скорость сепарации может быть увеличена за счет более частого размещения скребков наклонного плавающего транспортера, что позволяет уменьшить длину скольжения слоя и время, необходимое на его проход в отверстие.

5. Для исключения забивания решетчатого днища наклонной камеры компонентами очесанного зернового вороха, целесообразно верхнюю кромку отверстия расположить ниже поверхности днища и снабдить ее выемкой, имеющей переменное сечение криволинейного вида, глубина которой уменьшается по мере удаления от верхней кромки отверстия от максимального значения и до нуля (Патент РФ № 2566015).



## **3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **3.1 ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Основные задачи, поставленные в этой работе, позволили определить программу исследований, которая включает в себя проведение лабораторных и полевых экспериментов.

Программа экспериментальных исследований включала в себя:

1. Исследование физико-механических свойств очесанного зернового вороха;
2. Проведение лабораторных исследований по определению энергоёмкости выделения зерна из колоса при поперечном колебательном характере нагружения связей;
3. Исследование процесса сепарации очесанного зернового вороха на наклонной решетчатой поверхности;
4. Исследование процесса сепарации очесанного зернового вороха на сетчатой ячеистой поверхности.

Лабораторные исследования проводили в лабораториях Брянского ГАУ, а полевые – на опытных полях Брянской, Калужской и Смоленской областей. Лабораторные исследования были направлены на определение работы, затраченной на выделение зерна из колоса при поперечном колебательном характере нагружения связей и оптимизацию его технологических параметров. Кроме того, была исследована возможность осуществления предварительной сепарации свободного зерна на решетчатом днище наклонной камеры и сетчатом транспортере до поступления хлебной массы в молотильную камеру зерноуборочного комбайна.

При проведении полевых и лабораторных экспериментов использовали пшеницу. Это обусловлено тем, что она занимает порядка 62,55% от всей посевной площади в России среди зерновых культур (табл. 1.1).

### 3.2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА

Уборка зерновых культур путем очеса растений на корню в ряде случаев является реальной альтернативой современным комбайновым технологиям. При этом, не смотря на достижение инженерной наукой определенных результатов [36, 94, 276], пока остаются не решенными большое число конкретных задач и проблем. В частности, они касаются технологии дальнейшей обработки полученного вороха, который содержит до 85% свободного зерна [143, 258]. При этом его солоmistая часть (полова и частично измельченные стебли растений, недомолоченные колосья) составляет всего 30-50% от объема соломы, поступающей в молотильные аппараты от традиционных жаток или подборщиков [91, 124]. По сути, ворох, поступающий в молотилку после очеса растений на корню, ближе по своему составу к вороху, возвращаемому в традиционном зерноуборочном комбайне колосовым шнеком и элеватором на домолачивающее устройство [165].

Анализ литературных источников свидетельствует о том, что процесс взаимодействия компонентов зернового вороха, полученного в результате очеса растений на корню, с рабочими органами молотильного устройства изучен недостаточно. Как правило, исследователи ограничиваются изучением характера взаимодействия гребенок очесывающего устройства с колосом, а также движением свободной зерновки после ее отделения от его стержня [236, 271]. При этом отсутствуют исчерпывающие данные по физико-механическим свойствам недомолоченных колосьев, ради которых, собственно, ворох и направляется после очеса в молотильное устройство. Это существенно образом осложняет работу по оптимизации параметров молотильного устройства, предназначенного для работы с ворохом данного типа.

В связи с этим в 2012 году в Перемышльском районе Калужской области были проведены испытания прицепного очесывающего устройства (рис. 3.1) при уборке пшеницы сорта «Московская 39» урожайностью 24 ц/га. Вы-

сота растений варьировала в пределах 0,6-0,8 м, при спелости зерна не менее 98% и влажности в пределах 13% [62, 65].

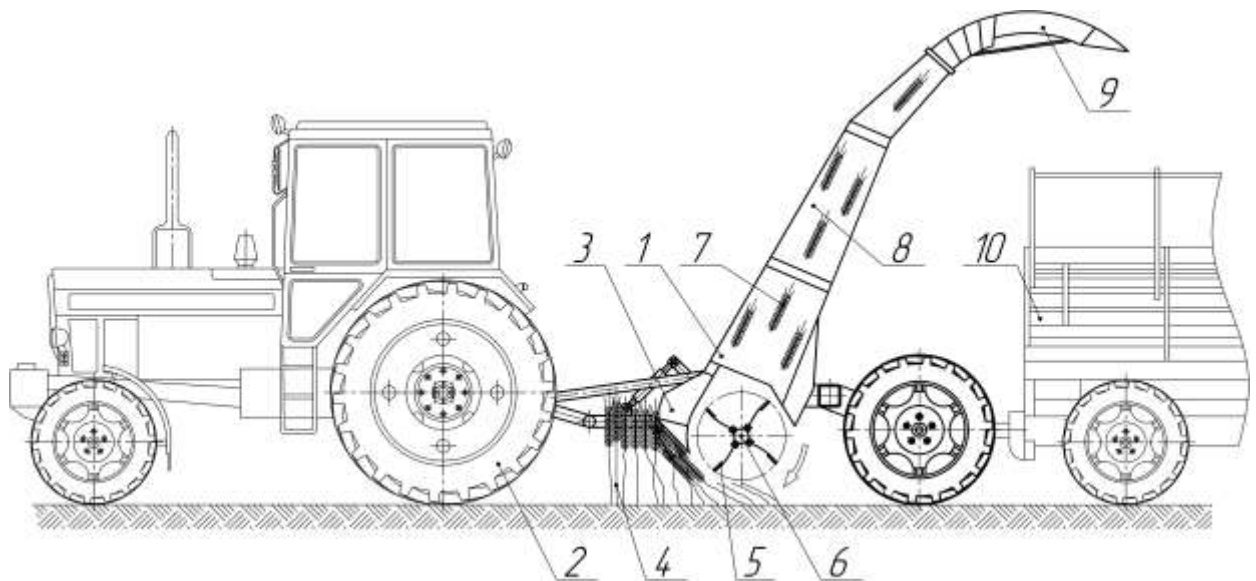


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема работы прицепного очесывающего устройства: 1 – очесывающий адаптер; 2 – трактор; 3 – направляющий козырек; 4 – стебли; 5 – зубья; 6 – ротор; 7 – оборванные колосья; 8 – трубопровод; 9 – дефлектор; 10 – прицеп

Опытное поле было поделено на делянки [75, 76]. Место проведения эксперимента определялось с помощью ряда случайных чисел. Очесывающий адаптер агрегатировался трактором МТЗ-80 с постоянной скоростью движения равной 7 км/ч и частотой вращения очесывающего ротора – 1000 мин<sup>-1</sup>. Выбор этих параметров обусловлен тем, что с одной стороны, стебли не вырывало из земли, а с другой – колосья освобождались от зерна без повреждений зерновок [236].

При выходе очесывающего ротора 6 на номинальные обороты, адаптер 1 перемещался по полю (рис. 3.1). При его поступательном движении направляющий козырек 3 наклонял стебли растений 4 вперед. Зубья 5 вращающегося ротора 6 прочесывали растения снизу вверх. Выбитые зерна и оборванные колосья 7 переносились под действием сил инерции и воздушно-

го потока в трубопровод 8 и дефлектором 9 направлялись в прицеп 10, с расстеленной на нем полиэтиленовой пленкой. После прохождения адаптером 50 метров производилась его полная остановка (рис. 3.2) и выгрузка полученного вороха из прицепа в мешки. Такое выполнение опытов позволяет произвести серию экспериментов в очень короткие сроки [63].



Рисунок 3.2 – Прицепное очесывающее устройство на базе КИР-1,5Б

Полученный таким образом материал (рис. 3.3) был подвергнут всесторонним исследованиям. В частности производился замер длины стеблей и колосьев (рис. 3.4), а также определялось количество выделенных и оставшихся зерен и их распределение по длине колоса. Всего было учтено и обработано 1020 колосков.



Рисунок 3.3 – Очесанный зерновой ворох, отобранный для исследования его параметров



Рисунок 3.4 – Измерение длины стеблей и колоса пшеницы

### 3.3 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗЕРНА ИЗ КОЛОСА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЖЕНИЯ СВЯЗЕЙ

Самой энергоемкой технологической операцией при комбайновой уборке зерна является обмолот. Так, например, на привод традиционного молотильного барабана приходится порядка 40% от общей мощности двигателя зерноуборочного комбайна [130, 227]. В связи с этим, изыскание технических возможностей по уменьшению указанных затрат является актуальной научной и практической задачей.

В качестве одного из наиболее перспективных направлений снижения энергоемкости процесса обмолота может рассматриваться использование молотильных устройств, реализующих поперечное колебательное нагружение связей зерна с колосом (рис. 1.29). В связи с тем, что реализовать практически такой способ выделения зерна из колоса удалось только в последние годы, то технические, технологические и энергетические параметры процесса изучены недостаточно [163, 192-194]. В частности, неизвестно минимальное число циклов нагружения, необходимое для гарантированного отделения от стержня колоса всех содержащихся в нем зерен. Кроме того, отсутствуют сведения о влиянии на технологическую и энергетическую эффективность процесса зазора в молотильном пространстве.

В связи с этим была разработана экспериментальная установка (рис. 3.5), позволяющая имитировать поперечный колебательный характер нагружения связей зерна с колосом и измерять при этом энергетические параметры процесса [195]. Она содержит стойку 1 и закрепленные на ней деку 2 и верхнюю площадку 3, рабочие поверхности которых выполнены рифлеными и размещены в пространстве так, что образуют молотильную камеру с регулируемым зазором. При этом верхняя площадка 3 снабжена приводом 4, за счет чего она может совершать угловые колебания на угол  $\varphi_{nl}$  (рис. 3.5, б).

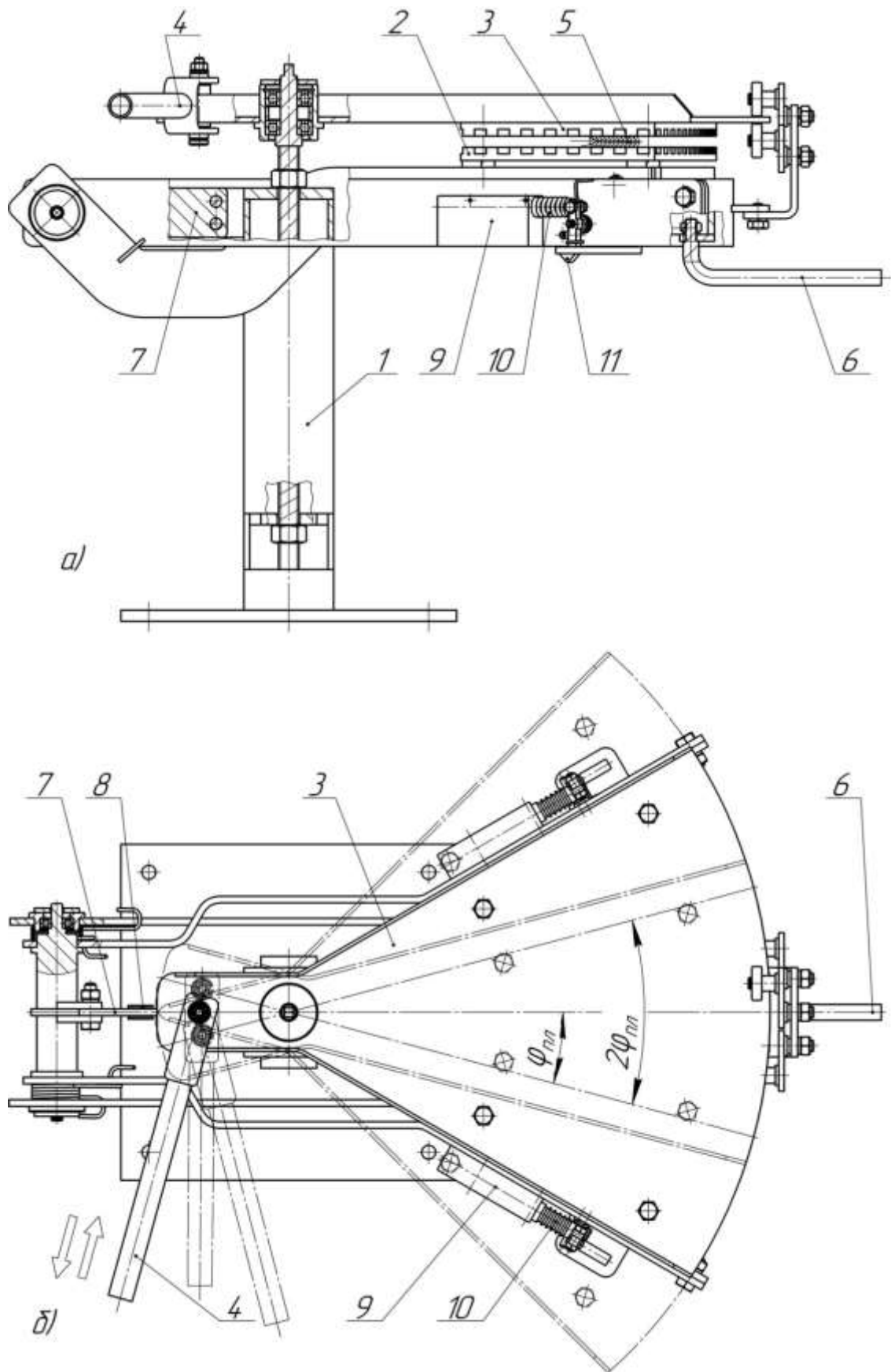


Рисунок 3.5 – Схема экспериментальной молотильной установки (Патент РФ № 2483525): *a)* главный вид; *б)* вид сверху; 1 – стойка; 2 – дека; 3 – верхняя площадка; 4 – привод; 5 – колос; 6 – ручка; 7 – тензопластина; 8 – тензодатчики; 9 – электромагнит; 10 – шток; 11 – защелка

Энергоемкость процесса выделения зерна из колоса оценивали при обмолаоте пшеницы сорта «Московская 56». На предварительно откинутую вниз деку 2 укладывали колос 5 и посредством ручки 6 переводили ее в рабочее положение (рис. 3.5, а). Усилие, затраченное на разрушение связей зерна с колосом в результате угловых колебаний площадки 3, фиксировала тензометрическая пластина 7, снабженная тензодатчиками 8, которые передавали сигнал на ноутбук через АЦП (аналого-цифровой преобразователь) L-Card LTR-212 на всем протяжении рабочего процесса (рис. 3.6) [54, 142].



Рисунок 3.6 – Приборное оборудование при проведении лабораторных исследований с экспериментальной молотилкой

После осуществления верхней площадкой 3 заданного числа колебаний, электромагнит 9, втягивая шток 10, поворачивал защелку 11, резко выводя деку 2 из молотильной камеры вниз. Таким образом, исключалось влияние на результаты измерений процессов разгона и торможения колебательных движений. То есть, замеры осуществлялись в установившемся режиме.

Сечение тензометрической пластины подобрано таким образом, чтобы датчики регистрировали деформацию от действия рабочих органов устрой-



ства с колосом только в вертикальной плоскости. При этом искажение измерений от деформации изгиба пластины, в горизонтальной плоскости от силы тяжести самого устройства, сведено к минимуму (практически до нуля). Это достигается за счет того, что высота тензометрической пластины выполнена в несколько раз больше чем ее толщина.

Для измерения энергоемкости процесса обмолота при поперечном колебательном характере нагрузений связей зерна с колосом была разработана структурная схема в среде графического программирования LabVIEW (рис. 3.7) [47, 248, 299].

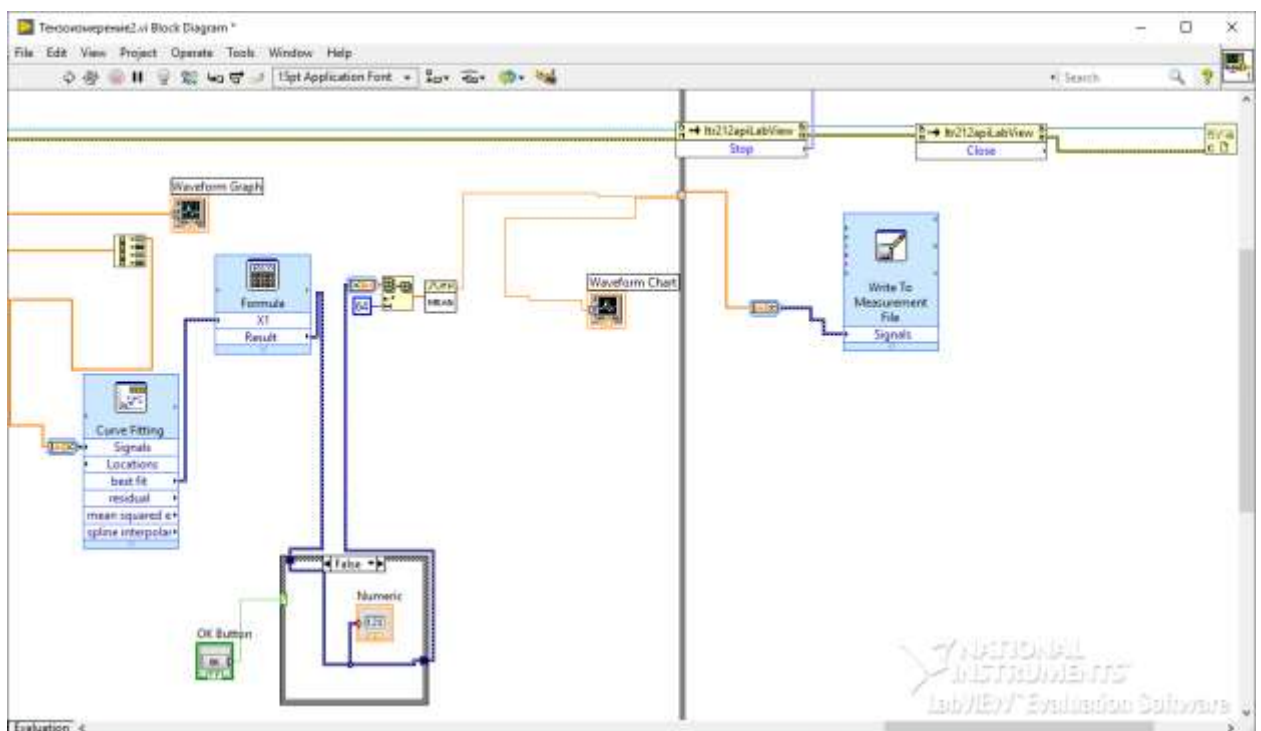


Рисунок 3.7 – Структурная схема в среде графического программирования LabVIEW для измерения энергоемкости молотильного устройства

Испытания проводили посредством четырех электрических тензодатчиков 2ПКБ-30-100Х, которые были соединены в мостовую схему и наклеены на тензометрическую пластину с заранее подготовленной поверхностью.

Деформация тензопластины в месте наклейки тензодатчиков передает их чувствительному элементу, который, изменяя сопротивление, вызывает разбаланс моста. Напряжение разбаланса увеличивается и подается на АЦП.

Тарировку тензодатчиков выполняли при помощи портативных электронных весов WH-A04 (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Тарировка экспериментального молотильного устройства

График тарировки представлен на рисунке 3.9.

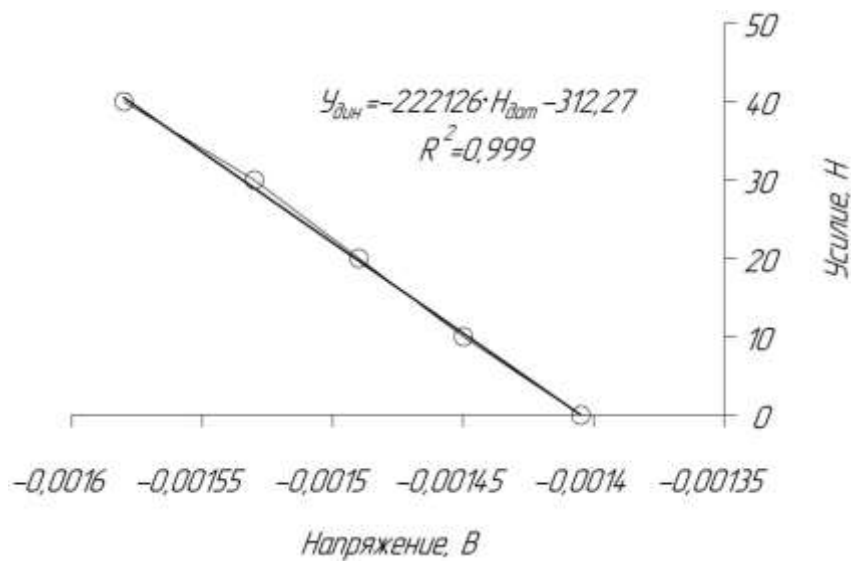


Рисунок 3.9 – График тарировки тензодатчиков

Уравнение регрессии, полученное при тарировке тензодатчиков, имеет линейный вид

$$Y_{дин} = -222126 \cdot H_{дат} - 312,27, \quad (3.1)$$

где  $Y_{дин}$  – усилие, приложенное динамометром,  $H$ ;

$H_{дат}$  – напряжение на тензодатчиках, зафиксированное АЦП,  $V$ .

Опыт был спланирован как полнофакторный [132] (табл. 3.1) 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.

Таблица 3.1 – Условия планирования эксперимента с молотильной установкой

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	+1	
Зазор в молотильной камере, мм	$Z_{мол}$	4	6	8	2

Выбор нижнего уровня варьирования обусловлен размерами зерна пшеницы (ширина и толщина), при которых обеспечивается минимальное дробление зерновок [266, 267], а верхнего уровня варьирования – началу процесса обмолота (при больших значениях зазора между декой и верхней площадкой выделение зерна из колоса не наблюдалось).

Причем за одно движение верхней площадки принято ее отклонение от своего начального положения на угол поворота  $\varphi_{пл}=15^\circ$  (рис. 3.5, б). Влажность зерна находилась в пределах 9% (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ по ГОСТ 13586.5-2015). Каждый вариант опыта был проведен в трехкратной повторности. Всего было учтено и обработано 78 колосьев.

### 3.3.1 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА РИФОВ НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ МОЛОТИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Для определения оптимального угла наклона рифов на рабочих органах экспериментального молотильного устройства (рис. 3.10), обеспечивающего полное выделение зерна из колоса при минимуме энергозатрат, были прове-

дены соответствующие исследования. Они выполнялись согласно методике, описанной в разделе 3.3.

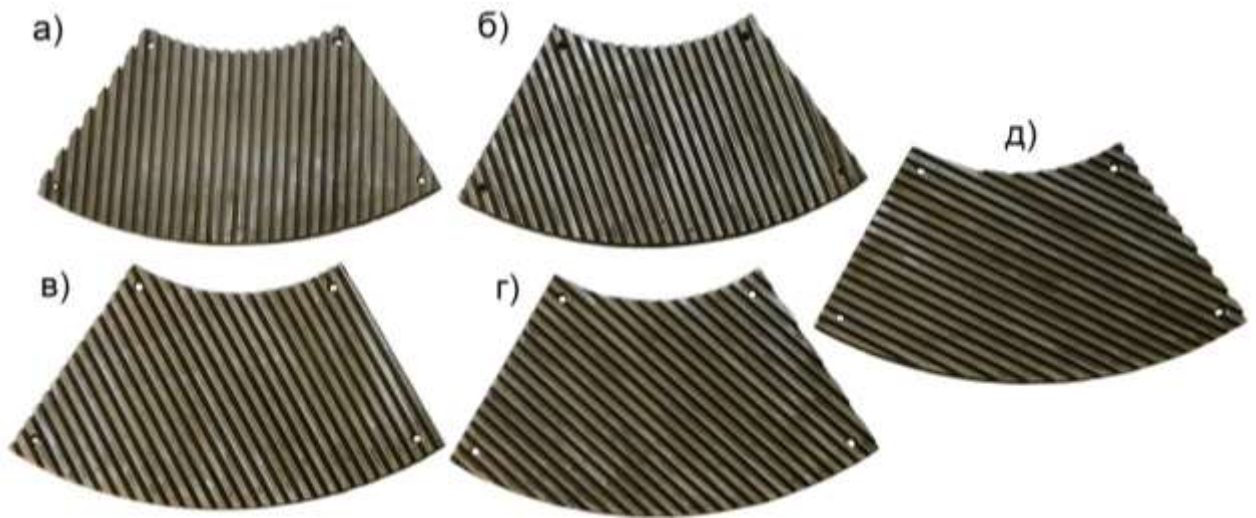


Рисунок 3.10 – Сменные рабочие органы экспериментального молотильного устройства с углом наклона рифов: а) 0°; б) 15°; в) 30°; г) 45°; д) 60°

Опыт был спланирован как полнофакторный [132] с пятью уровнями варьирования угла наклона рифов (0, 15, 30, 45 и 60 градусов) верхней площадки (рис. 3.10) и последовательным увеличением числа ее колебаний до полного выделения из колоса всех содержащихся в нем зерен.

При проведении серии экспериментов последовательность изменения угла наклона рифов была случайной. Угол наклона рифов деки был равен нулю. Зазор в молотильной камере составлял 4 мм. Выбор данного параметра обусловлен минимальной энергоемкостью процесса обмолота, полученного при проведении предварительных экспериментов [166]. За одно движение верхней площадки принято ее отклонение от своего начального положения на угол поворота  $\varphi_{nl}=15^\circ$ . Влажность зерна находилась в пределах 10%, а масса 1000 зерен составляла 48,94 г (определяли весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ по ГОСТ 13586.5-2015). Каждый вариант опыта проведен в трехкратной повторности. Всего было учтено и обработано 96 колосьев [168].

### 3.4 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА НАКЛОННОЙ РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Одним из перспективных направлений совершенствования технологического процесса уборки зерновых и зернобобовых культур является очесывание растений на корню [36, 91]. Распространение этого способа уборки сдерживается тем, что при ориентации на существующую технологическую схему зерноуборочного комбайна теоретически возможный потенциал роста эффективности не реализуется. Отчасти это связано с тем, что в поступающем в молотильное устройство очесанном ворохе содержится до 85% свободного зерна [91, 124, 278]. С точки зрения оптимизации технологического процесса целесообразно было бы разделить указанный ворох на фракции до его поступления в молотилку, максимально уменьшив подачу в молотильный аппарат свободного зерна и мелких примесей. Вследствие этого должна возрасти его пропускная способность, а, следовательно, и производительность комбайна.

С этой целью была разработана экспериментальная установка, имитирующая работу скребкового плавающего транспортера наклонной камеры зерноуборочного комбайна (рис. 3.11) [300]. Она состоит из корпуса 1, скребкового транспортера 2, решетчатого днища 3 и емкости 4 для сбора свободного зерна 5. Привод установки осуществлялся от электродвигателя 6 посредством цепной передачи 7. Регулировка скорости транспортера выполнялась при помощи частотного преобразователя 8 Веспер E2-8300.

Эксперимент был спланирован как двухфакторный (типа  $3^2$ ), в котором варьировали длина отверстия  $l_{омв}$  и его ширина  $b_{омв}$ . Отверстия были размещены на поверхности сепарирующей решетки в виде последовательно расположенных рядов (рис. 3.13). При этом их суммарное «живое сечение» (порядка 60%) оставалось неизменным во всех вариантах опыта (с максимальным отклонением  $\pm 0,5\%$ ). Вследствие этого удалось исключить влияние на результат третьего фактора (площади «живого сечения»), что могло внести

неопределенность в понимание сущности процесса взаимодействия вороха с отверстиями решета. В качестве выходного параметра было принято количество свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища экспериментальной установки.

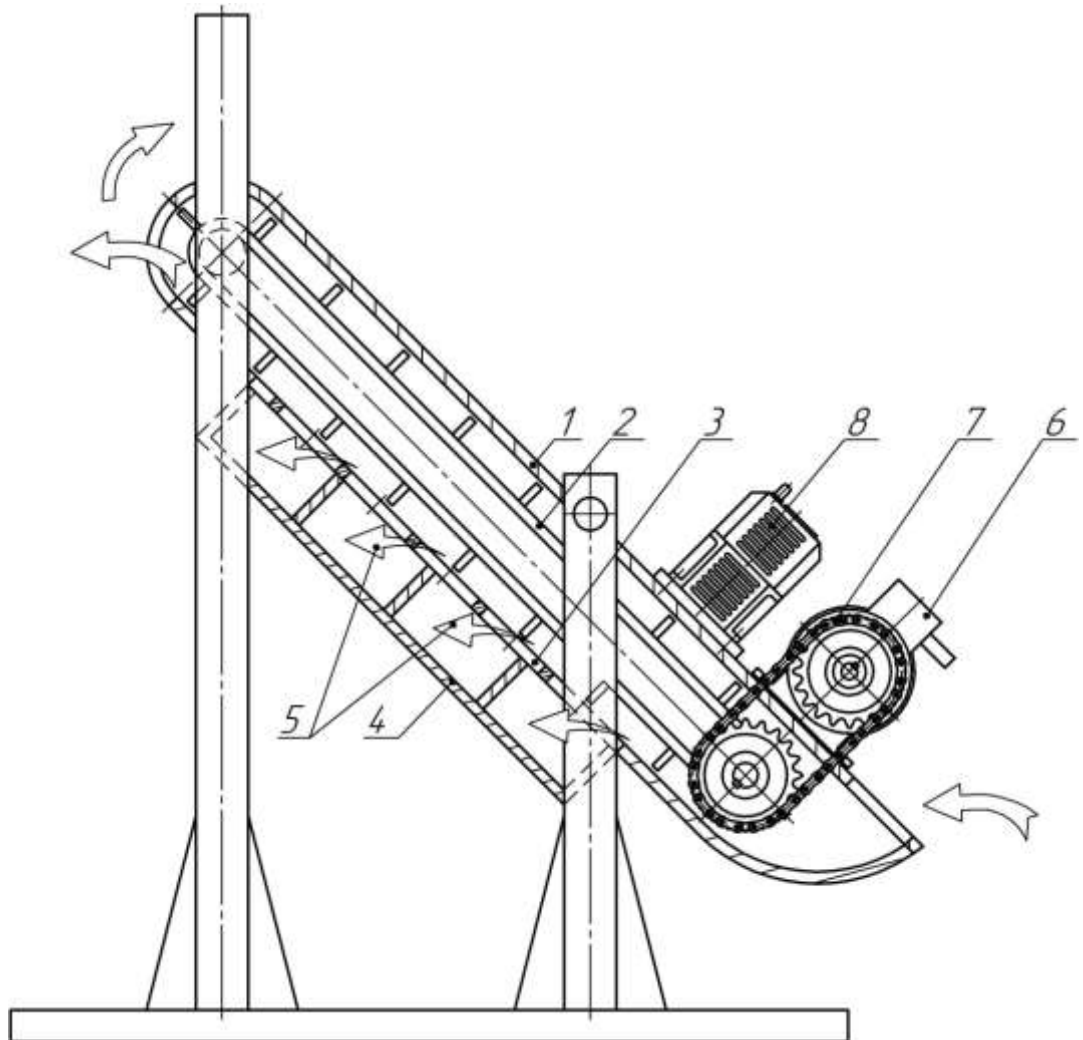


Рисунок 3.11 – Схема экспериментальной установки, имитирующей наклонную камеру комбайна: 1 – корпус; 2 – скребковый транспортер; 3 – решетчатое днище; 4 – емкость для сбора свободного зерна; 5 – свободное зерно; 6 – электродвигатель; 7 – цепная передача; 8 – частотный преобразователь

Сначала был проведен установочный эксперимент (табл. 3.2, 3.3), который позволил оценить выходные параметры процесса в рамках зоны варьирования, сформированной на основе результатов теоретического моделирования (раздел 2.2).

Таблица 3.2 – Условия планирования установочного эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	+1	
Длина отверстия, мм	$l_{отв}$	80	120	160	40
Ширина отверстия, мм	$b_{отв}$	8	10	12	2

При этом в качестве нижнего уровня варьирования для длины отверстия  $l_{отв}$  была принята величина, полученная при исследовании свободного падения зерновки, брошенной под углом к горизонту [169]. Нулевая точка для ширины отверстия  $b_{отв}$  была назначена исходя из размеров сепарируемых зерен и колосьев. Выходить за пределы  $b_{отв}=10$  мм не имеет смысла, поскольку в этом случае не исключен проход в отверстия отдельных недомолоченных колосьев.

Таблица 3.3 – Матрица планирования установочного эксперимента

Номер опыта	В кодированном виде		В натуральных величинах	
	$l_{отв}, мм$	$b_{отв}, мм$	$l_{отв}, мм$	$l_{отв}, мм$
1	-1	-1	80	8
2	-1	0	80	10
3	-1	+1	80	12
4	0	-1	120	8
5	0	0	120	10
6	0	+1	120	12
7	+1	-1	160	8
8	+1	0	160	10
9	+1	+1	160	12

Поскольку точка экстремума поверхности отклика, построенной на основании результатов установочного эксперимента [154, 177], оказалась на границе зоны варьирования факторов [76, 132], параметры последней были соответствующим образом откорректированы, в результате чего был получен план для второй серии эксперимента (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Условия планирования второй серии эксперимента

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

Поскольку эксперимент был спланирован как полнофакторный, то в каждой серии было реализовано девять вариантов опыта с трехкратной повторностью каждого из них (табл. 3.5). Таким образом, в каждой серии эксперимента были учтены и обработаны результаты 27 замеров.

Таблица 3.5 – Матрица планирования второй серии экспериментов

Номер опыта	В кодированном виде		В натуральных величинах	
	$l_{отв}, мм$	$b_{отв}, мм$	$l_{отв}, мм$	$l_{отв}, мм$
1	-1	-1	120	6
2	-1	0	120	8
3	-1	+1	120	10
4	0	-1	160	6
5	0	0	160	8
6	0	+1	160	10
7	+1	-1	200	6
8	+1	0	200	8
9	+1	+1	200	10

Экспериментальная установка, имитировавшая наклонную камеру с решетчатым днищем, была изготовлена на базе колосового элеватора зерноуборочного комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10» (рис. 3.12). Нижняя стенка корпуса элеватора была удалена, а вместо нее устанавливали сменные решета размером 920×220 мм, размеры отверстий в которых соответствовали запланированным параметрам (рис. 3.13).

Длина сменных решет соответствовала длине колосового элеватора зерноуборочного комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10», через который возможна организация процесса сепарации вороха.



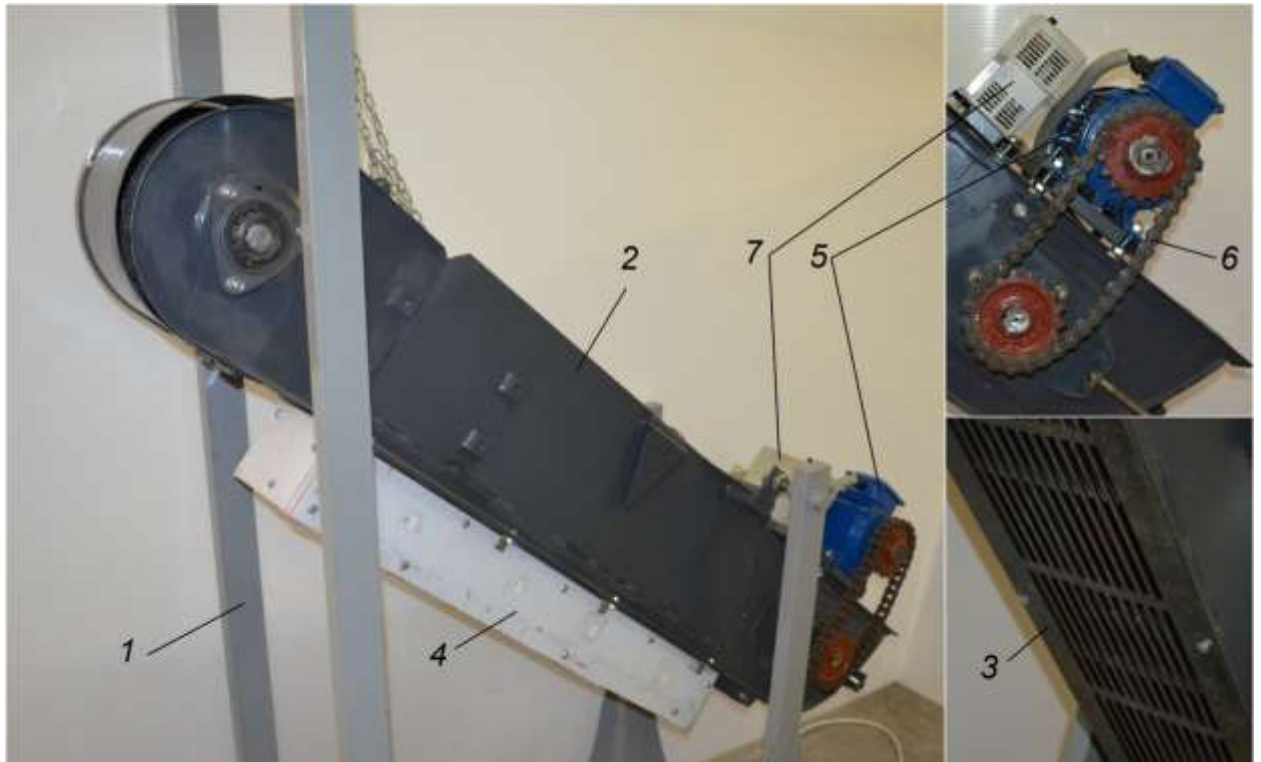


Рисунок 3.12 – Экспериментальная установка, имитирующая работу скребкового плавающего транспортера наклонной камеры зерноуборочного комбайна: 1 – рама; 2 – колосовой элеватор; 3 – съемное решетчатое днище; 4 – емкость для сбора зернового вороха; 5 – электродвигатель; 6 – цепная передача; 7 – частотный преобразователь

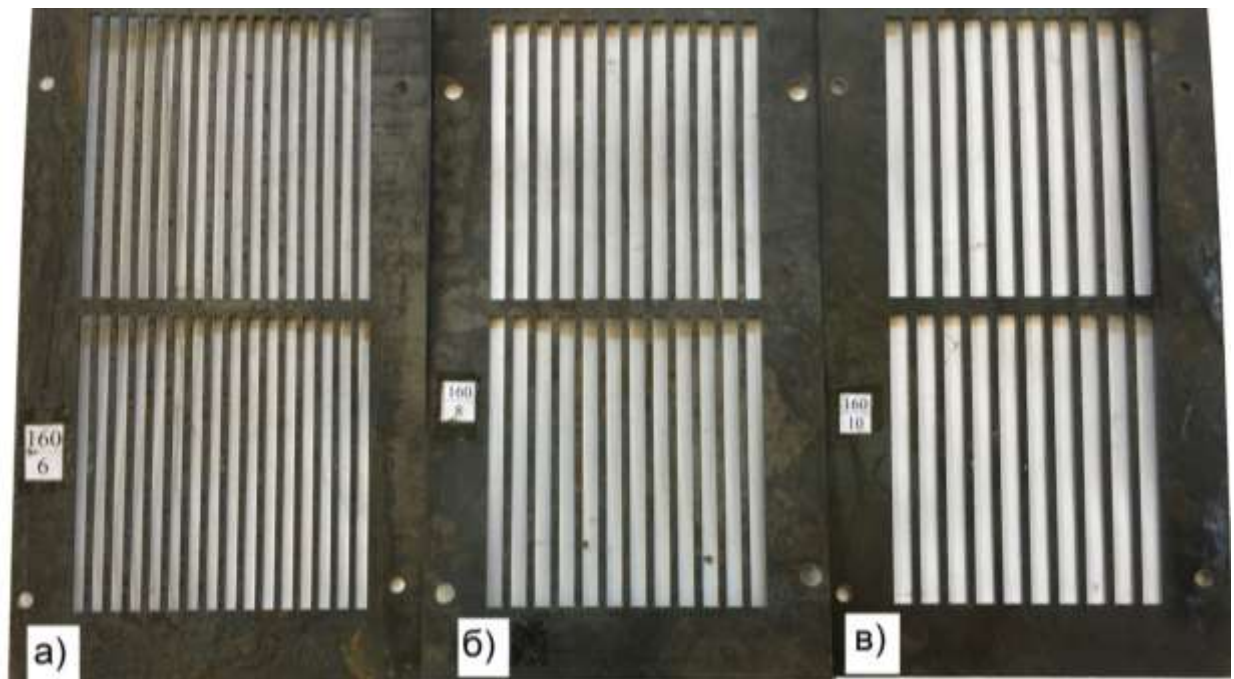


Рисунок 3.13 – Набор сменных решетчатых днищ экспериментальной установки с размерами отверстий: а) 160×6 мм; б) 160×8 мм; в) 160×10 мм

Опыт проводили при наклоне элеватора на угол  $45^\circ$ , что соответствует параметрам большинства серийных комбайнов [102, 112, 283, 284].

Учет прохода и схода вороха с решет осуществляют в пяти зонах. Для этого под решетом (по всей его длине) устанавливали четыре емкости (рис. 3.14), а пятая емкость была установлена на выходе вороха из кожуха элеватора. Таким образом, суммарная масса вороха в первых четырех емкостях представляет собой объем прохода сквозь отверстия решета, а в пятой емкости накапливался сход с него. Вследствие этого становится возможным определить закономерность распределения прохода вороха сквозь отверстия решета по его длине.



Рисунок 3.14 – Зерновой ворох, прошедший сквозь отверстия решетчатого днища

Кинематическая схема привода экспериментальной установки, имитирующей наклонную камеру комбайна, имеет следующий вид (рис. 3.15).

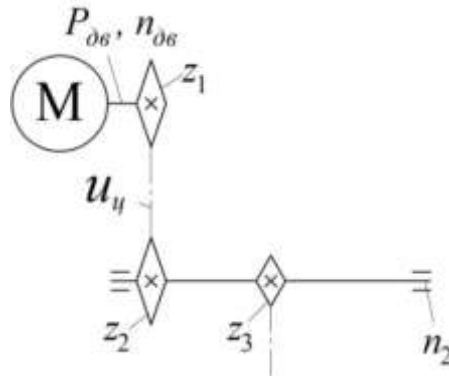


Рисунок 3.15 – Кинематическая схема экспериментальной установки, имитирующей наклонную камеру зерноуборочного комбайна

Привод экспериментальной установки осуществлялся посредством электродвигателя АИР80В4У3 мощностью  $P_{06}=1,5$  кВт и частотой вращения  $n_{06}=1390$  мин<sup>-1</sup>. При одинаковом числе зубьев ведущей и ведомой звездочки  $z_1=z_2=18$  передаточное число цепной передачи составило  $u_u=z_2/z_1=1$ . Число зубьев приводной звездочки скребкового колосового элеватора равно  $z_3=7$ , а шаг цепи  $p=38,1$  мм (рис. 3.15).

Скорость транспортера экспериментальной установки принимали равной скорости цепи элеватора и устанавливали через частоту вращения на приводном валу [70, 72]

$$n_2 = \frac{v_{mp} \cdot 60 \cdot 10^3}{z_3 \cdot p}, \quad (3.2)$$

где  $v_{mp}$  – скорость транспортера колосового элеватора, м/с;

$z_3$  – число зубьев приводной звездочки скребкового колосового элеватора;

$p$  – шаг цепи, мм.

Частота вращения вала электродвигателя задавалась посредством частотного преобразователя и рассчитывалась по следующей формуле

$$n_{06} = n_2 \cdot u_u. \quad (3.3)$$

В эксперименте использовали ворох контролируемого состава, параметры которого были определены ранее при испытании очесывающего

устройства на уборке озимой пшеницы сорта «Московская 39» [165]. В течение примерно одной секунды в приемную часть элеватора подавалась навеска вороха (при содержании в нем 80% свободного зерна пшеницы сорта «Московская 56») массой около одного килограмма. При ширине экспериментального решета 150 мм подача (в пересчете на полную ширину наклонной камеры и молотилки комбайна) соответствовала 10 кг/с. Эксперимент проводили при скорости транспортера равной 3 м/с, что соответствует кинематическим параметрам плавающих транспортеров большинства современных зерноуборочных комбайнов [102, 112, 283, 284]. Влажность зерна находилась в пределах 13% (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ по ГОСТ 13586.5-2015, приложение Д).

### **3.4.1 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПЛАВАЮЩЕГО ТРАНСПОРТЕРА НА СЕПАРИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ НАКЛОННОЙ РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

С целью исследования влияния скорости плавающего транспортера на сепарирующую способность решетчатого днища и определения его оптимальных параметров, был проведен соответствующий эксперимент. Он выполнялся по методике, описанной в разделе 3.4.

Исследования производились на пшенице сорта «Московская 56». Влажность зерна составляла порядка 13% (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ). Скорость движения транспортера имела шесть уровней варьирования в пределах 0,5-3,0 м/с. Максимальное значение выбрано в соответствии со скоростью плавающего транспортера наклонной камеры большинства современных зерноуборочных комбайнов [102, 112, 283, 284]. Угол наклона экспериментальной установки к горизонту был принят равным 45° [137]. Подача очесанного зернового вороха составляла 1 кг/с при содержании в нем 80% свободного зерна. Длина съемного решетчатого днища равнялась 920 мм, а ее прямоугольные

отверстия имели размеры  $160 \times 8$  мм, полученные при проведении предварительных экспериментов [154, 177]. При проведении серии экспериментов последовательность изменения скорости транспортера была случайной.

В качестве выходного параметра было принято количество свободного зерна прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища экспериментальной установки. Каждый вариант опыта проведен с пятикратной повторностью. Таким образом, всего было учтено и обработано 30 опытов.

Массу проходовой и сходовой фракций определяли на электронных весах Supra BSS-4076. Частоту вращения на приводном валу колосового элеватора контролировали посредством лазерного тахометра DT-2234C<sup>+</sup> [174].

### **3.4.2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ОТВЕРСТИЙ НА СЕПАРИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ РЕШЕТЧАТОГО ДНИЩА**

Следующей оптимизационной задачей, которую пришлось решать при разработке перфорированного днища наклонной камеры, является исследование влияния пространственной ориентации ее отверстий на интенсивность сепарации свободного зерна. С этой целью был спланирован и осуществлен соответствующий эксперимент. Он выполнялся по методике, описанной в разделе 3.4.

Исследования производились на пшенице сорта «Московская 56». Влажность зерна составляла порядка 13% (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ по ГОСТ 13586.5-2015). Скорость движения транспортера 3 м/с и угол его наклона к горизонту  $45^\circ$  соответствовали аналогичным параметрам работы для большинства современных зерноуборочных комбайнов [102, 112, 283, 284].

Угол наклона отверстий решетчатого днища имел семь уровней варьирования в пределах  $0-90^\circ$  (рис. 3.16). При проведении серии экспериментов последовательность изменения угла наклона отверстий была случайной.

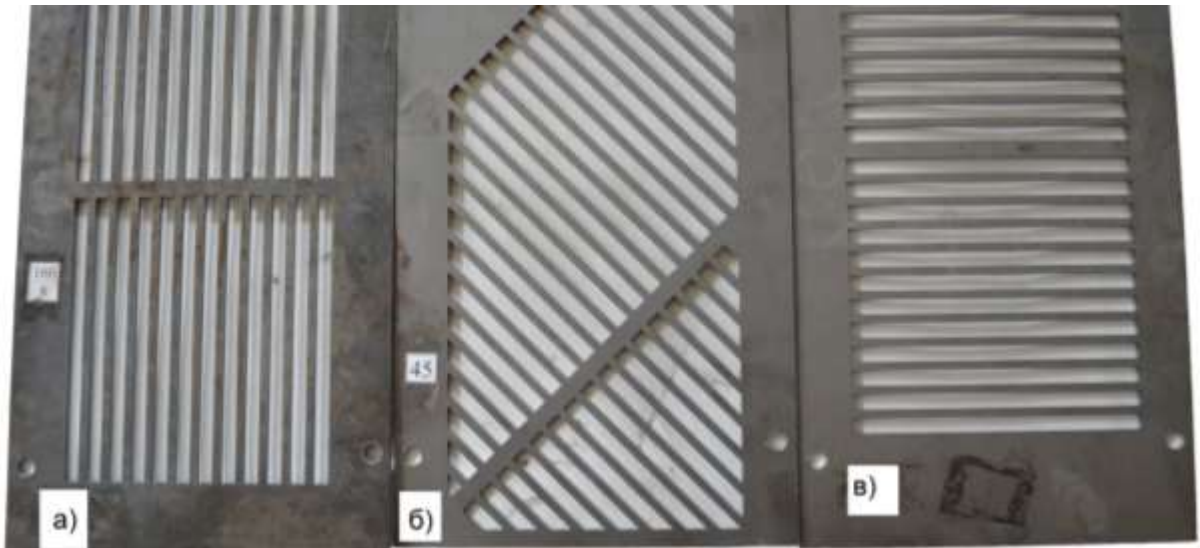


Рисунок 3.16 – Набор сменных решетчатых днищ экспериментальной установки с углом наклона отверстий: а)  $0^\circ$ ; б)  $45^\circ$ ; в)  $90^\circ$

Подача очесанного зернового вороха составляла порядка  $1 \text{ кг/с}$  при содержании в нем 80% свободного зерна. Длина съемного решетчатого днища равнялась  $920 \text{ мм}$ , а ее прямоугольные отверстия имели размеры  $160 \times 8 \text{ мм}$ , полученные при проведении предварительных экспериментов [154, 177].

В качестве выходного параметра было принято количество свободного зерна прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища экспериментальной установки. Для исключения влияния на выходной параметр эксперимента площади «живого сечения» отверстий решетчатого днища, отклонение ее величины не превышало  $\pm 0,5\%$ . Каждый вариант опыта проведен с пятикратной повторностью. Таким образом, всего было учтено и обработано 35 опытов.

### **3.5 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА СЕТЧАТОЙ ЯЧЕИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Выделить свободное зерно из очесанного вороха можно разными способами [2-11, 154, 198]. В частности, наклонную камеру очесывающего адаптера можно снабдить специальным решетчатым днищем, через продолгова-

тые отверстия которого зерно и мелкие примеси (полова и частично измельченная солома) должны просыпаться вниз, где смонтировано дополнительное устройство, осуществляющее их подачу непосредственно на очистку минуя молотильную камеру [199]. Результаты проведенных лабораторных экспериментов убедительно свидетельствуют о том, что на комбайнах семейства «Полесье» длина наклонной камеры (при оптимальном сочетании длины и ширины отверстий в ее днище) достаточна для почти стопроцентного выделения свободного зерна из очесанного зернового вороха [155-157].

Несмотря на принципиальную возможность осуществления этого технологического процесса, присутствуют и негативные моменты. В частности, модернизированная наклонная камера становится излишне сложной и громоздкой. Вес ее конструкции становится чрезмерным, как с точки зрения опасного уменьшения давления на управляемые (задние) колеса, так и с точки зрения прочности остова молотилки.

Между тем, возможности предварительного выделения свободного зерна при очесе далеко не исчерпаны использованием для этой цели, модернизированной наклонной камеры с решетчатым днищем. Одним из перспективных вариантов решения указанной задачи является использование транспортера 1, смонтированного между наклонной камерой 2 и молотилкой 3, содержащего два барабана 4 и 5 и бесконечное сетчатое ячеистое полотно 6 (рис. 3.17) [206].

При поступлении зернового вороха 7 на сетчатый транспортер 1 свободное зерно 8 и мелкие примеси (полова и частично измельченная солома) должны под действием силы тяжести проходить сквозь ячейки полотна 6, попадая затем непосредственно на транспортную доску 9 и далее на систему очистки. При этом в молотильное устройство 3 должны поступать только не прошедшие сквозь ячейки сетчатого полотна 6 недомолоченные колосья 10. Для интенсификации процесса сепарации, оси вращения барабанов 4 и 5 должны быть выполнены эксцентрично по отношению к их геометрическим осям. Наличие выступов 11 на барабанах исключает возможность проскаль-

звания сетчатого полотна, а также способствует очистке его ячеек от крупных компонентов очесанного зернового вороха, то есть, обеспечивает стабильность процесса сепарации [206].

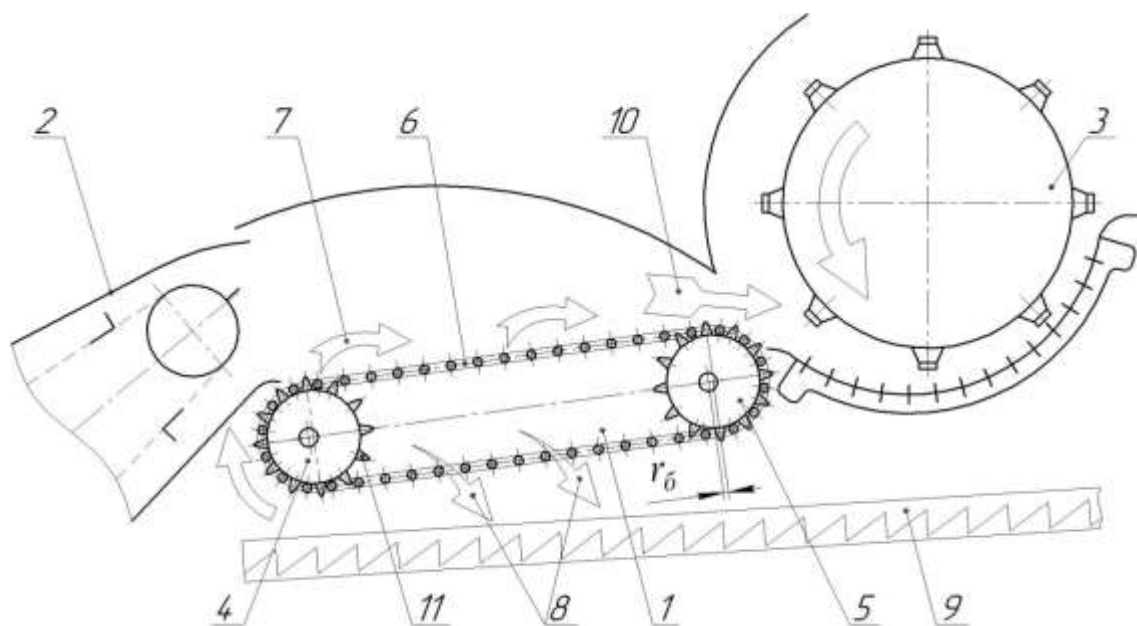


Рисунок 3.17 – Принципиальная схема зерноуборочного комбайна, оснащенного транспортером с сетчатым ячеистым полотном (Патент РФ № 2677349): 1 – сетчатый транспортер; 2 – наклонная камера; 3 – молотилка; 4 и 5 – барабан; 6 – сетчатое ячеистое полотно; 7 – зерновой ворох; 8 – свободное зерно; 9 – транспортная доска; 10 – недомолоченные колосья; 11 – выступы

Несмотря на то, что движущееся сетчатое полотно используется в конструкции зерноочистительных машин (например, в машинах предварительной очистки зерна МПО-50) [102, 283, 284], была необходима проверка работоспособности предлагаемой конструкции при сепарации очесанного зернового вороха специфического состава.

С этой целью была разработана экспериментальная установка (рис. 3.18), имитирующая работу предлагаемого устройства для предварительного выделения свободного зерна из очесанного вороха до его поступления в молотильную камеру. Она состоит из рамы 1, транспортера 2, емкости 3 для сбора свободного зерна 4 и емкости 5 для сбора вороха 6, идущего сходом. Транспортер 2 включает в себя два барабана 7 и 8 и сетчатое ячеистое полот-



но 9. При этом оси вращения барабанов 7 и 8 выполнены эксцентрично по отношению к их геометрическим осям, что обеспечивает интенсивное расслоение зернового вороха на фракции. С целью предотвращения бокового смещения сетчатого ячеистого полотна 9 при работе установки, боковые стороны барабанов 7 и 8 снабжены ребрами 10. Выступы 11 на цилиндрической поверхности барабанов 7 и 8 способствовали исключению проскальзывания сетчатого полотна 9, а также очищению его ячеек от крупных компонентов очесанного зернового вороха. Привод установки осуществлялся от электродвигателя 12 посредством двух цепных передач 13 и 14. Управление электродвигателем 12, а также настройка его частоты вращения выполнялись при помощи частотного преобразователя 15 Веспер Е2-8300 [178].

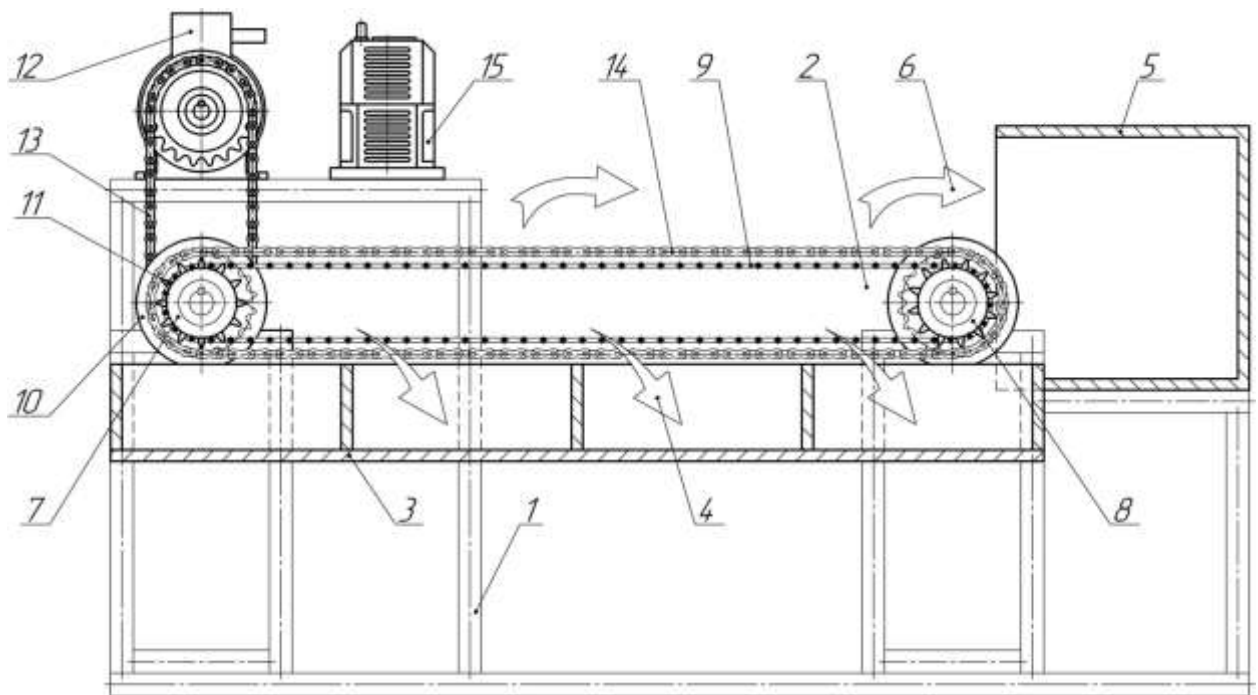


Рисунок 3.18 – Схема экспериментальной установки, содержащей сетчатый транспортер: 1 – рама; 2 – сетчатый транспортер; 3 – емкость для сбора свободного зерна; 4 – свободное зерно; 5 – емкость для сбора вороха, идущего сходом; 6 – ворох, идущий сходом; 7 и 8 – барабан; 9 – сетчатое полотно; 10 – ребра; 11 – выступы на поверхности барабанов; 12 – электродвигатель; 13 и 14 – цепная передача; 15 – частотный преобразователь

Кинематическая схема привода экспериментальной установки, содержащей сетчатый транспортер, имеет следующий вид (рис. 3.19).

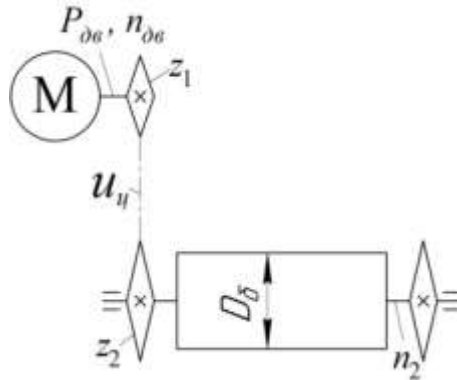


Рисунок 3.19 – Кинематическая схема экспериментальной установки, оснащенной транспортером с сетчатым ячеистым полотном

Привод экспериментальной установки осуществлялся посредством электродвигателя АИР80В4У3 мощностью  $P_{дв}=1,5$  кВт и частотой вращения  $n_{дв}=1390$  мин<sup>-1</sup>. При числе зубьев ведущей и ведомой звездочки  $z_1=18$  и  $z_2=20$  передаточное число цепной передачи равно  $u_u=z_2/z_1=1,11$ . Диаметр барабанов транспортера составляет  $D_б=110$  мм (рис. 3.19).

Скорость сетчатого транспортера задавали через частоту вращения приводного вала барабана [44, 45, 70]

$$n_2 = \frac{v_{с.мп} \cdot 60 \cdot 10^3}{\pi \cdot D_б}, \quad (3.4)$$

где  $v_{с.мп}$  – скорость сетчатого транспортера, м/с;

$D_б$  – диаметр барабанов транспортера, мм.

При проведении экспериментов частоту вращения вала электродвигателя настраивали посредством частотного преобразователя [70, 72]

$$n_{дв} = n_2 \cdot u_u = n_2 \cdot \frac{z_2}{z_1}, \quad (3.5)$$

где  $u_u$  – передаточное число цепной передачи;

$z_1$  и  $z_2$  – число зубьев ведущей и ведомой звездочки соответственно.

Величину эксцентриситета на валу барабанов (рис. 3.17) определяли из уравнения равновесия центробежной силы инерции ( $F_y = m \cdot \omega_6^2 \cdot r_6$ ) и силы тяжести ( $P = m \cdot g$ ), по следующему выражению

$$r_6 = \frac{g}{\omega_6^2} = \frac{g}{\left(\frac{\pi \cdot n_2}{30}\right)^2}, \quad (3.6)$$

где  $r_6$  – величина эксцентриситета на валу барабанов, м;

$g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\omega_6$  – угловая скорость на валу барабанов,  $\text{с}^{-1}$ ;

$n_2$  – частота вращения приводного вала барабана,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$m$  – масса тела, кг.

Так при частоте вращения барабанов  $n_2=521 \text{ мин}^{-1}$ , величина эксцентриситета составляет  $r_6=0,00329 \text{ м} \approx 3,3 \text{ мм}$ .

Все исследования проводились на пшенице сорта «Московская 56» при постоянной скорости сетчатого транспортера 3 м/с. Выбор значения скорости обусловлен тем, что она соответствует скорости плавающего транспортера наклонной камеры современного зерноуборочного комбайна [102, 112]. Ее уменьшение может повлечь за собой не только сгуживание хлебной массы перед транспортером, но и снижение пропускной способности комбайна в целом, а повышение, наоборот, ухудшит сепарацию вороха. Влажность зерна находилась в пределах 12% (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ по ГОСТ 13586.5-2015). Сетчатый транспортер смонтирован горизонтально, то есть угол его наклона к горизонту был равен нулю. Подача вороха в устройство составляла 1 кг/с при содержании в нем 80% свободного зерна. Длина транспортера составляла 2 м (рис. 3.20), а ячейки сетчатого полотна имели размеры 17×15 мм (рис. 3.21).

Опыты выполняли следующим образом. При выходе электродвигателя на заданную частоту вращения на сетчатый транспортер подавалась навеска из очесанного зернового вороха. Силы инерции увлекали за собой зерновой во-

рох и перемещали его вдоль сетчатого транспортера, где и происходил процесс предварительной сепарации.



Рисунок 3.20 – Экспериментальная установка, содержащая сетчатый транспортер

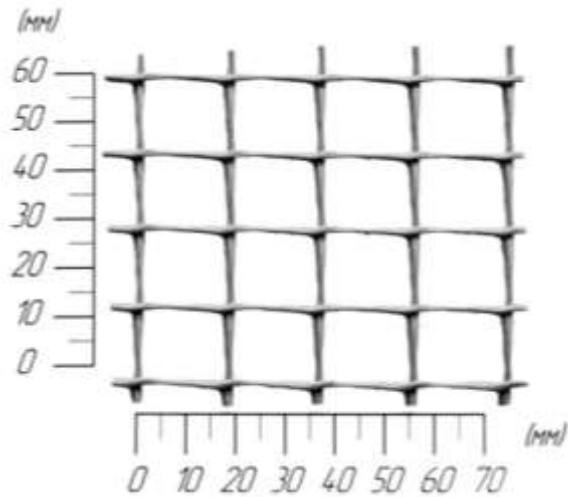


Рисунок 3.21 – Фрагмент сетчатого ячеистого полотна

После поступления хлебной массы в емкость для сбора вороха (рис. 3.22), экспериментальная установка отключалась. Емкость для сбора зернового вороха снимали, а сам ворох подвергали всесторонним исследованиям. В частности определяли количество свободного зерна, половы и соломы, прошедшей сквозь ячейки сетчатого транспортера.



Рисунок 3.22 – Зерновой ворох, прошедший сквозь ячейки сетчатого полотна

Зерновой ворох, прошедший сквозь ячейки сетчатого полотна, подвергался взвешиванию на электронных весах Supra BSS-4076. Частоту вращения на валу барабана сетчатого транспортера контролировали посредством лазерного тахометра DT-2234C<sup>+</sup> [174].

Опыт был проведен с пятикратной повторностью. Таким образом, всего было получено пять опытных точек.

### **3.5.1 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ СЕТЧАТОГО ТРАНСПОРТЕРА НА ЕГО СЕПАРИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ**

Поскольку предварительное выделение свободного зерна из очесанного зернового вороха посредством сетчатого транспортера на практике удалось осуществить только в последние годы [178], то не все параметры нового технологического процесса изучены до конца. В частности, при работе зерно-

уборочного комбайна в агрегате с очесывающим адаптером целесообразно оценить влияние скорости сетчатого транспортера на его сепарирующую способность по отношению к свободному зерну. С этой целью был спланирован и проведен соответствующий эксперимент. Он выполнялся по методике, описанной в разделе 3.5.

Все исследования проводились на пшенице сорта «Московская 56». Влажность зерна составляла порядка 12% (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ по ГОСТ 13586.5-2015). Скорость движения транспортера имела пять уровней варьирования в пределах 3-5 м/с. Минимальное значение соответствует скорости плавающего транспортера наклонной камеры зерноуборочного комбайна, максимальное – скорости на входе в молотильную камеру [102, 112, 283, 284]. Масса навески очесанного зернового вороха составляла 1 кг при содержании в нем 80% свободного зерна. Длина сетчатого транспортера равнялась 2 м, а его прямоугольные ячейки имели размеры 17×15 мм (рис. 3.21).

При проведении серии экспериментов последовательность изменения скорости движения сетчатого транспортера была случайной.

Зерно, прошедшее сквозь отверстия сетчатого полотна, подвергалось взвешиванию. Каждый вариант опыта проведен с пятикратной повторностью. Таким образом, всего было учтено и обработано 25 опытов [180].

### **3.5.2 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ОТВЕРСТИЙ СЕТЧАТОГО ТРАНСПОРТЕРА НА ЕГО СЕПАРИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ**

Для оценки влияния скорости сетчатого транспортера и размеров его ячеек (рис. 3.23) на сепарирующую способность устройства по свободному зерну был проведен соответствующий эксперимент.

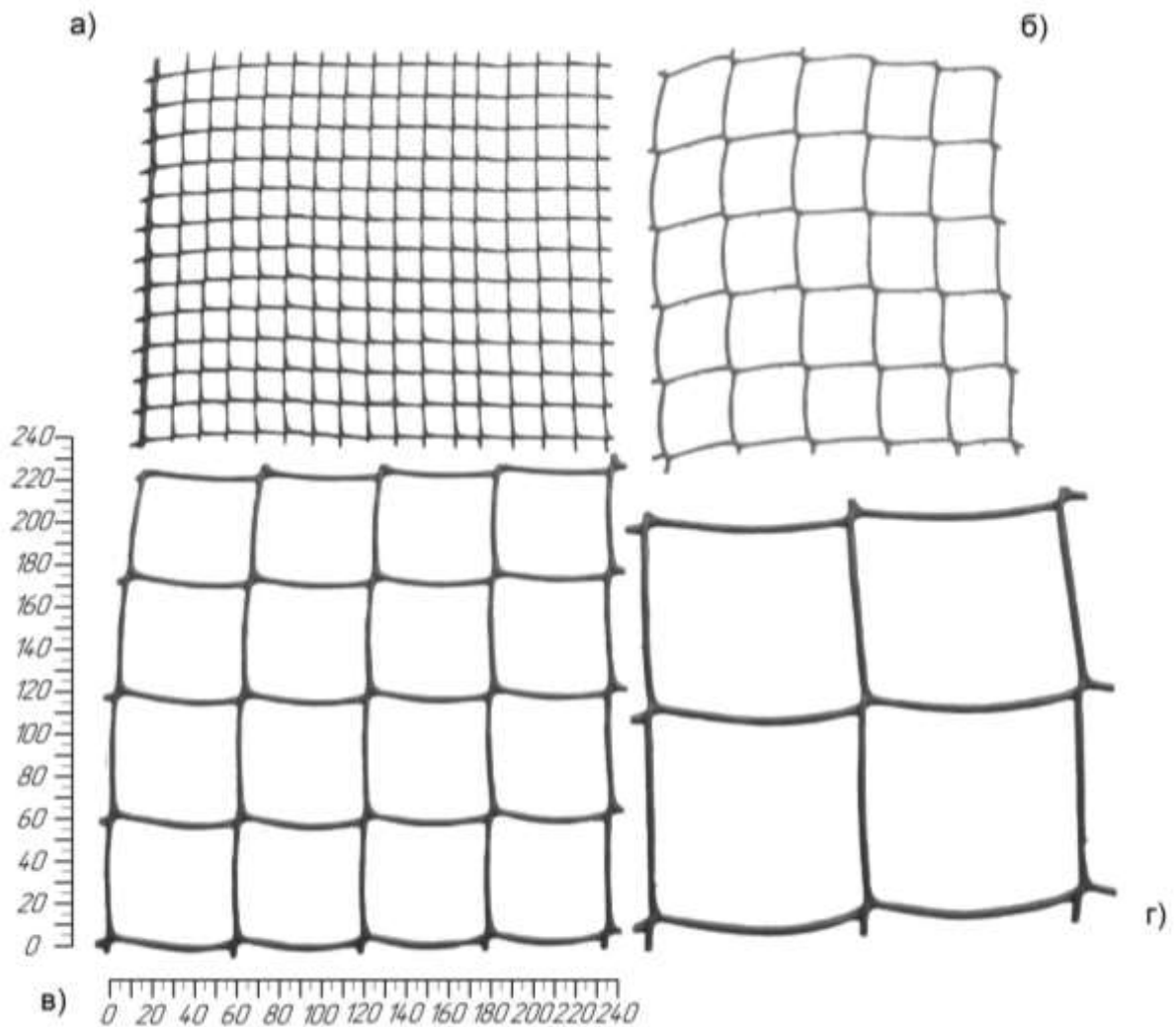


Рисунок 3.23 – Фрагмент сетчатого полотна с размерами ячеек: а)  $17 \times 15$  мм; б)  $35 \times 35$  мм; в)  $60 \times 60$  мм; г)  $90 \times 100$  мм

Все исследования проводились на пшенице сорта «Московская 56». Влажность зерна составляла порядка 12% (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ) [65]. Сетчатый транспортер был смонтирован горизонтально. Его линейная скорость 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 [102, 112, 283, 284]. Подача очесанного зернового вороха составляла 1 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. 3.23).

В качестве выходного параметра было выбрано количество свободного зерна, половы и соломы, прошедшей сквозь ячейки сетчатого транспортера. Каждую проходную фракцию зернового вороха отделяли от остальной массы на ситах с последующим взвешиванием на электронных весах Supra BSS-4076. Частоту вращения на валу барабана сетчатого транспортера контролировали посредством лазерного тахометра DT-2234C<sup>+</sup> [174].

Опыт был спланирован как полнофакторный и выполнялся согласно матрице планирования эксперимента (табл. 3.6). Последовательность изменения площади ячеек сетчатого транспортера (получена умножением ее размеров) в первой серии опытов была возрастающей, во второй – нисходящей и в третьей – случайной. Опыт был проведен с трехкратной повторностью. Таким образом, всего было учтено и обработано 36 опытных точек [158].

Таблица 3.6 – Матрица планирования лабораторного эксперимента

Номер опыта	Факторы	
	Скорость транспортера $v_{с.тр}, м/с$	Площадь ячейки полотна $S_{яч}, мм^2$
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



### 3.6 МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Среднее значение длины колоса определено по формуле [31]

$$l_{\text{кол.ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N l_{\text{кол}i}}{N_{\text{кол}}}, \quad (3.7)$$

где  $l_{\text{кол}i}$  – длина  $i$ -го колоса, мм;

$N_{\text{кол}}$  – количество отобранных колосков (повторность опытной информации).

Среднеквадратическое отклонение равно [57]

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (3.8)$$

где  $D$  – дисперсия, мм<sup>2</sup>:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N (l_{\text{кол}i} - l_{\text{кол.ср}})^2}{N_{\text{кол}} - 1}. \quad (3.9)$$

Коэффициент вариации найден по следующей формуле [32]

$$V = \frac{\sigma}{l_{\text{кол.ср}}} \cdot 100\%. \quad (3.10)$$

Значимость полученного уравнения регрессии проверяли по критерию Фишера, определяемому согласно зависимости

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2} \leq F_{\text{табл}}, \quad (3.11)$$

где  $S_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности (остаточная дисперсия), определяемая по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N - C} \cdot \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_n - \hat{Y}_n)^2 \leq F_{\text{табл}}, \quad (3.12)$$

где  $N$  – число опытов;

$m$  – количество повторностей;

$C$  – количество значимых коэффициентов регрессии;

$\bar{Y}_n$  – среднеарифметическое значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_n$  – расчетное значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$F_{табл}$  – табличное значение критерия Фишера под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости  $\alpha$ ;

$S^2$  – дисперсия воспроизводимости (общая дисперсия):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_n^2}{N}, \quad (3.13)$$

где  $S_n^2$  – построчная дисперсия параметра оптимизации;

$i$  – номер повторности опыта;

$N$  – число опытов.

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{Y}_{on} - \hat{Y}_{on})^2}{m-1}, \quad (3.14)$$

где  $\bar{Y}_{on}$  – среднеарифметическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_{on}$  – фактическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$m$  – количество повторностей в опыте.

Если неравенство соблюдается, то полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс, причем расчетное значение критерия Фишера устанавливается в зависимости от числа степеней свободы ( $\gamma_1 = (m-1) \cdot N$  и  $\gamma_2 = N-C$ ).

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА

Данные, полученные при исследовании параметров очесанного зернового вороха, обработаны с помощью программы «Excel» [50, 141, 290]. По результатам обработки установлено, что общее количество выделенного зерна составляет 82%. Эта величина хорошо согласуется с аналогичными данными, полученными при использовании серийно выпускаемой техники [124, 258]. 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.

Результаты расчетов формул (3.7-3.10) выполнены для длин колоса и стебля озимой пшеницы «Московская 39», и представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики рассеивания длины колоса и стебля озимой пшеницы «Московская 39»

Показатели	Длина колоса	Длина стебля
Среднее, мм	54,29	125,85
Дисперсия, мм <sup>2</sup>	491,40	8378,96
Среднеквадратическое отклонение, мм	22,18	91,58
Коэффициент вариации, %	40,85	72,77

В результате анализа данных установлено, что размеры длин колоса и стебля варьируют в широких пределах. При этом они носят случайный характер и подчиняются закону распределения Вейбулла (поскольку  $V > 30\%$ )

$$f(l_{\text{кол}}) = \frac{b_B}{a_B} \cdot \left( \frac{l_{\text{кол}}}{a_B} \right)^{b_B-1} \cdot e^{-\left( \frac{l_{\text{кол}}}{a_B} \right)^{b_B}}, \quad (4.1)$$

где  $a_B$  и  $b_B$  – параметры распределения Вейбулла;

$l_{кол}$  – случайная величина длины колоса, мм;

$e=2,72$  – основание натурального логарифма.

По результатам обработки экспериментальных данных (приложение Е) построены теоретическая кривая по выравнивающим частотам и полигон наблюдаемых частот (рис. 4.1). Сравнение графиков наглядно показывает, что построенная теоретическая кривая удовлетворительно отражает данные наблюдения.

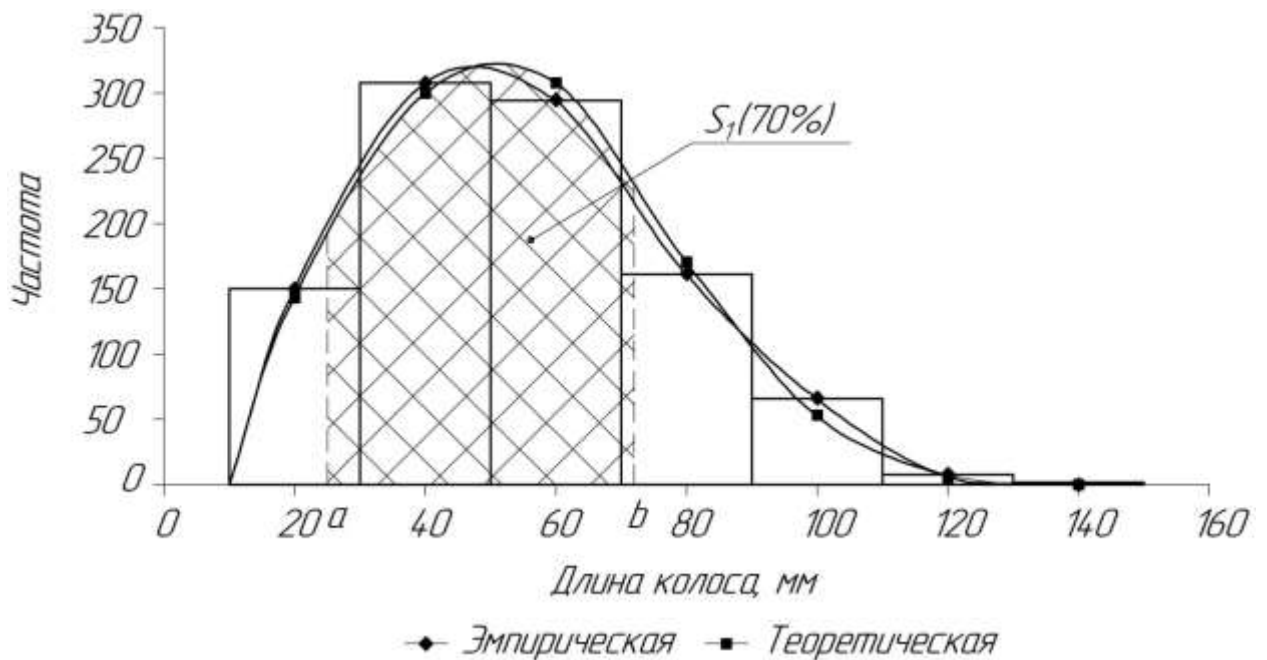


Рисунок 4.1 – Эмпирическая и теоретическая кривые распределения длины колоса

Расхождение эмпирической и теоретической кривых распределения длины колоса выполняли по критерию Пирсона. Поскольку фактическое (расчетное) значение критерия Пирсона меньше его критической (табличной величины)  $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$  ( $5,21 < 9,5$ ) (приложение Е), то расхождение эмпирических и теоретических частот незначимо. Следовательно, данные наблюдений согласуются с гипотезой о том, что распределение величины длины колоса происходит по закону Вейбулла.

Оставшиеся невымолоченными зерна располагаются неравномерно по длине колоса. Поскольку размеры колосьев варьируют в широких пределах, то целесообразно оценивать координату каждого зерна, оставшегося невымолоченным, по отношению к относительной длине колоса, принятой за 100%. В результате получен график распределения частоты появления невымолоченных зерен по длине колоса (рис. 4.2).

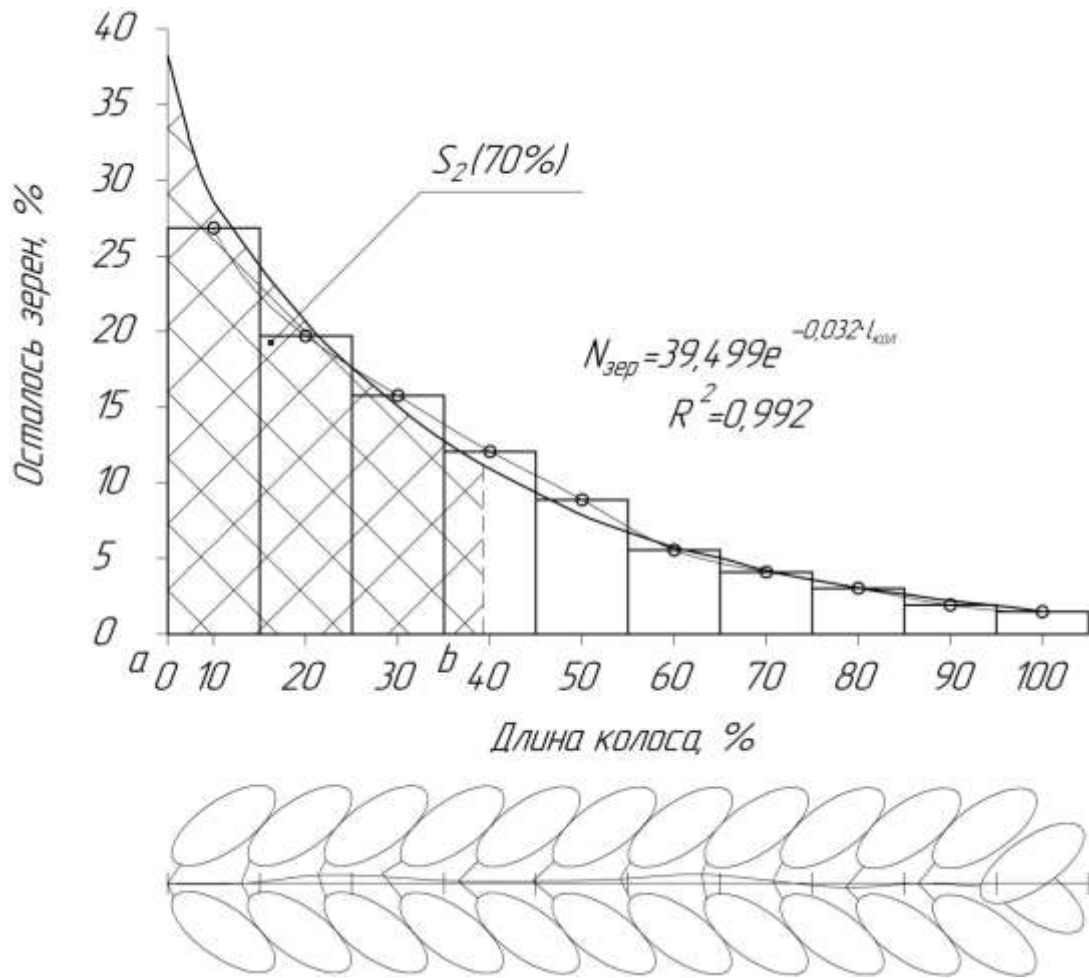


Рисунок 4.2 – Распределение невымолоченных зерен по длине колоса

Наиболее адекватным уравнением (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,992$ ), позволяющим аппроксимировать график такого типа, является экспоненциальная кривая

$$N_{\text{зер}} = 39,499 \cdot e^{-0,032 \cdot l_{\text{кол}}}, \quad (4.2)$$

где  $l_{\text{кол}}$  – расстояние от нижнего основания колоса, в процентах от его длины.

Характер кривой (рис. 4.2) свидетельствует о том, что большая часть невымолоченных зерен сосредоточена в нижней части колоса, вблизи места его крепления к стеблю. 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. В связи с этим целесообразно предварительно ориентироваться на исходные параметры распределения зерен по длине, характерные для большинства колосьев. Для этого определим долю длины усредненного колоса, содержащую 70% оставшихся в нем зерен.

Известно, что площадь под кривой соответствует общему числу невымолоченных зерен всей генеральной совокупности. Тогда интеграл от функции (4. 2) численно равен площади под этой кривой. Решив это уравнение с помощью программы «Mathcad» [104, 216], находим численное значение указанной площади

$$S_2(100\%) = \int_a^b f(l_{\text{кол}}) dl_{\text{кол}} = \int_0^{100} 39,499 \cdot e^{-0,032 \cdot l_{\text{кол}}} dl_{\text{кол}} = 1184,029, \quad (4.3)$$

где  $a$  и  $b$  – пределы интегрирования (рис. 4.2).

Следовательно, при определении длины колоса, содержащей 70% оставшихся зерен необходимо вычислить площадь, соответствующую объему этой выборки.

Площадь, соответствующую 70%-ному объему выборки определим как

$$S_2(70\%) = S_2(100\%) \cdot 0,70 = 1184,029 \cdot 0,70 = 828,82. \quad (4.4)$$

Задавшись значением нижнего предела интегрирования ( $a=0$ ), определен верхний предел интегрирования ( $b$ ), соответствующий величине  $S_2=828,82$

$$b = \frac{1,112}{0,032} = 34,78. \quad (4.5)$$

Следовательно, 70% оставшихся в колосе зерен будут сосредоточены на 34,78% его длины (рис. 4.2), считая от нижнего основания. (Расчеты выполнены в программе «Mathcad» и представлены в приложении Ж).

При оптимизации параметров домолачивающего устройства целесообразно не ориентироваться, как на весь диапазон возможных длин колосьев, так и на их среднюю длину. В первом случае могут быть получены противоречивые результаты, далекие от оптимума. Во втором – оптимум, полученный при единственном значении исходного параметра, может быть не актуальным для большей части совокупности колосьев.

В связи с этим, в качестве компромиссного решения (как и в предыдущем случае) целесообразно ориентироваться на учет параметров 70% всех колосьев. Поскольку площадь под кривой (рис. 4.1) соответствует вероятности попадания в выборку всех имеющихся в наличии колосьев, входящих в генеральную совокупность, то она должна быть равна 1, то есть

$$S_1 = \int_a^b f(l_{\text{кол}}) dl_{\text{кол}} = \int_{10}^{150} \frac{2,6}{60,96} \cdot \left( \frac{l_{\text{кол}}}{60,96} \right)^{2,6-1} \cdot e^{-\left( \frac{l_{\text{кол}}}{60,96} \right)^{2,6}} dl_{\text{кол}} = 1. \quad (4.6)$$

Аналогично расчетам, выполненным выше (4.3-4.5), были определены пределы интегрирования графика функции, описывающей распределение Вейбулла. При этом считали, что выборка распределена симметрично относительно среднего значения длины колоса, равной 54 мм. Установлено, что 70%-ному объему выборки соответствует длина колосьев, находящаяся в пределах 25-72,7 мм (приложение 3).

При анализе распределения длины стебля по частотам, отмечена высокая степень нестабильности процесса, поскольку коэффициент вариации равен 72,77% (табл. 4.1). Большая часть стеблей пшеницы, оторванных при очесе от корня вместе с колосом, имеет длину, варьирующую в пределах 15-480 мм (рис. 4.3). При этом среднее значение длины стебля равно 125,85 мм.

Аналогично расчетам, выполненным для двух предыдущих параметров, площадь под кривой распределения длины стебля равна

$$S_3 = \int_a^b f(l_{\text{cm}}) dl_{\text{cm}} = \int_{15}^{480} 754,6 \cdot e^{-0,0101 \cdot l_{\text{cm}}} dl_{\text{cm}} = 63623,526. \quad (4.7)$$

Площадь, соответствующая 70%-ному объему выборки, определена как

$$S_3(70\%) = S_3(100\%) \cdot 0,70 = 63623,526 \cdot 0,70 = 44536,468. \quad (4.8)$$

Задавшись значением нижнего предела интегрирования ( $a=15$ ), установлено значение верхнего предела (рис. 4.3). При 70%-ном объеме выборки длина стеблей пшеницы сорта «Московская 39», оторванных при очесе от корня вместе с колосом, должна находиться в пределах 15-132,12 мм (приложение II) [104, 216].

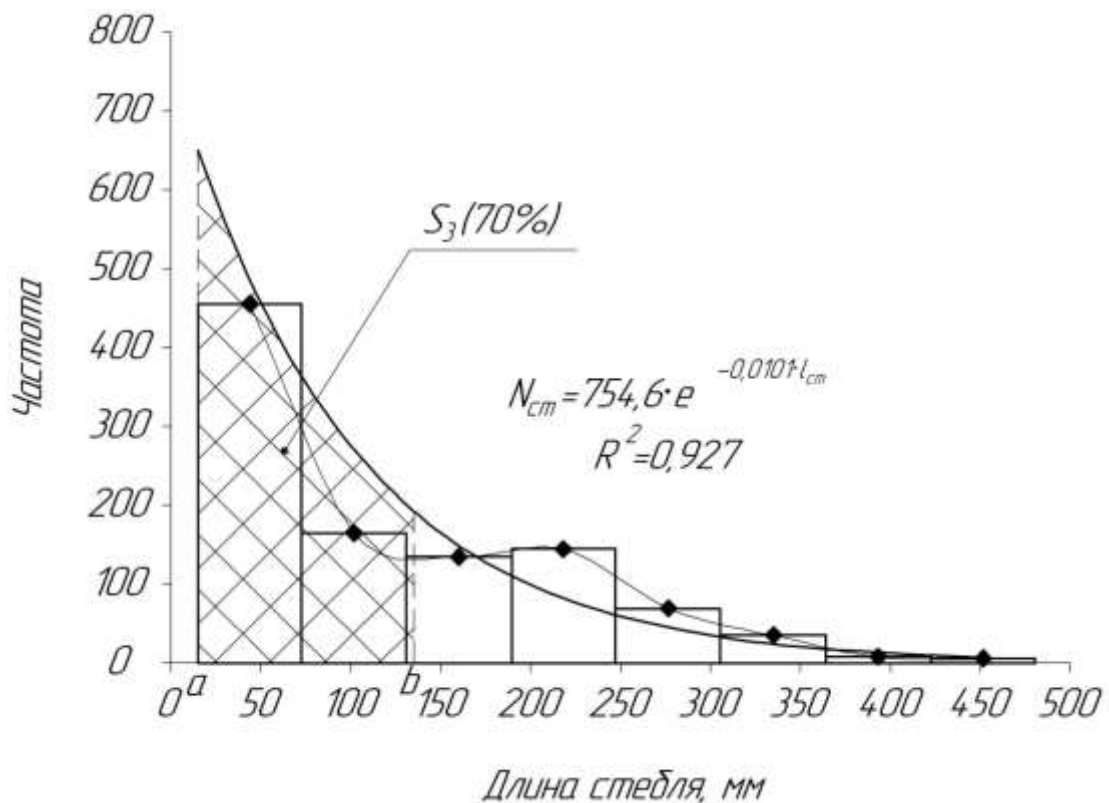


Рисунок 4.3 – Распределение длины стебля пшеницы по частотам

Таким образом, домолачивающее устройство, предназначенное для повторного воздействия на колосья, содержащие зерна, невымолочные при очесе, должно быть адаптировано к следующим параметрам вороха: длина колосьев – 25-72 мм; длина стеблей – 15-132 мм, 70% зерен сосредоточены на 34,78% длины колоса, считая от его основания.



## 4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗЕРНА ИЗ КОЛОСА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЖЕНИЯ СВЯЗЕЙ

Данные, полученные при исследовании молотильного устройства, реализующего поперечный колебательный характер нагружения связей зерна с колосом, обработаны в программе «Excel» [50, 141, 290]. По ним получена таблица 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты исследования выделения зерна из колоса при поперечном колебательном характере нагружения связей

Зазор в молотильной камере $Z_{\text{мол}}, \text{мм}$	Количество нагружений $n_{\text{наг}}, \text{шт}$	Выделено зерен $K_{\text{зер}}, \%$
4	1	82,13
4	2	87,93
4	3	91,37
4	4	94,57
4	5	97,90
4	6	100,00
6	1	68,03
6	2	69,80
6	3	73,37
6	4	76,03
6	5	81,73
6	6	84,77
6	7	87,60
6	8	94,40
6	9	100,00
8	1	69,17
8	2	69,63
8	3	74,50
8	4	76,13
8	5	82,10
8	6	82,87
8	7	84,47
8	8	86,53
8	9	91,03
8	10	98,23
8	11	100,00

По данным таблицы 4.2 в программе «STATISTICA» [30, 50, 265] построена поверхность отклика, характеризующая зависимость доли выделенных зерен от параметров процесса (рис. 4.4).

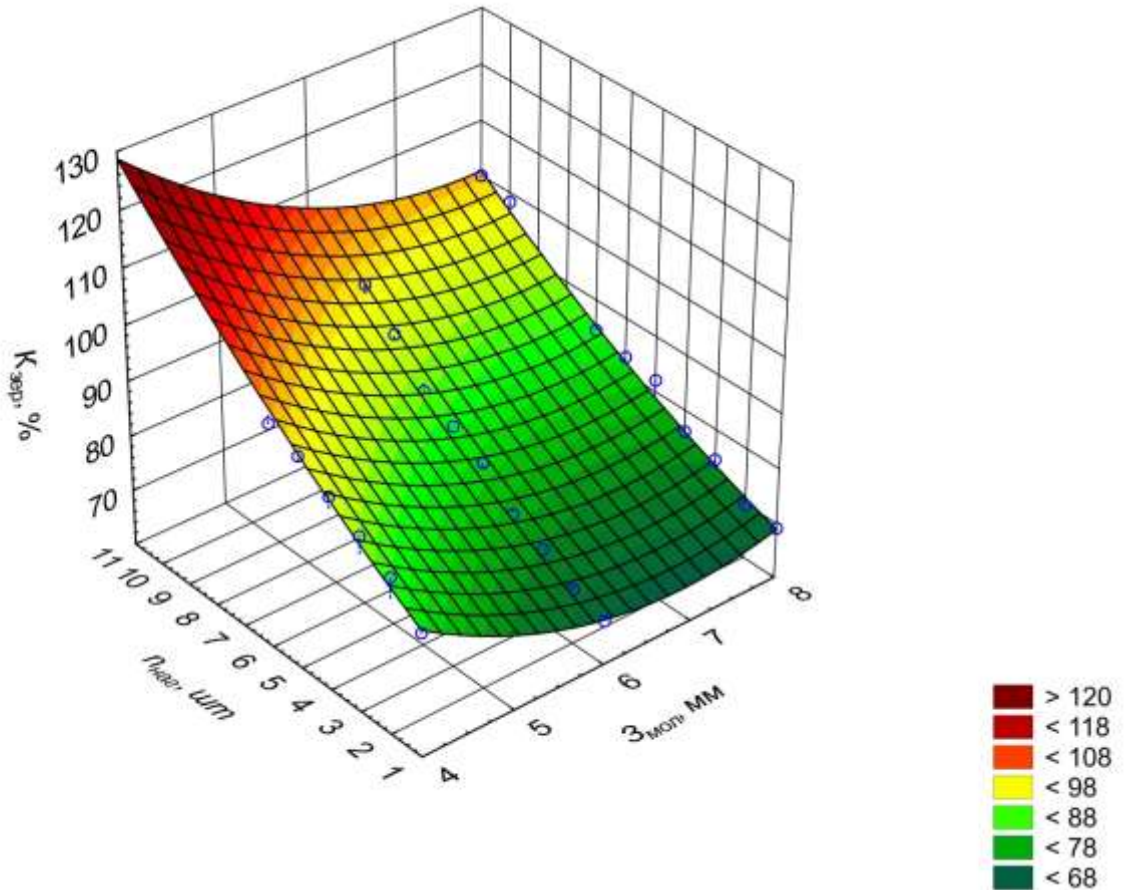


Рисунок 4.4 – Поверхность отклика при взаимодействии факторов: количества нагружений связей зерна с колосом и зазора в молотильной камере

После исключения всех незначимым коэффициентов пошаговым методом, уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер зависимостей (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,969$ ), имеет следующий вид

$$K_{\text{зер}} = 152,79 - 24,953 \cdot Z_{\text{мол}} + 3,421 \cdot n_{\text{наг}} + 1,710 \cdot Z_{\text{мол}}^2, \quad (4.9)$$

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

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

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

Оценку значимости уравнения регрессии выполняли по критерию Фишера. Поскольку фактическое значение критерия Фишера меньше его табличной величины  $F_{факт} < F_{табл}$  ( $0,84 < 1,75$ ), то полученное уравнение регрессии является статистически значимым. Значимость коэффициентов регрессии оценивали по  $t$ -критерию Стьюдента (приложение К).

Анализ уравнения регрессии (4.9) показывает, что основное влияние на выделение зерна из колоса при поперечном колебательном характере нагружения связей оказывает зазор в молотильной камере. Результаты лабораторного эксперимента свидетельствуют о том, что его оптимальным параметром является величина 4 мм (рис. 4.4). В таком положении молотильное устройство обеспечивает стопроцентное выделение зерна из колоса за 6 движений. Дробление зерна при этом не превышает 0,40% (рис. 4.5). Существенной разницы между зазорами 6 и 8 мм не установлено.

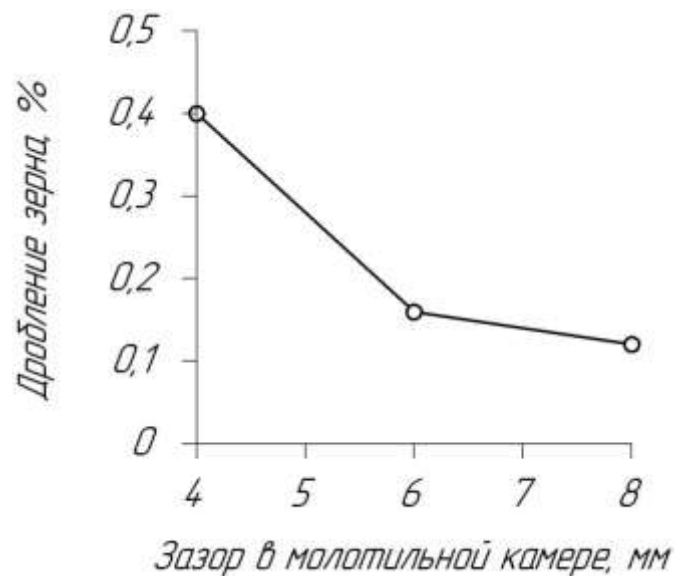


Рисунок 4.5 – Влияние зазора в молотильной камере на дробление зерна

Основным показателем, позволяющим оценить энергоемкость молотильного устройства, является работа, затраченная на выделение одного зерна из колоса [127, 244, 245]. Для ее вычисления использовали график (рис. 4.6), который был получен в программе «LabVIEW» при однократном нагружении связей зерна с колосом.

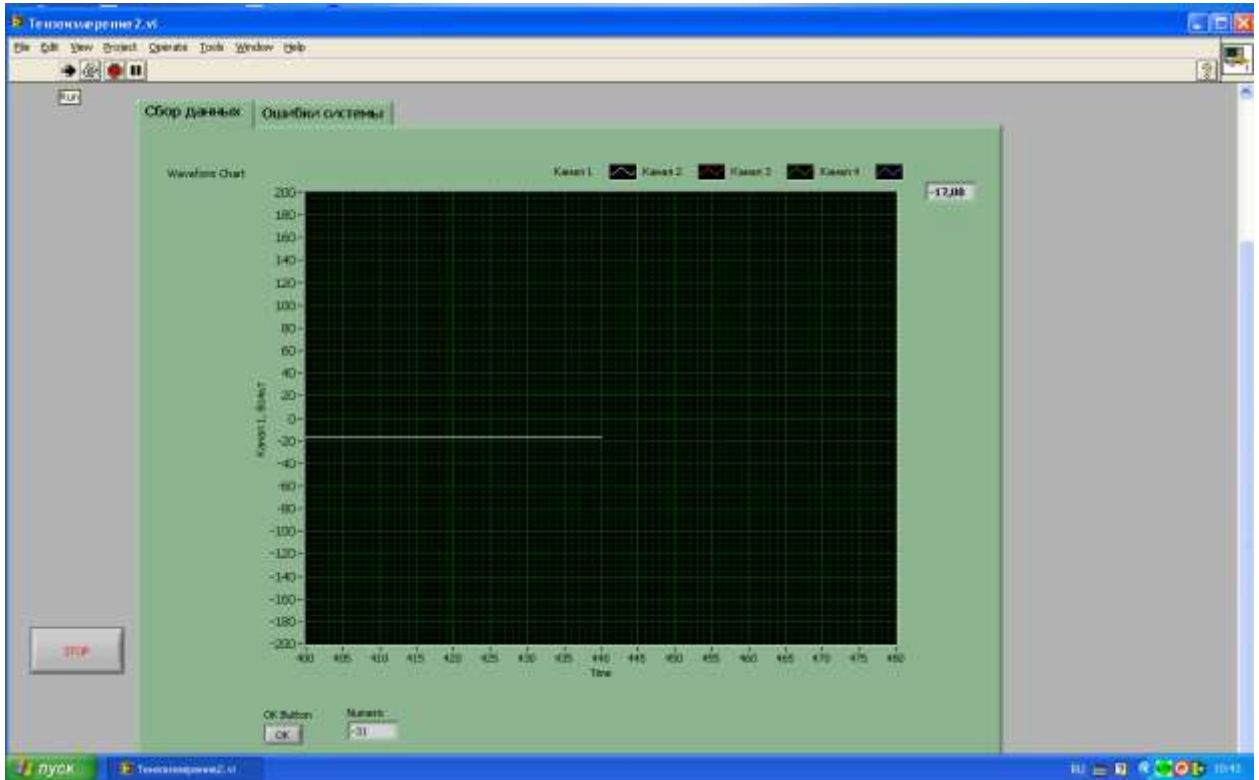


Рисунок 4.6 – График регистрации параметров аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в программе «LabVIEW»

Его дальнейшую обработку выполняли в программе «Excel» (рис. 4.7). Здесь по оси абсцисс отложено число экспериментальных точек, а по оси ординат – усилие, зафиксированное тензодатчиками. Далее единицы измерения по оси абсцисс были изменены на время цикла (обмолота). Для этого число экспериментальных точек соотносили с величиной дискретности сигналов АЦП, которая составляла 64 измерения в секунду.



Рисунок 4.7 – График нагружения связей зерна с колосом в программе «Excel»

Поскольку при проведении исследований сила оказалась не постоянной, а движение верхней площадки не прямолинейно, то работу, затраченную на выделение зерна из колоса, вычисляли через интеграл. В результате того, что движения верхней площадки имели характер гармонических колебаний ( $S_{nl}=A_{nl}\cdot\sin\varphi_{nl}$ ), то верхняя шкала (перемещение) оказалась неравномерной. После всех преобразований, график нагружения принял следующий вид (рис. 4.8).

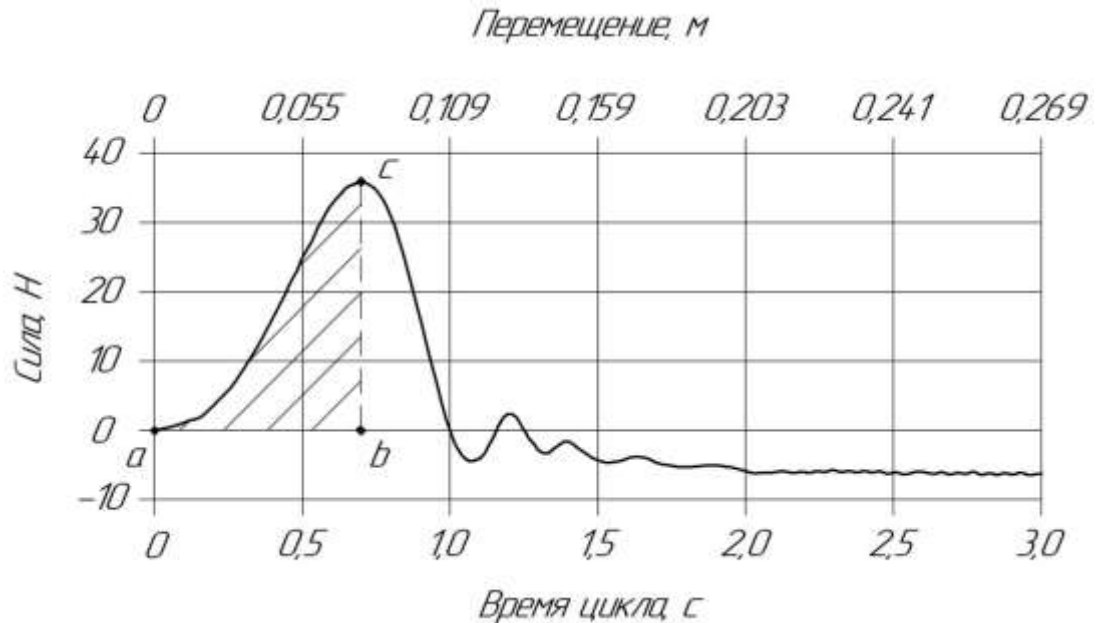


Рисунок 4.8 – К расчету энергоемкости обмолота зерна (при зазоре в молотильной камере  $Z_{\text{мол}}=8 \text{ мм}$ )

После перехода на равномерную шкалу перемещения работа, затраченная на разрушение связей зерна с колосом за одно движение, была вычислена как площадь заштрихованной фигуры  $abc$ . Тогда вычленив кривую  $ac$  из графика и аппроксимировав ее по перемещению (по равномерной шкале), получим следующее уравнение регрессии (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,988$ )

$$F = 1063,3 \cdot S_{nl}^2 + 442,11 \cdot S_{nl} - 2,469, \quad (4.10)$$

где  $F$  – сила,  $H$ ;

$S_{nl}$  – линейное перемещение верхней площадки,  $m$ .

В результате вычисления площади фигуры  $abc$  с помощью программы «Mathcad» [104, 216], имеем

$$A_{\text{зер}} = \int_a^b F(S_{nl}) dS_{nl} = \int_0^{0,07} (1063,3 \cdot S_{nl}^2 + 442,11 \cdot S_{nl} - 2,469) dS_{nl} = 1,03 \text{ Дж}, \quad (4.11)$$

где  $a$  и  $b$  – пределы интегрирования (рис. 4.8).

Разделив полученное значение на количество зерен, выделенных за одно движение площадки, окончательно получаем, что при зазоре молотильной камеры 4, 6 и 8 мм – работа, затрачиваемая на выделение одного зерна из колоса, составит 0,030, 0,032 и 0,035 Дж, соответственно (рис. 4.9).

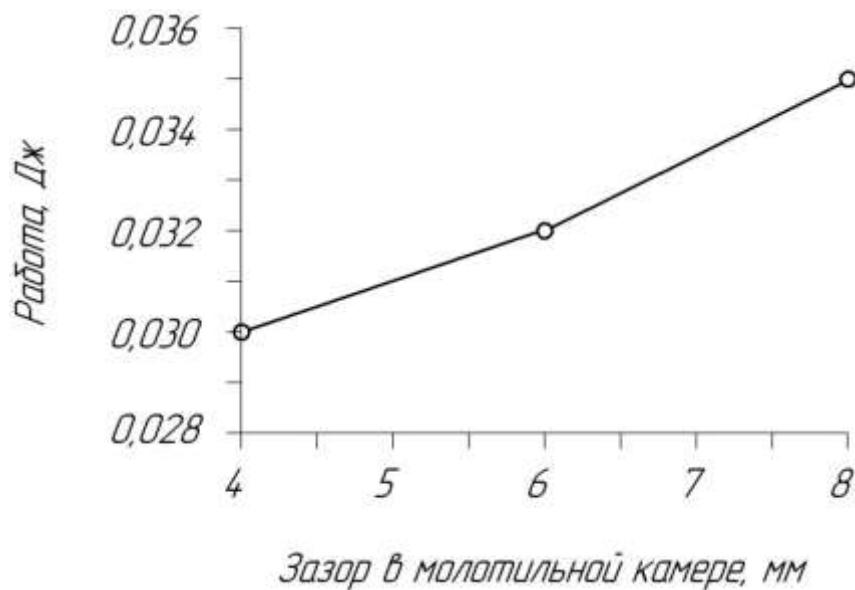


Рисунок 4.9 – Зависимость работы, необходимой для выделения из колоса одного зерна, от зазора в молотильной камере

Таким образом, минимальная энергоёмкость выделения зерна из колоса соответствует минимальному зазору в молотильной камере, равному 4 мм (рис. 4.9). При этом обеспечивается снижение энергоёмкости процесса по сравнению с зазором 8 мм в 1,25 раза. Существенной разницы между зазором 6 и 8 мм не установлено.

Для сопоставления полученных результатов с энергоёмкостью молотильного барабана бильного типа воспользуемся данными, характерными для много лет эксплуатируемого и подробно изученного комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10», также работающего на обмолоте пшеницы «Московская 56».

Согласно методике, предложенной Д.В. Скрипкиным [245], затраты энергии, необходимые для выделения зерна из колоса барабаном бильного типа, могут быть рассчитаны по следующей формуле

$$A_{\text{зер}} = \frac{K \cdot N_{\text{бар}} \cdot m_{\text{зер}}}{q \cdot \beta_{\text{зер}}}, \quad (4.12)$$

где  $K$  – коэффициент, устанавливающий долю мощности, расходуемой на привод барабана, приходящуюся непосредственно на выделение зерна из колоса,  $K=0,15 \dots 0,18$  [46, 227];

$N_{\text{бар}}$  – мощность на валу молотильного барабана (40% от общей мощности двигателя),  $\text{кВт}$ ;

$q$  – пропускная способность молотилки,  $\text{кг/с}$ ;

$m_{\text{зер}}$  – средняя масса одного зерна,  $\text{г}$ ;

$\beta_{\text{зер}}$  – доля массы зерен в ворохе.

При расчете использованы следующие исходные данные: мощность двигателя – 213  $\text{кВт}$  [112]; пропускная способность молотилки – 10  $\text{кг/с}$ ; мощность на валу молотильного барабана –  $213 \cdot 0,4 = 85,2 \text{ кВт}$ ; доля массы зерна в ворохе – 0,68; масса 1 зерна – 0,048  $\text{г}$  (определялась весовым методом в межкафедральной лаборатории Брянского ГАУ по ГОСТ 520-2014).

Подставив указанные данные в формулу, окончательно получаем

$$A_{\text{зер}} = \frac{0,15 \cdot 85,2 \cdot 0,048}{10 \cdot 0,68} = 0,09 \text{ Дж}. \quad (4.13)$$

Таким образом, практическая реализация в конструкции молотильного устройства зерноуборочного комбайна поперечного колебательного характера нагружения связей зерен со стержнем колоса обеспечивает снижение энергоемкости процесса в 3 раза по сравнению с традиционным бильным барабаном. В связи с этим, наиболее актуальным направлением дальнейших исследований является оптимизация формы молотильной камеры и характера рифления рабочих органов, а также обоснование других конструктивных параметров молотильного устройства.

#### 4.2.1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА РИФОВ НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ МОЛОТИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Результаты исследований были обработаны в программе «Excel» [50, 141, 290]. По ним получена таблица 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты исследования влияния угла наклона рифов на выделение свободного зерна

Угол наклона рифов $\gamma_{риф}, град$	Количество движений $n_{наг}, шт$	Выделено зерен $K_{зер}, \%$
0	1	82,13
0	2	87,93
0	3	91,37
0	4	94,57
0	5	97,90
0	6	100,00
15	1	83,93
15	2	89,27
15	3	92,40
15	4	95,20
15	5	97,77
15	6	100,00
30	1	78,17
30	2	89,73
30	3	85,53
30	4	95,80
30	5	98,50
30	6	100,00
45	1	87,87
45	2	91,47
45	3	93,60
45	4	95,80
45	5	97,13
45	6	100,00
60	1	66,87
60	2	74,27
60	3	83,20
60	4	86,53
60	5	91,80
60	6	93,70
60	7	98,73
60	8	100,00



По данным таблицы 4.3 в программе «STATISTICA» [30, 50, 265] построена поверхность отклика, характеризующая зависимость доли выделенных зерен от параметров процесса (рис. 4.10).

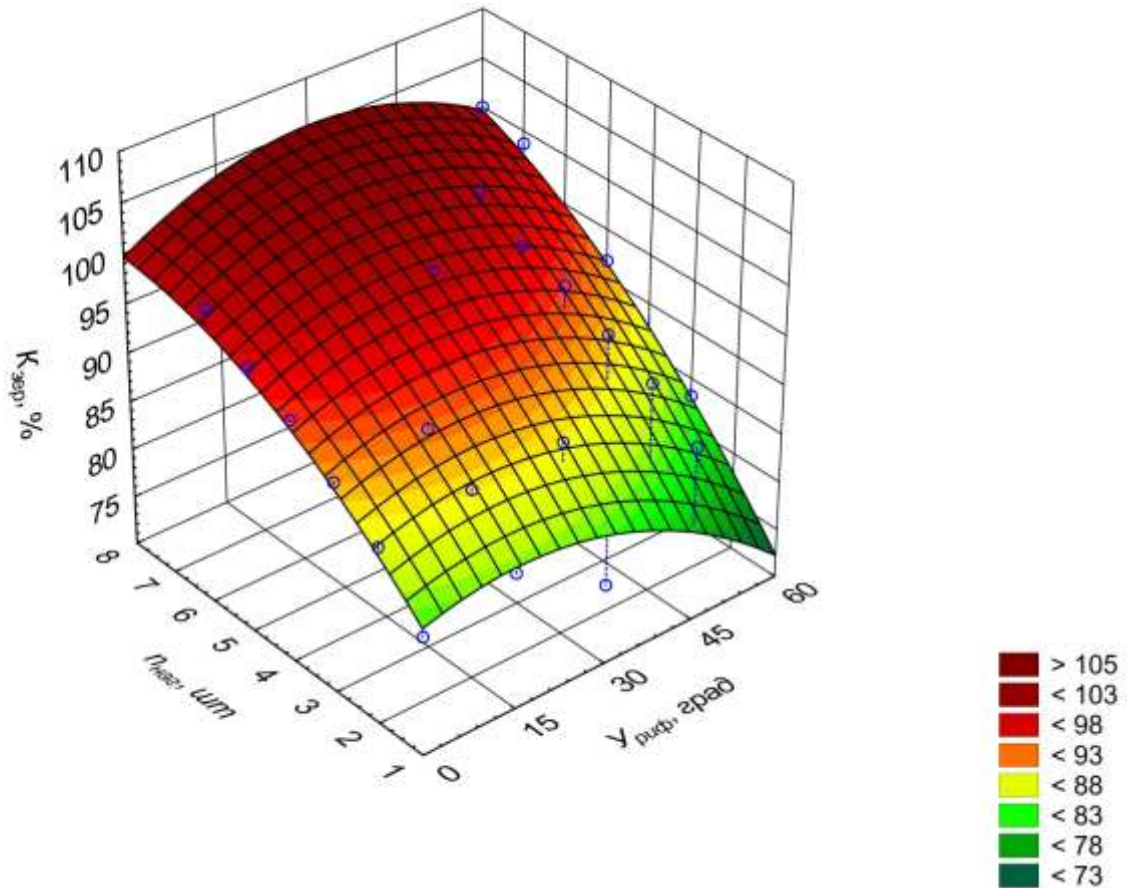


Рисунок 4.10 – Поверхность отклика при взаимодействии факторов: угла наклона рифов и количества нагружений связей зерна с колосом

Анализ поверхности отклика (рис. 4.10) свидетельствует о том, что наиболее интенсивное выделение зерна из колоса происходит при угле наклона рифов верхней площадки, находящегося в интервале  $U_{риф}=30-45^\circ$ . В таком положении молотильное устройство обеспечивает стопроцентное выделение зерна из колоса за 6 движений. Существенной разницы между углами наклона рифов 0, 15 и 60 градусов не установлено.

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

$$K_{зер} = 78,55 + 0,258 \cdot U_{риф} + 3,699 \cdot n_{наг} - 6,274 \cdot 10^{-3} \cdot U_{риф}^2, \quad (4.14)$$

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

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

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

Оценку значимости уравнения регрессии выполняли по критерию Фишера. Поскольку фактическое значение критерия Фишера меньше его табличной величины  $F_{факт} < F_{табл}$  ( $1,32 < 1,65$ ), то полученное уравнение регрессии является статистически значимым. Значимость коэффициентов регрессии оценивали по  $t$ -критерию Стьюдента (приложение Л).

Следующие исследования, были направлены на изучение дробления зерна при различных углах наклона рифов на верхней площадке (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – Результаты исследования влияния угла наклона рифов на дробление зерна рабочими органами молотилки

Угол наклона рифов $U_{риф}, град$	Количество движений $n_{наг}, шт$	Дробление зерна, $D_{зер}, \%$
1	2	3
0	1	0,201
0	2	0,134
0	3	0,652
0	4	0,349
0	5	0,487
0	6	0,847
15	1	0,144
15	2	0,136
15	3	0,340
15	4	0,145
15	5	0,710
15	6	0,832
30	1	0,000
30	2	0,217
30	3	0,694
30	4	0,503
30	5	0,746
30	6	0,784
45	1	0,067

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3
45	2	0,157
45	3	0,200
45	4	0,405
45	5	0,368
45	6	0,201
60	1	0,000
60	2	0,000
60	3	0,071
60	4	0,000
60	5	0,083
60	6	0,000
60	7	0,074
60	8	0,075

По данным таблицы 4.4 в программе «STATISTICA» [30, 50, 265] построена поверхность отклика, характеризующая зависимость доли дробления зерна от параметров процесса (рис. 4.11).

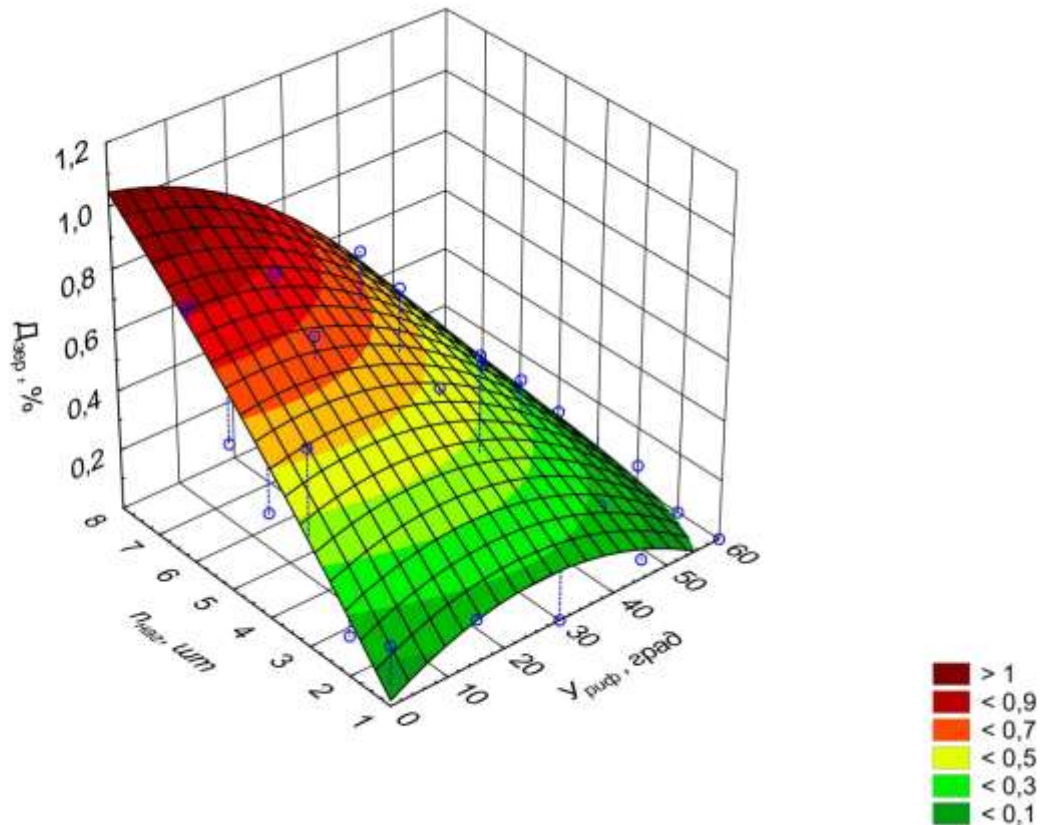


Рисунок 4.11 – Поверхность отклика при взаимодействии факторов: угла наклона рифов и количества нагружений связей зерна с колосом

В результате анализа поверхности отклика (рис. 4.11) установлено, что максимальное значение дробления зерна по результатам научных исследований находится в пределах 0,85%, что соответствует  $U_{риф}=0^\circ$  и  $n_{наг}=6$  (табл. 4.4). При этом величина указанного параметра не превышает агротехнических требований для семенного материала 1% [283, 284].

Наиболее адекватной моделью (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,914$ ) является нелинейная регрессия с точкой разрыва. Уравнение регрессии имеет вид [30, 50, 265]

$$\begin{cases} D_{зер} = 0,105 + 0,002 \cdot U_{риф} + 0,029 \cdot n_{наг} - 7,9 \cdot 10^{-5} \cdot U_{риф}^2 - 0,004 \cdot n_{наг}^2 + 2,31 \cdot 10^{-4} \cdot U_{риф} \cdot n_{наг}, \\ \quad \text{при } D_{зер} \leq 0,301; \\ D_{зер} = 1,465 + 0,016 \cdot U_{риф} - 0,553 \cdot n_{наг} - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot U_{риф}^2 + 0,074 \cdot n_{наг}^2 - 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot U_{риф} \cdot n_{наг}, \\ \quad \text{при } D_{зер} > 0,301, \end{cases} \quad (4.15)$$

где  $D_{зер}$  – дробление зерна, %;

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

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

Оценку значимости влияния угла наклона рифов на энергоемкость молотильного устройства выполняли аналогично методике, описанной в разделе 4.2. Для этого использовали график нагружения связей зерна с колосом (рис. 4.12). Здесь по оси абсцисс отложено время цикла и соответствующее ему перемещение верхней площадки, а по оси ординат – усилие, зафиксированное тензодатчиками. Поскольку движения верхней площадки имели характер гармонических колебаний, то нижняя шкала (перемещение) оказалась неравномерной.

После перехода на равномерную шкалу перемещения, работа, затраченная на разрушение связей зерна с колосом за одно движение, была вычислена как площадь заштрихованной фигуры  $abc$ . Тогда вычленив кривую  $ac$  из графика и аппроксимировав ее по перемещению (по равномерной шкале), получим следующее уравнение регрессии (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,983$ )

$$F = 5710,2 \cdot S_{nl}^2 + 392,37 \cdot S_{nl} - 3,57, \quad (4.16)$$

где  $F$  – сила,  $H$ ;

$S_{nl}$  – линейное перемещение верхней площадки,  $m$ .

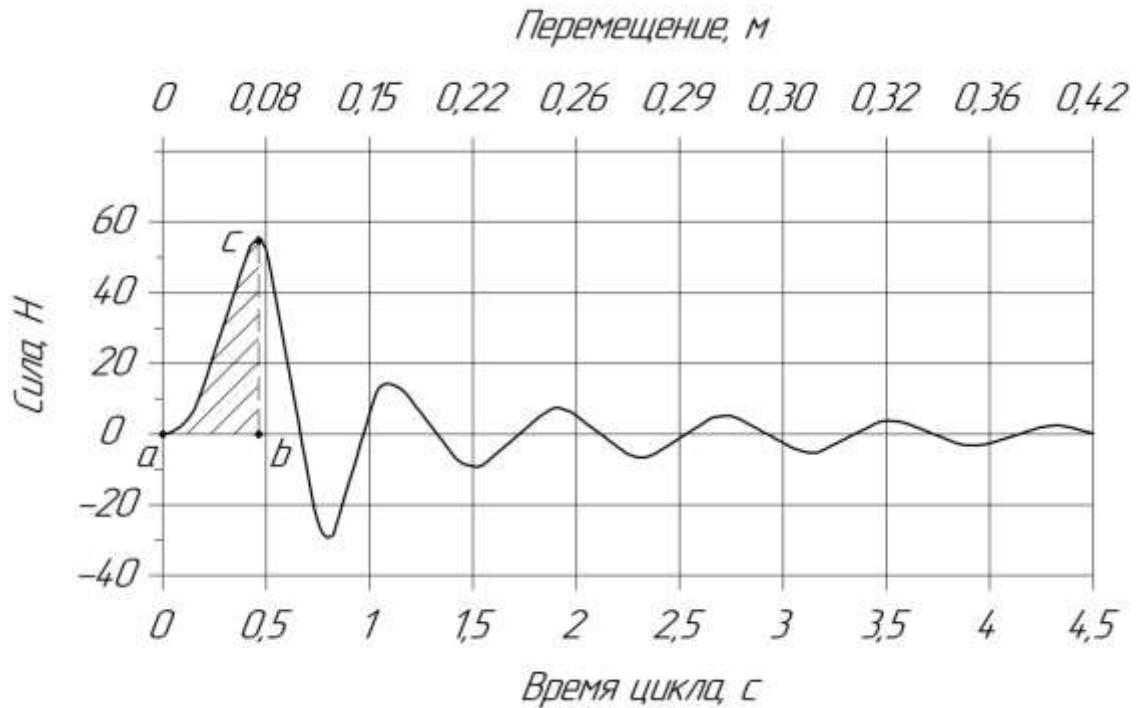


Рисунок 4.12 – График регистрации параметров АЦП при угле наклона рифов  $45^\circ$  и зазоре в молотильной камере 4 мм

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

$$A_{\text{зер}} = \int_a^b F(S_{nl}) dS_{nl} = \int_0^{0,07} (5710,2 \cdot S_{nl}^2 + 392,37 \cdot S_{nl} - 3,57) dS_{nl} = 1,76 \text{ Дж}, \quad (4.17)$$

где  $a$  и  $b$  – пределы интегрирования (рис. 4.12).

Разделив искомую площадь на количество зерен, выделенных за одно движение площадки, окончательно получаем, что при угле наклона рифов 0, 15, 30, 45 и 60 градусов – работа, затрачиваемая на выделение одного зерна из колоса, составляет соответственно 0,030, 0,029, 0,028, 0,027 и 0,032 Дж (рис. 4.13).

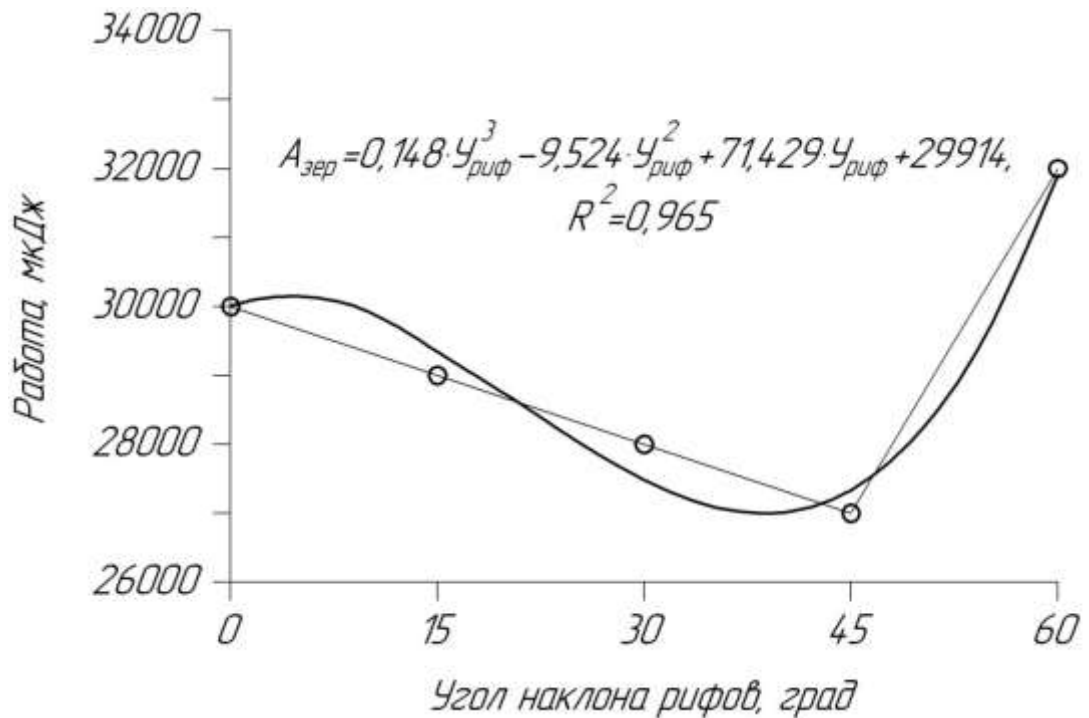


Рисунок 4.13 – Зависимость работы, затраченной на выделение одного зерна пшеницы от угла наклона рифов при поперечном колебательном характере нагружения связей

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

$$A_{\text{зер}} = 0,148 \cdot U_{\text{риф}}^3 - 9,524 \cdot U_{\text{риф}}^2 + 71,429 \cdot U_{\text{риф}} + 29914, \quad (4.18)$$

где  $A_{\text{зер}}$  – работа, затраченная на выделение одного зерна из колоса при поперечном колебательном характере нагружения связей, мкДж;

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

Анализ полученных данных (рис. 4.13) свидетельствует о том, что минимальная энергоёмкость процесса выделения зерна из колоса соответствует углу наклона рифов верхней площадки, равному 45 градусов. Это обусловлено интенсивным выделением зерна из колоса при его взаимодействии с рабочими органами молотильного устройства.

### 4.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА НАКЛОННОЙ РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Данные, полученные при исследовании сепарации свободного зерна на наклонной решетчатой поверхности, были обработаны в программе «Excel» [50, 141, 290]. По ним получена таблица 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты установочной серии опытов при исследовании сепарации очесанного зернового вороха на наклонной решетчатой поверхности

Длина отверстия $l_{отв}, мм$	Ширина отверстия $b_{отв}, мм$	Проход свободного зерна $П_{зер}, \%$
80	8	53,56
80	10	63,92
80	12	63,23
120	8	64,22
120	10	64,08
120	12	64,88
160	8	68,70
160	10	62,90
160	12	63,21

По данным таблицы 4.5 в программе «STATISTICA» [30, 50, 265] построена поверхность отклика (рис. 4.14) и область ее двумерного сечения (рис. 4.15), характеризующие зависимость доли свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия сепарирующей решетки, от размеров последних.

Установочная серия опытов позволила сделать вывод о том, что поверхность отклика не имеет четко выраженного экстремума, однако максимальное значение выходного параметра соответствует размерам отверстий  $160 \times 8$  мм (рис. 4.14). Поэтому при планировании второй серии экспериментов указанные размеры были приняты за «нулевую» точку плана.

Аналогичным образом, данные, полученные при проведении второй серии опытов, были обработаны в программе «Excel». По ним уже получена таблица 4.6.

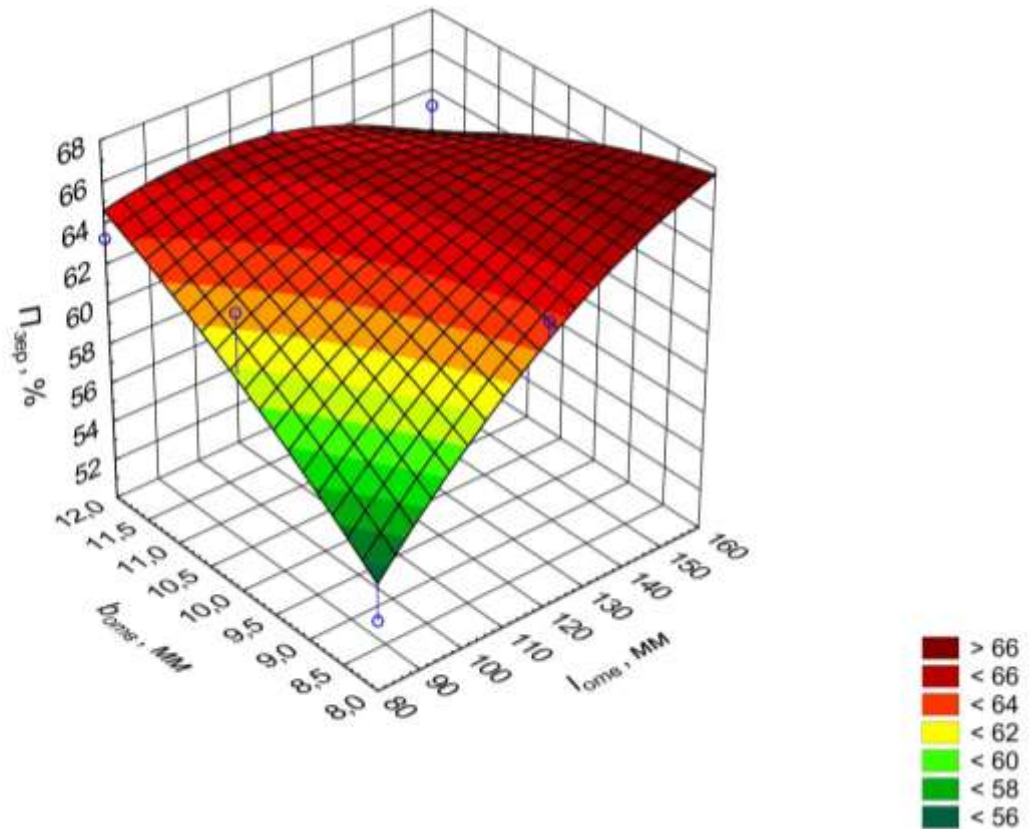


Рисунок 4.14 – Установочная поверхность отклика при взаимодействии факторов: длины и ширины отверстий решетчатой поверхности

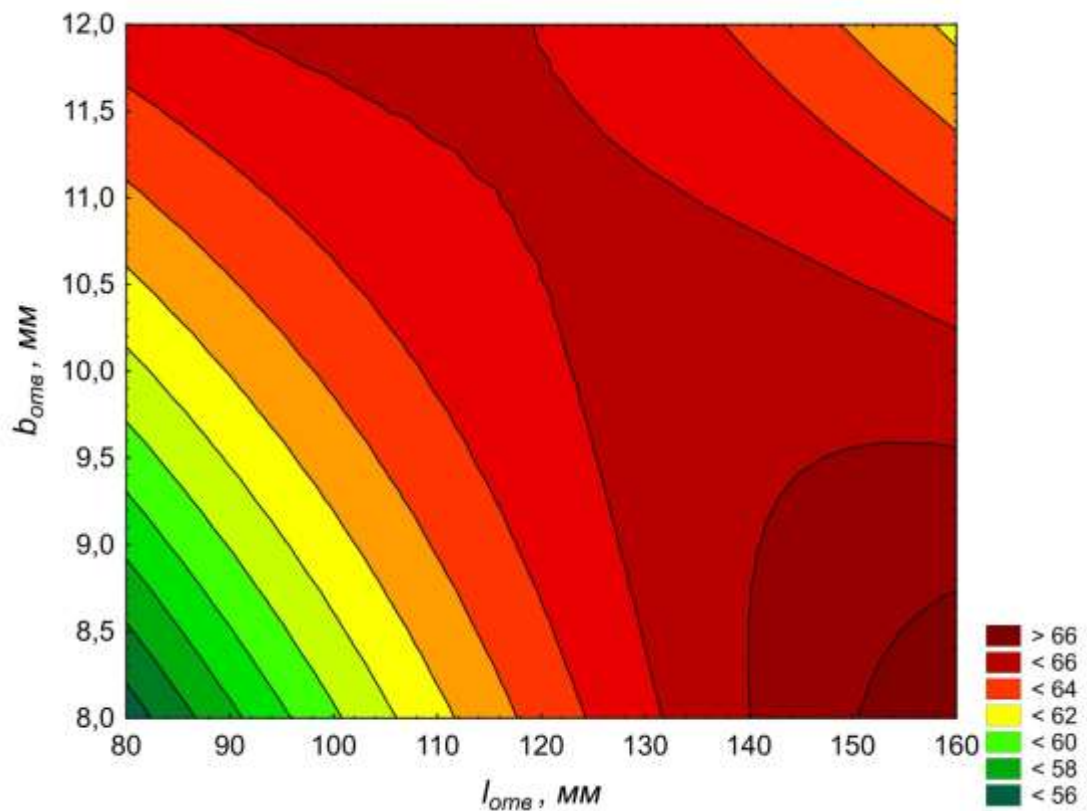


Рисунок 4.15 – Установочная область двумерного сечения поверхности отклика при взаимодействии факторов: длины и ширины отверстий



Таблица 4.6 – Результаты второй серии опытов при исследовании сепарации очесанного зернового вороха на наклонной решетчатой поверхности

Длина отверстия $l_{отв}, мм$	Ширина отверстия $b_{отв}, мм$	Проход свободного зерна $\Pi_{зеп}, \%$
120	6	48,87
120	8	65,60
120	10	64,57
160	6	54,87
160	8	68,70
160	10	63,30
200	6	55,23
200	8	64,03
200	10	63,60

По данным таблицы 4.6 в программе «STATISTICA» [30, 50, 265] также была построена поверхность отклика (рис. 4.16) и область ее двумерного сечения (рис. 4.17), характеризующие зависимость доли свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия сепарирующей решетки, от размеров последних.

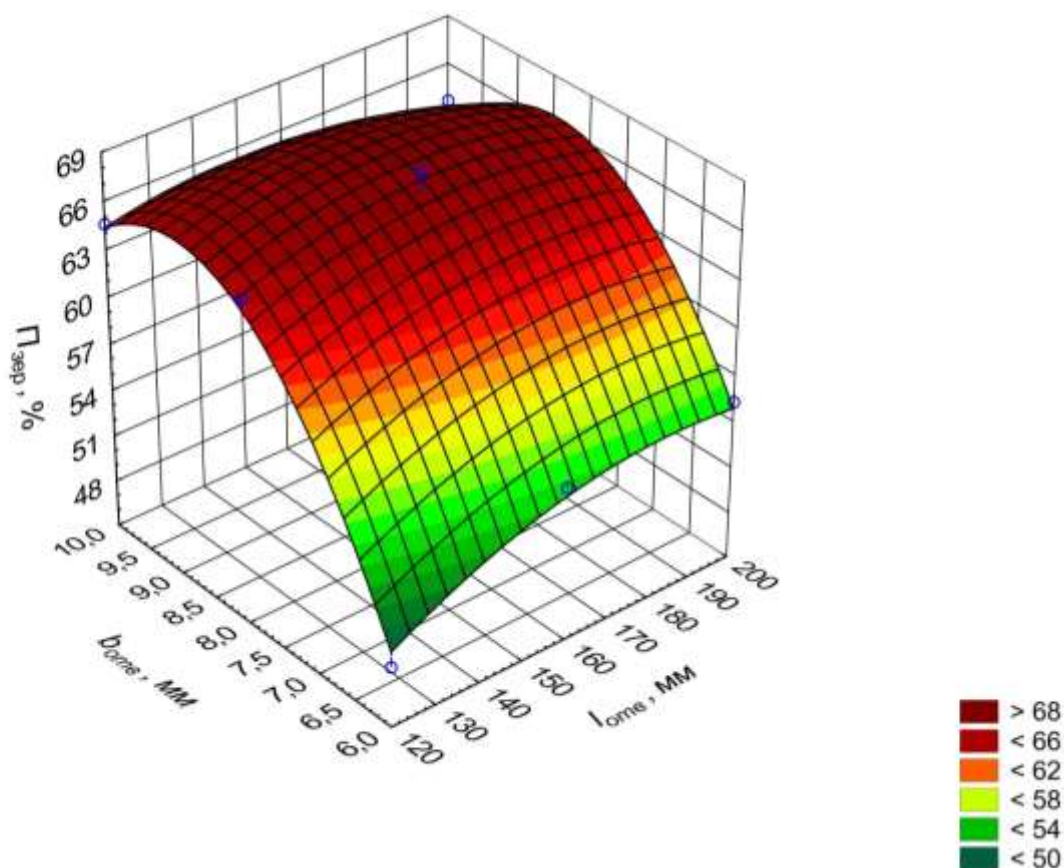


Рисунок 4.16 – Поверхность отклика для второй серии опытов при взаимодействии факторов: длины и ширины отверстий решетчатой поверхности

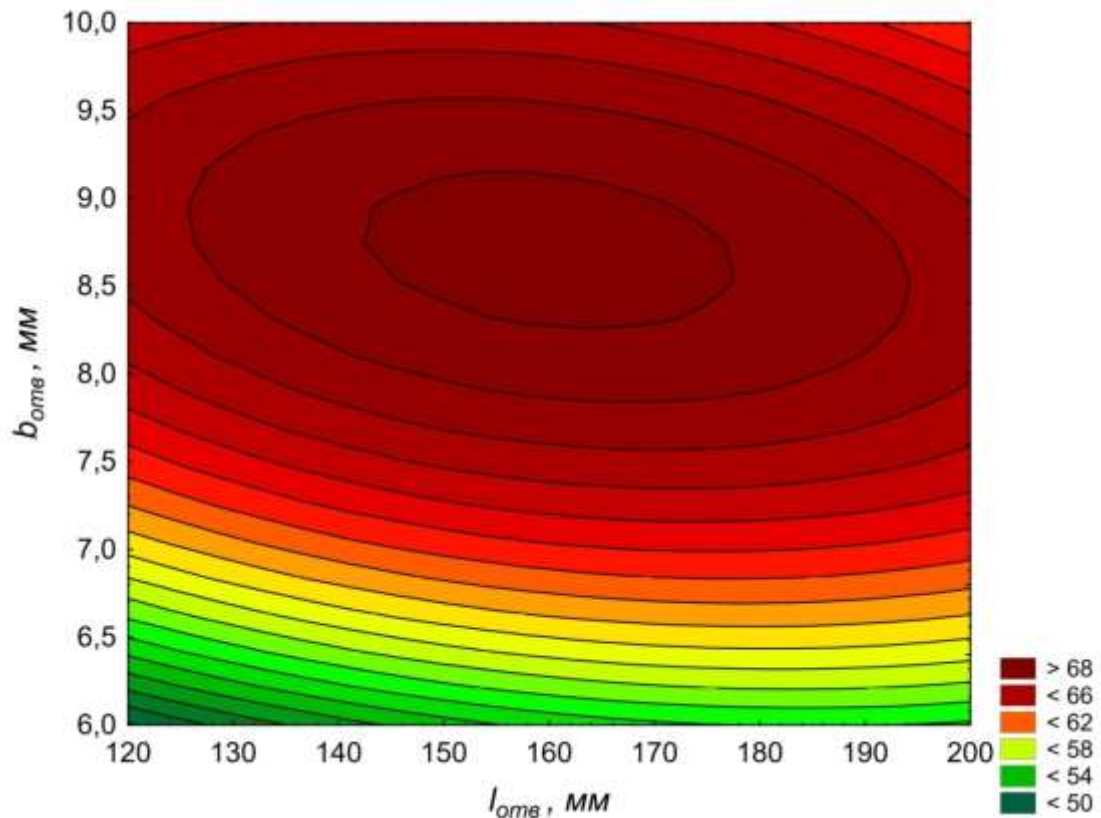


Рисунок 4.17 – Область двумерного сечения поверхности отклика для второй серии опытов при взаимодействии факторов: длины и ширины отверстий решетчатой поверхности

Поверхность отклика (рис. 4.16) и область двумерного сечения (рис. 4.17), построенные по результатам второй серии экспериментов, имеют четко выраженный экстремум, при котором сквозь отверстия сепарирующей решетки проходит 68,70% свободного зерна. При этом наиболее близкими к точке экстремума являются отверстия шириной 8 мм и длиной 160 мм (таблица 4.6). Прохождение колосовой части урожая во второй серии экспериментов не наблюдалось.

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

$$P_{з\text{ер}} = -110,73 + 0,199 \cdot l_{\text{отв}} + 37,197 \cdot b_{\text{отв}} - 1,926 \cdot b_{\text{отв}}^2 - 0,0229 \cdot l_{\text{отв}} \cdot b_{\text{отв}}, \quad (4.19)$$

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

$l_{отв}$  – длина отверстия, мм;

$b_{отв}$  – ширина отверстия, мм.

Оценку значимости уравнения регрессии выполняли по критерию Фишера. Поскольку фактическое значение критерия Фишера меньше его табличной величины  $F_{факт} < F_{табл}$  ( $1,85 < 2,93$ ), то полученное уравнение регрессии является статистически значимым. Значимость коэффициентов регрессии оценивали по  $t$ -критерию Стьюдента (приложение М).

Анализ поверхности отклика и уравнения регрессии свидетельствует о том, что сепарирующая способность решет существенно меньше зависит от длины их отверстий, чем от ширины. При этом, как и предполагалось в теоретической гипотезе, чрезмерное увеличение ширины отверстия ухудшает его сепарирующую способность. Наиболее вероятно, что это обусловлено застреванием в отверстиях необмолоченных колосьев, что резко уменьшает площадь их «живого сечения».

С целью выявления характера процесса сепарации свободного зерна по длине решетчатого днища, производилась регистрация его количества на четырех контрольных участках (рис. 4.18). При этом за стопроцентное количество свободного зерна принято начало проведения эксперимента на момент его поступления в корпус установки. Расчет количества свободного зерна, поступившего на второй контрольный участок (81%), определен разницей между предыдущим значением (100%) и количеством свободного зерна прошедшего сквозь отверстия на первом контрольном участке (19%). Аналогичным образом были получены и остальные значения (65,70; 47,64; и 31,30% соответственно).

Оценка убывания свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине поверхности сепарирования (рис. 4.18) свидетельствует о наличии резерва для повышения степени сепарации. С высокой степенью вероятности ( $R^2=0,982$ ) линия тренда прямолинейна и имеет вид

$$C_{зер} = -80,424 \cdot L + 95,045, \quad (4.20)$$

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

$L$  – длина поверхности сепарирования, м.

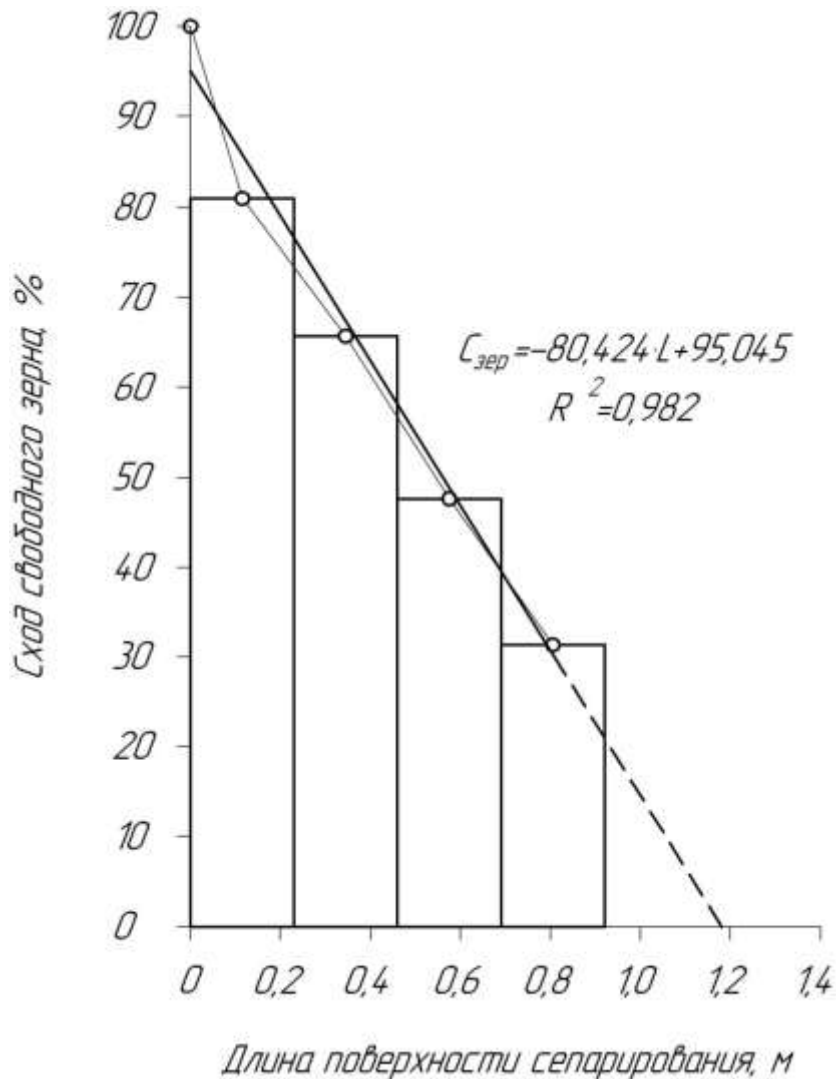


Рисунок 4.18 – Убывание свободного зерна из очесанного зернового вороха в зависимости от длины поверхности сепарирования при скорости плавающего транспортера  $v_{тр}=3$  м/с и угле наклона отверстий  $V_{отв}=0^\circ$

Наличие 31,30% свободного зерна на выходе из установки говорит о том, что длины сепарирующей решетки при проведении серии экспериментов оказалось недостаточно. Следовательно, для достижения желаемого результата: исключение поступления свободного зерна в молотильную камеру зерноуборочного комбайна, необходимым и достаточным является увеличение ее длины.

Для этого приравняв уравнение (4.20) к нулю и решив его, получим, что длина решетчатого днища, обеспечивающая полное выделение зерна из вороха, должна быть не менее  $L=1,18$  м. Такое техническое решение может быть реализовано, например, в наклонной камере зерноуборочного комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10», имеющей длину порядка 1,3 м [112].

Если в качестве аналогии использовать теорию клавишного соломотряса, осуществляющего выделение зерна из соломистого вороха, то в этом случае линия тренда должна представлять собой экспоненциальную функцию типа  $y=ke^{-ax}$  [105]. При построении экспоненциальной функции по полученным экспериментальным данным она имеет вид

$$C_{\text{зер}} = 100,07 \cdot e^{-1,364 \cdot L}, \quad (4.21)$$

где  $e=2,72$  – основание натурального логарифма.

При этом коэффициент детерминации увеличивается всего лишь до  $R^2=0,986$ , что свидетельствует об отсутствии значимых отличий по сравнению с принятым нами прямолинейным трендом.

При проведении серии экспериментов было оценено влияние пар факторов на проход половы сквозь отверстия решетчатого днища (таблице 4.7).

Таблица 4.7 – Результаты исследования сепарации половы на наклонной решетчатой поверхности

Длина отверстия $l_{\text{отв}}, \text{мм}$	Ширина отверстия $b_{\text{отв}}, \text{мм}$	Проход половы $P_n, \%$
120	6	42,77
120	8	51,07
120	10	59,07
160	6	58,33
160	8	59,87
160	10	58,93
200	6	54,13
200	8	51,47
200	10	54,70

По данным таблицы 4.7 в программе «STATISTICA» [30, 50, 265] построена поверхность отклика (рис. 4.19) и область двумерного сечения (рис.

4.20), характеризующие зависимость доли прошедшей половины сквозь отверстия решетчатого днища, от размеров последних. Здесь максимальный проход половины также соответствует размерам отверстий  $160 \times 8$  мм.

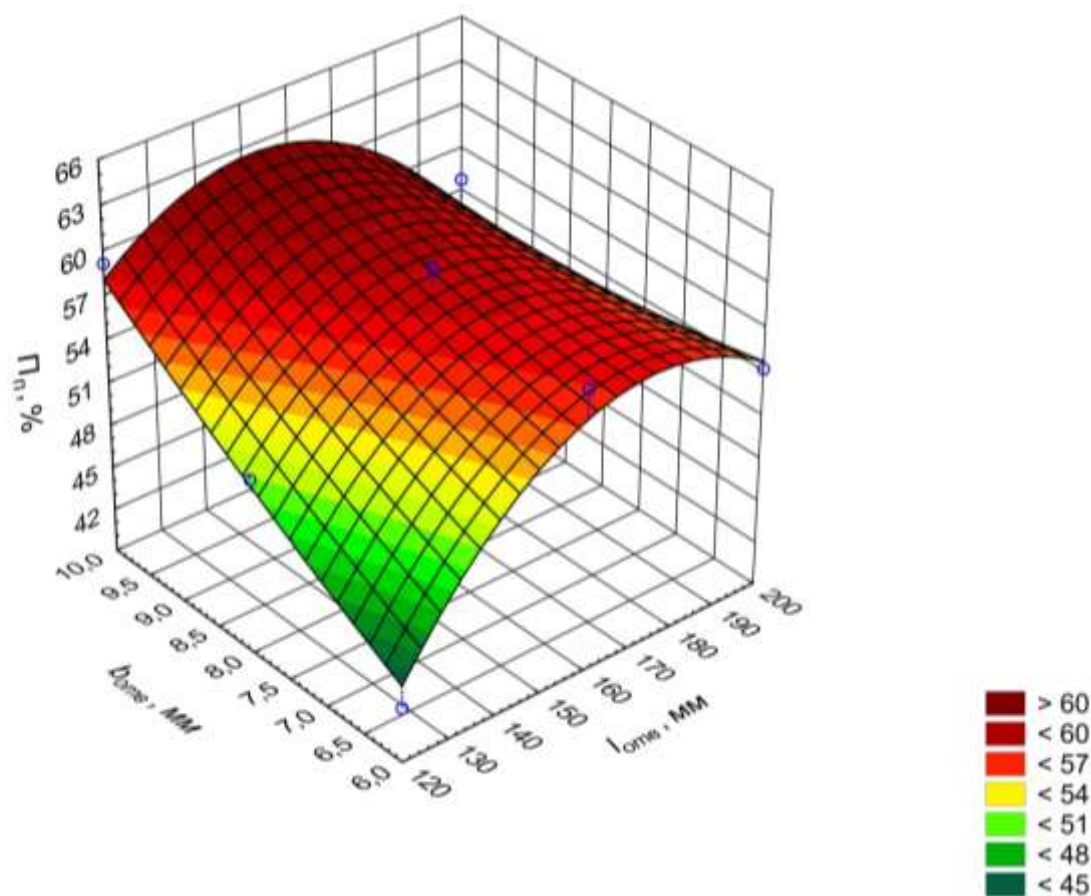


Рисунок 4.19 – Доля половины, прошедшей сквозь отверстия сепарирующей решетки, в зависимости от размеров последних

После исключения всех незначимым коэффициентов пошаговым методом, уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер зависимостей (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,887$ ), имеет следующий вид

$$P_n = -129,78 + 1,793 \cdot l_{отв} + 9,322 \cdot b_{отв} - 4,278 \cdot 10^{-3} \cdot l_{отв}^2 - 0,0492 \cdot l_{отв} \cdot b_{отв}, \quad (4.22)$$

где  $P_n$  – количество половины, прошедшей сквозь отверстия сепарирующей решетки (проход половины), %;

$l_{отв}$  – длина отверстия, мм;

$b_{отв}$  – ширина отверстия, мм.

Оценку значимости уравнения регрессии выполняли по критерию Фишера. Поскольку фактическое значение критерия Фишера меньше его табличной величины  $F_{факт} < F_{табл}$  ( $1,78 < 2,93$ ), то полученное уравнение регрессии является статистически значимым. Значимость коэффициентов регрессии оценивали по  $t$ -критерию Стьюдента (приложение Н).

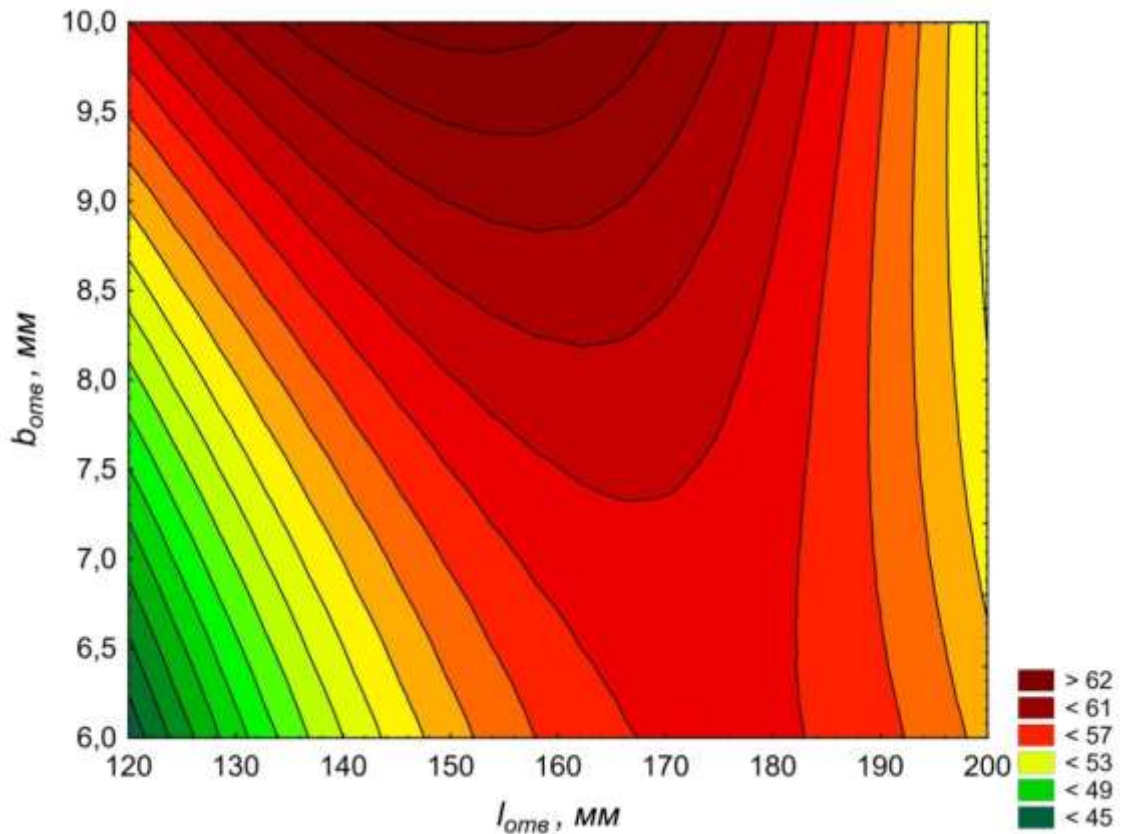


Рисунок 4.20 – Область двумерного сечения поверхности отклика при взаимодействии факторов: длины и ширины отверстий решетчатого днища

Аналогично свободному зерну (рис. 4.18) произведена оценка убывания половины из очесанного зернового вороха по длине поверхности сепарирования (рис. 4.21). Уравнение регрессии, наиболее полно отражающее характер зависимостей ( $R^2=0,978$ ), имеет прямолинейный вид

$$C_n = -69,607 \cdot L + 95,335, \quad (4.23)$$

где  $C_n$  – количество убывшей половины, в процентах от ее исходной массы, имевшейся в начале процесса сепарации (сход половины), %;

$L$  – длина поверхности сепарирования, м.

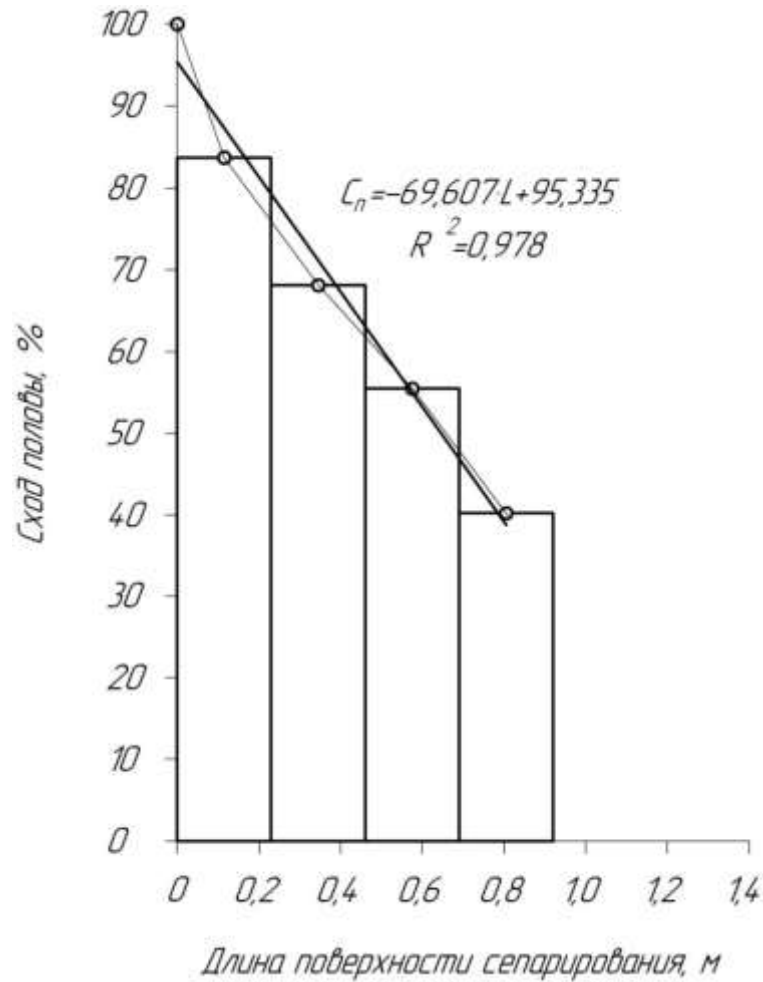


Рисунок 4.21 – Убывание половы из очесанного зернового вороха в зависимости от длины поверхности сепарирования при скорости плавающего транспортера  $v_{mp}=3$  м/с и угле наклона отверстий  $U_{отв}=0^\circ$

Приведенные результаты эксперимента свидетельствуют о том, что эффективная сепарация очесанного зернового вороха на днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна возможна. Максимальный проход свободного зерна сквозь решетчатое днище составляет порядка 68,70% при оптимальных размерах его отверстий  $160 \times 8$  мм. Для обеспечения стопроцентного выделения свободного зерна из очесанного зернового вороха, длина сепарирующей поверхности должна составлять не менее 1,18 м. При этом зерновой ворох, прошедший сквозь отверстия решетчатого днища целесообразно направить на транспортную доску посредством скребкового транспортера [198, 208]. Это обусловлено тем, что он меньше травмирует свободное зерно



в отличие от шнеков, величина дробления которыми превышает агротехнические требования и составляет порядка 2,6% [19, 102].

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на оценке влияния скорости плавающего транспортера на сепарирующую способность решетчатого днища.

#### 4.3.1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПЛАВАЮЩЕГО ТРАНСПОРТЕРА НА СЕПАРИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ НАКЛОННОЙ РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Полученные данные были обработаны в программе «Excel» [50, 141, 290]. По ним построен график (рис. 4.22), характеризующий зависимость количества свободного зерна прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища от скорости плавающего транспортера.

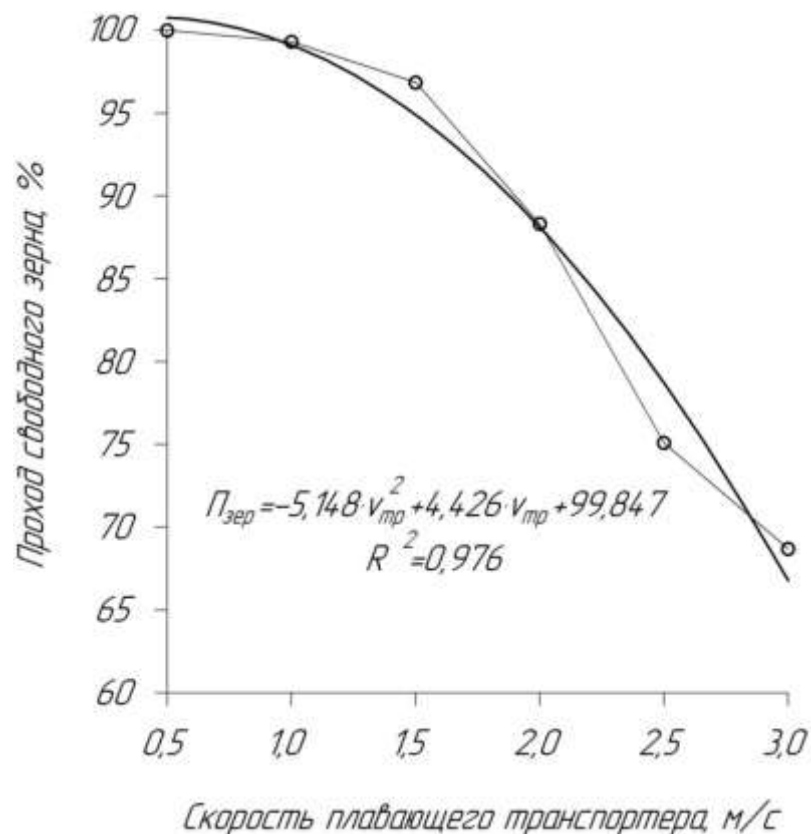


Рисунок 4.22 – Изменение количества свободного зерна прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища в зависимости от скорости плавающего транспортера

Наиболее адекватной моделью (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,976$ ) для него является полиномиальная кривая второго порядка. Уравнение регрессии имеет вид

$$P_{\text{зер}} = -5,148 \cdot v_{\text{тр}}^2 + 4,426 \cdot v_{\text{тр}} + 99,847, \quad (4.24)$$

где  $P_{\text{зер}}$  – количество свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища (проход свободного зерна), %;

$v_{\text{тр}}$  – скорость плавающего транспортера, м/с.

Анализ полученной зависимости (рис. 4.22) свидетельствует о том, что по мере увеличения скорости плавающего транспортера количество свободного зерна прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища уменьшается, а количество сошедшего с него зерна, наоборот, возрастает.

При этом максимальный сход свободного зерна (31,30%) наблюдается при максимальной скорости плавающего транспортера (3 м/с) и влечет за собой его поступление в молотильную камеру зерноуборочного комбайна с последующим дроблением. Это обусловлено тем, что при проведении серии экспериментов со скоростью плавающего транспортера, находящейся в интервале 1-3 м/с, длина сепарирующей решетки оказалась недостаточной. Таким образом, для исключения поступления свободного зерна в молотильную камеру зерноуборочного комбайна ее необходимо увеличить.

С целью выявления характера процесса сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине решетчатого днища, производилась регистрация его количества на четырех контрольных участках (рис. 4.23, д). При этом за стопроцентное количество свободного зерна принято начало проведения эксперимента на момент его поступления в корпус установки. Расчет количества свободного зерна, поступившего на второй контрольный участок (76,26%), определен разницей между предыдущим значением (100%) и количеством свободного зерна прошедшего сквозь отверстия на первом контрольном участке (23,74%) (рис. 4.23, д). Аналогичным образом были получены и остальные значения (54,34; 38,84 и 24,90% соответственно).

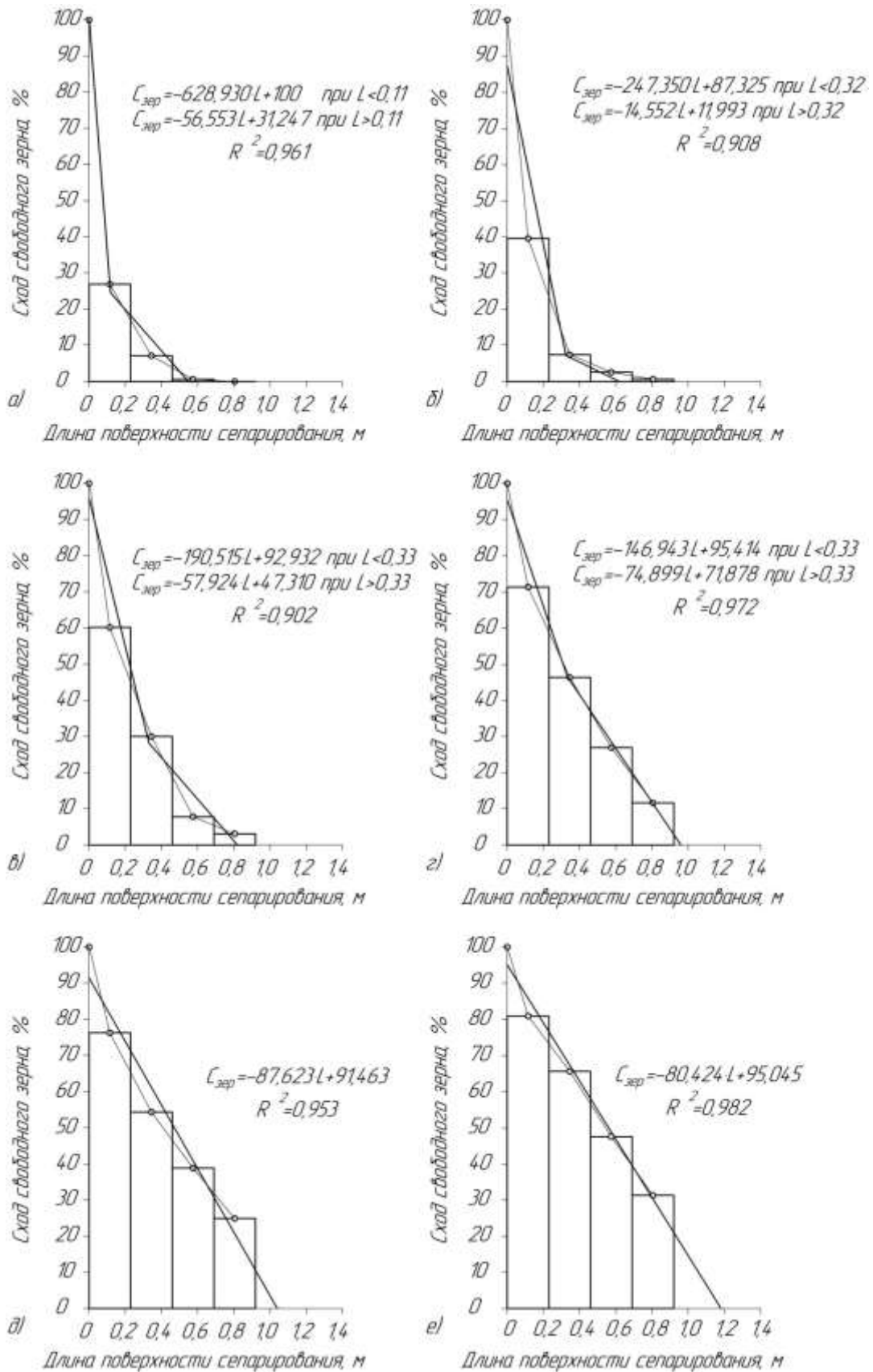


Рисунок 4.23 – Убывание свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине поверхности сепарирования при угле наклона отверстий  $U_{отс}=0^\circ$  и скорости транспортера: а)  $v_{mp}=0,5$  м/с; б)  $v_{mp}=1,0$  м/с; в)  $v_{mp}=1,5$  м/с; г)  $v_{mp}=2,0$  м/с; д)  $v_{mp}=2,5$  м/с; е)  $v_{mp}=3,0$  м/с

Оценка убывания свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине поверхности сепарирования (рис. 4.23, д) свидетельствует о наличии резерва для повышения степени сепарации. С высокой степенью вероятности ( $R^2=0,953$ ) линия тренда прямолинейна и имеет вид

$$C_{\text{зер}} = -87,623 \cdot L + 91,463, \quad (4.25)$$

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.

Экстраполяция графика функции показывает, что длина решетчатого днища, обеспечивающая полное выделение свободного зерна из очесанного зернового вороха, должна быть не менее  $L=1,04$  м (приложение О).

По аналогичной методике были получены и остальные значения длин решетчатого днища (рис. 4.23, а-г) при различной скорости плавающего транспортера (0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 м/с). (Расчеты для скорости плавающего транспортера  $v_{\text{мп}}=3,0$  м/с представлены в разделе 4.3). При этом для этих данных функция убывания свободного зерна была представлена как линейная регрессия с точкой разрыва. По ним получена зависимость длины сепарирующей поверхности наклонной камеры зерноуборочного комбайна от скорости плавающего транспортера (рис. 4.24). Уравнение регрессии представляет собой прямолинейный вид ( $R^2=0,940$ )

$$L = 0,226 \cdot v_{\text{мп}} + 0,502, \quad (4.26)$$

где  $L$  – длина поверхности сепарирования, м;

$v_{\text{мп}}$  – скорость плавающего транспортера, м/с.

Представленный график свидетельствует о том что, по мере увеличения скорости плавающего транспортера длина днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна возрастает. Так, при увеличении скорости плавающего транспортера в 6 раз (от 0,5 м/с до 3,0 м/с), необходимая минимальная длина днища наклонной камеры увеличилась более чем в 2 раза и составляет порядка 1,18 м. Такое техническое решение может быть реализовано, напри-

мер, в наклонной камере зерноуборочного комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10», имеющей длину порядка 1,3 м [112].

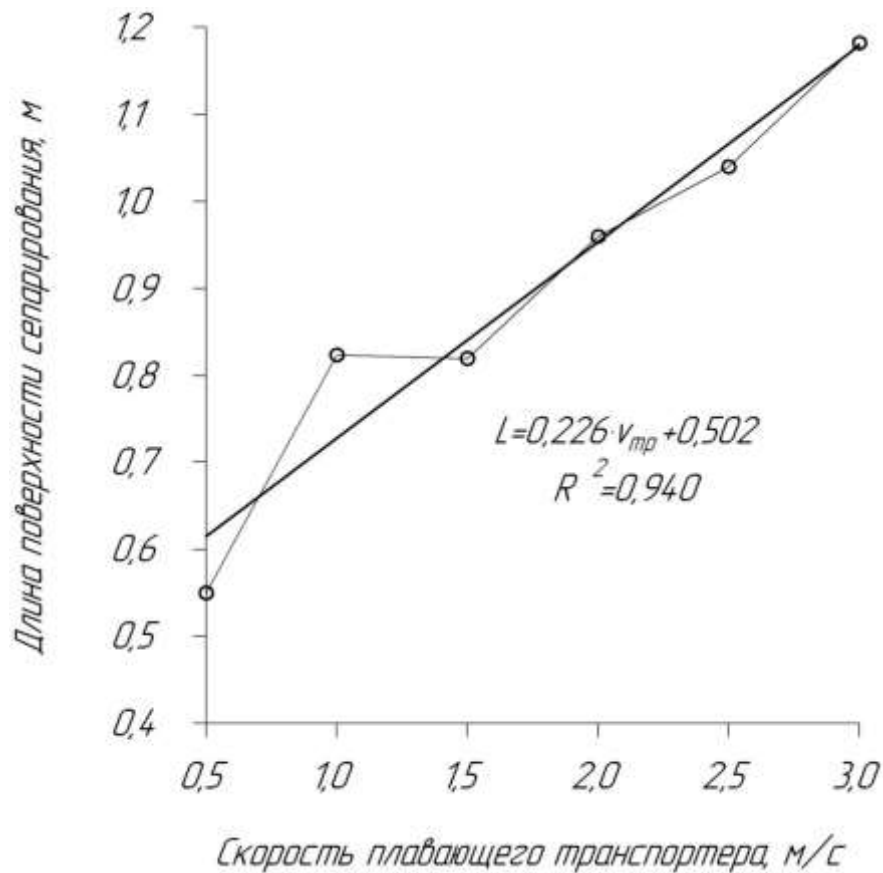


Рисунок 4.24 – Зависимость длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от скорости плавающего транспортера

Аналогично свободному зерну (рис. 4.22) получена зависимость количества половы прошедшей сквозь отверстия решетчатого днища от скорости плавающего транспортера (рис. 4.25). Наиболее адекватной моделью (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,976$ ) для нее является полиномиальная кривая второго порядка. Уравнение регрессии имеет вид

$$P_n = -5,331 \cdot v_{mp}^2 + 1,082 \cdot v_{mp} + 102,140, \quad (4.27)$$

где  $P_n$  – количество половы, прошедшей сквозь отверстия решетчатого днища (проход половы), %;

$v_{mp}$  – скорость плавающего транспортера, м/с.

Полученная зависимость (рис. 4.25) свидетельствует о том, что по мере увеличения скорости плавающего транспортера количество половы прошед-

шей сквозь отверстия решетчатого днища уменьшается, а количество сошедшей с него половины, наоборот, возрастает. При этом максимальный проход половины (99,96%) наблюдается при минимальной скорости плавающего транспортера  $v_{mp}=0,5$  м/с.

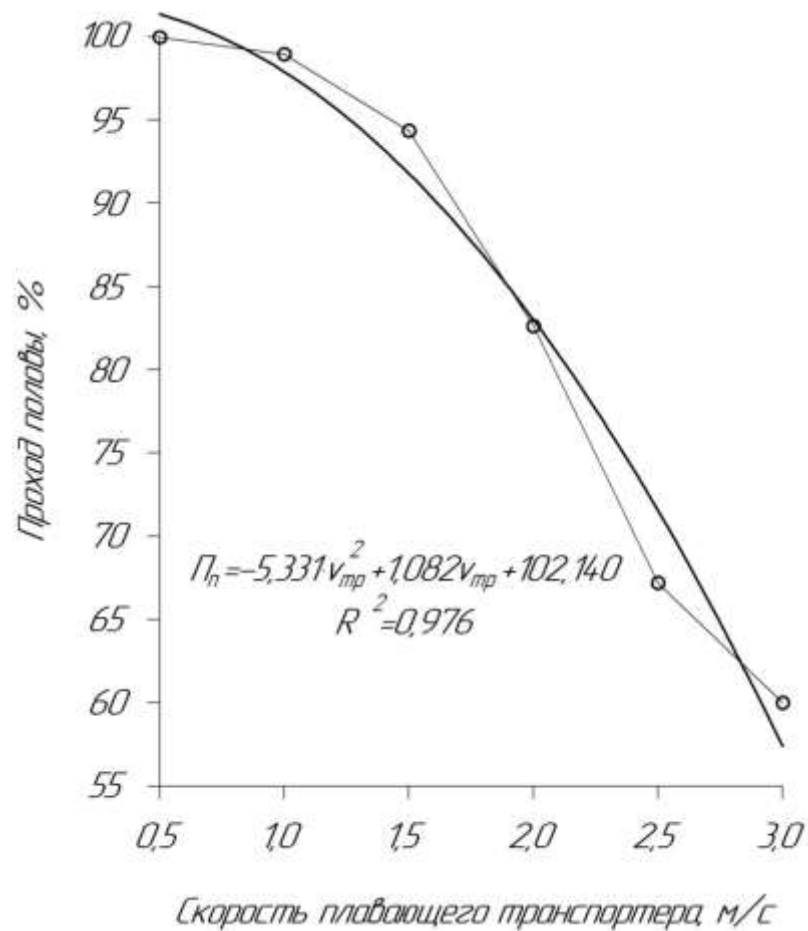


Рисунок 4.25 – Изменение количества половины прошедшей сквозь отверстия решетчатого днища в зависимости от скорости плавающего транспортера

По результатам эксперимента установлено, что увеличение скорости плавающего транспортера способствует снижению количества свободного зерна прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища. Для обеспечения максимальной сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха длина решетчатого днища должна быть не менее 1,18 м. Улучшить сепарацию свободного зерна возможно за счет более полного отделения легких примесей из очесанного зернового вороха непосредственно в корпусе очесывающего адаптера, путем снабжения его задней стенки пластинчатым сепара-

тором [199]. Дальнейшие научные исследования целесообразно сосредоточить на оптимизации угла наклона отверстий решетчатого днища.

#### 4.3.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ОТВЕРСТИЙ НА СЕПАРИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ РЕШЕТЧАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Данные эксперимента были обработаны в программе «Excel» [50, 141, 290]. По ним построен график (рис. 4.26), характеризующий зависимость количества свободного зерна, прошедшего сквозь решетчатое днище от угла наклона отверстий.

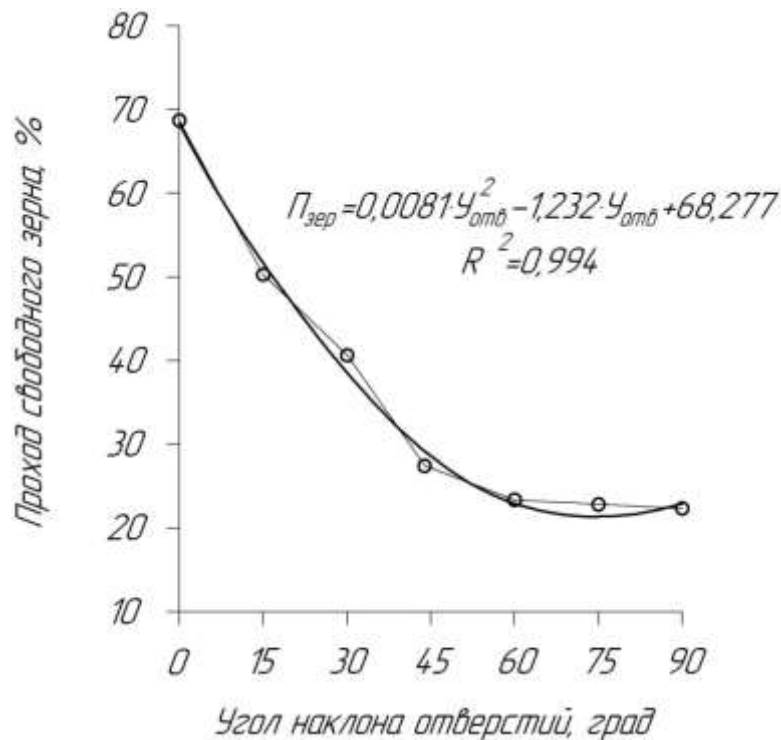


Рисунок 4.26 – Влияние угла наклона отверстий на количество свободного зерна, прошедшего сквозь решетчатое днище при скорости плавающего транспортера  $v_{\text{тр}}=3$  м/с

Наиболее адекватной моделью (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,994$ ) для него является полиномиальная кривая второго порядка

$$\Pi_{\text{зер}} = 0,0081 \cdot Y_{\text{отв}}^2 - 1,232 \cdot Y_{\text{отв}} + 68,277, \quad (4.28)$$

где  $P_{зер}$  – количество свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища (проход свободного зерна), %;

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

Полученная зависимость 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 68,70% соответствует углу наклона отверстий, равному 0° (рис. 4.26). Разница между максимальным и минимальным значением количества свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища, превышает 3 раза.

Для исследования характера процесса сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине решетчатого днища, производилась регистрация его количества на четырех контрольных участках (рис. 4.27). При этом за стопроцентное количество свободного зерна принято начало проведения эксперимента на момент его поступления в корпус установки. Расчет количества свободного зерна, поступившего на второй контрольный участок (81%), определен разницей между предыдущим значением (100%) и количеством свободного зерна прошедшего сквозь отверстия на первом контрольном участке (19%) (рис. 4.27, а). Аналогичным образом были получены и остальные значения (65,70; 47,64 и 31,30% соответственно).

Оценка убывания свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине поверхности сепарирования (рис. 4.27, а) свидетельствует о наличии резерва для повышения степени сепарации. С высокой степенью вероятности ( $R^2=0,982$ ) линия тренда прямолинейна и имеет вид

$$C_{зер} = -59,116 \cdot L + 99,935, \quad (4.29)$$

где  $C_{зер}$  – текущий остаток зерна в ворохе, в процентах от его исходной массы, имевшейся в начале процесса сепарации (сход зерна), %;

$L$  – длина поверхности сепарирования, м.



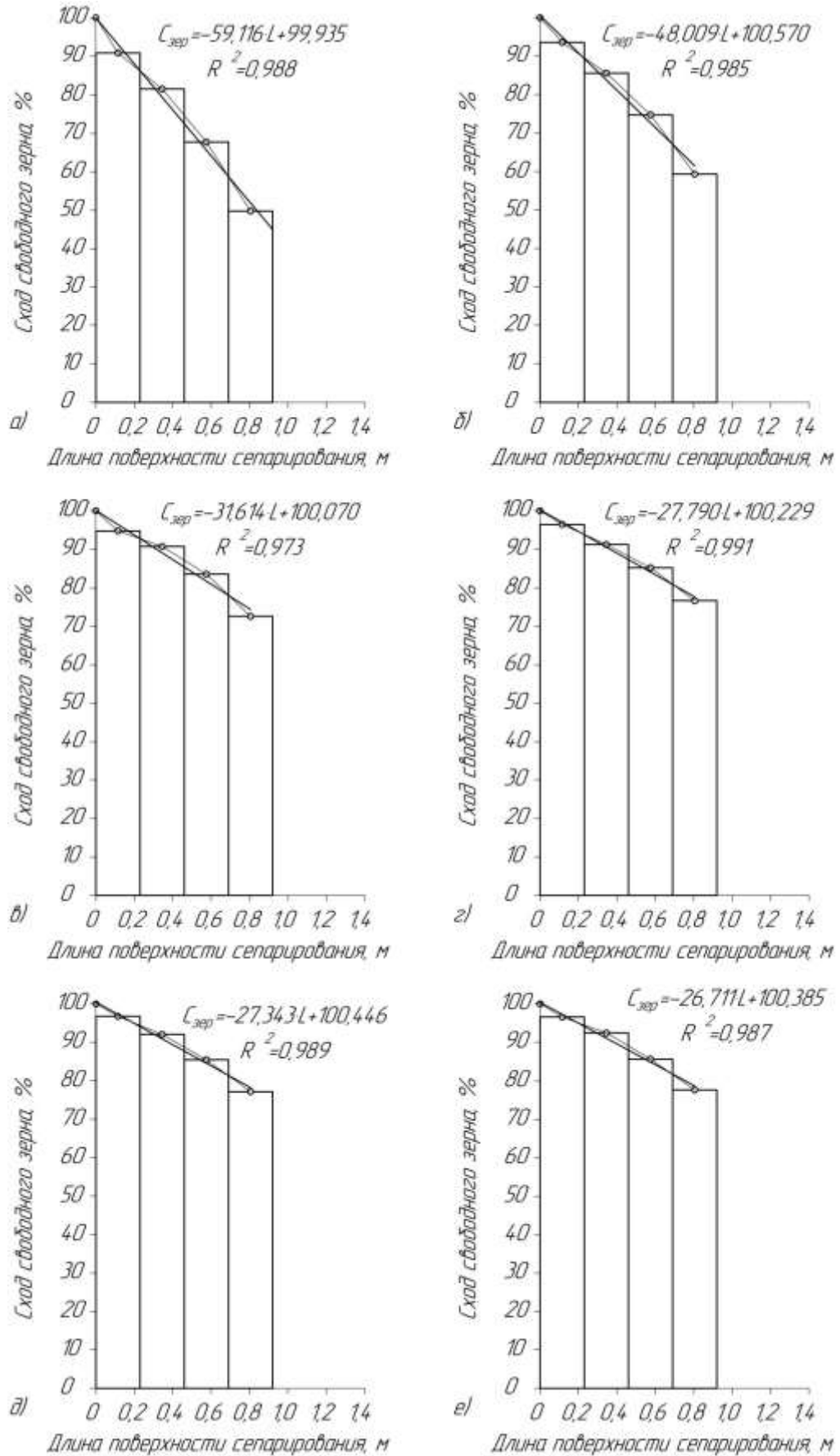


Рисунок 4.27 – Убывание свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине поверхности сепарирования при угле наклона отверстий:  
 а)  $\gamma_{отв} = 15^\circ$ ; б)  $\gamma_{отв} = 30^\circ$ ; в)  $\gamma_{отв} = 45^\circ$ ; г)  $\gamma_{отв} = 60^\circ$ ; д)  $\gamma_{отв} = 75^\circ$ ; е)  $\gamma_{отв} = 90^\circ$

Экстраполяция графика функции показывает, что длина решетчатого днища, обеспечивающая полное выделение свободного зерна из очесанного зернового вороха, должна быть не менее  $L=1,69$  м (рис. 4.28).

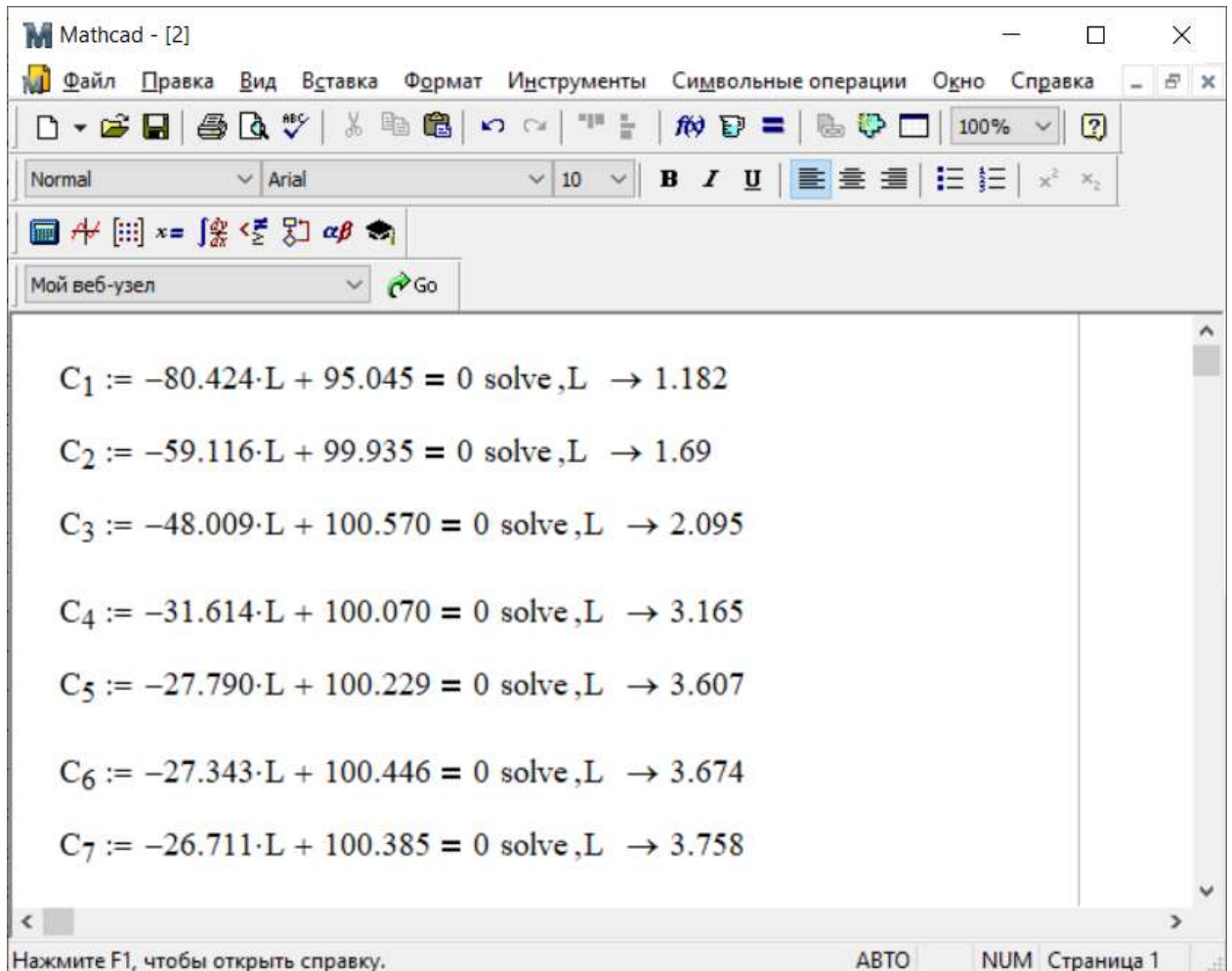


Рисунок 4.28 – Скриншот рабочего окна программы «Mathcad» при определении длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от угла наклона отверстий решетчатого днища

По аналогичной методике были получены и остальные значения длины поверхности сепарирования (рис. 4.28), достаточной для прохождения всего зернового вороха, при различных углах наклона отверстий решетчатого днища (30, 45, 60, 75 и 90 градусов). (Расчеты для угла наклона отверстий  $U_{oms}=0^\circ$  представлены в разделе 4.3). По ним получена зависимость длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от угла наклона отверстий (рис. 4.29). Уравнение регрессии ( $R^2=0,962$ ) имеет вид

$$L = -0,00027 \cdot Y_{отв}^2 + 0,0555 \cdot Y_{отв} + 1,0219, \quad (4.30)$$

где  $L$  – длина поверхности сепарирования, м;

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

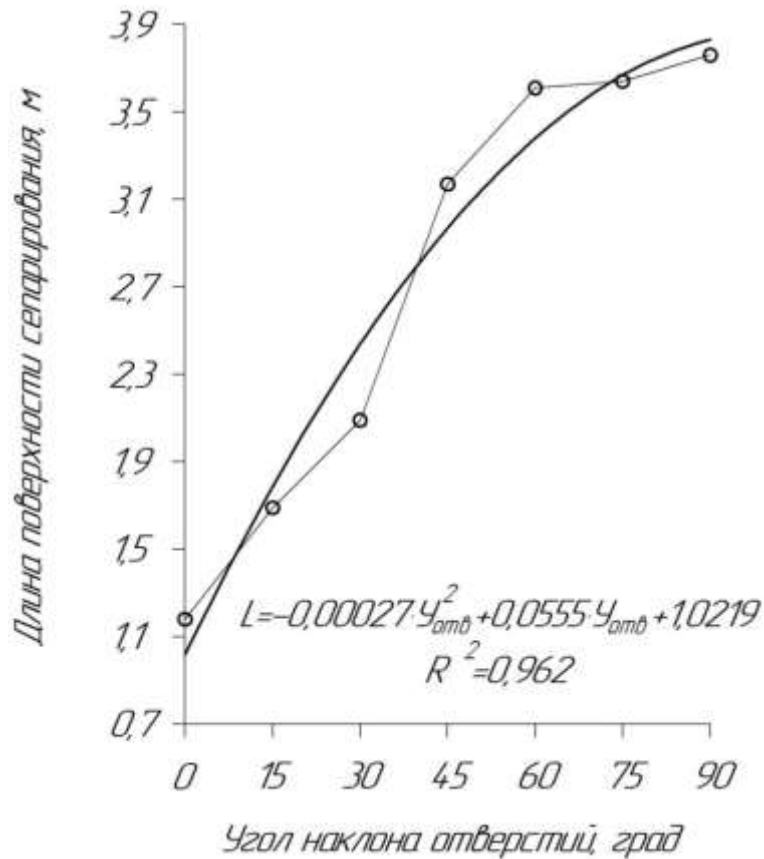


Рисунок 4.29 – Зависимость длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от угла наклона отверстий решетчатого днища

Представленный график (рис. 4.29) 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 [112].

Влияние угла наклона отверстий решетчатого днища на проход половы показано на рисунке 4.30.

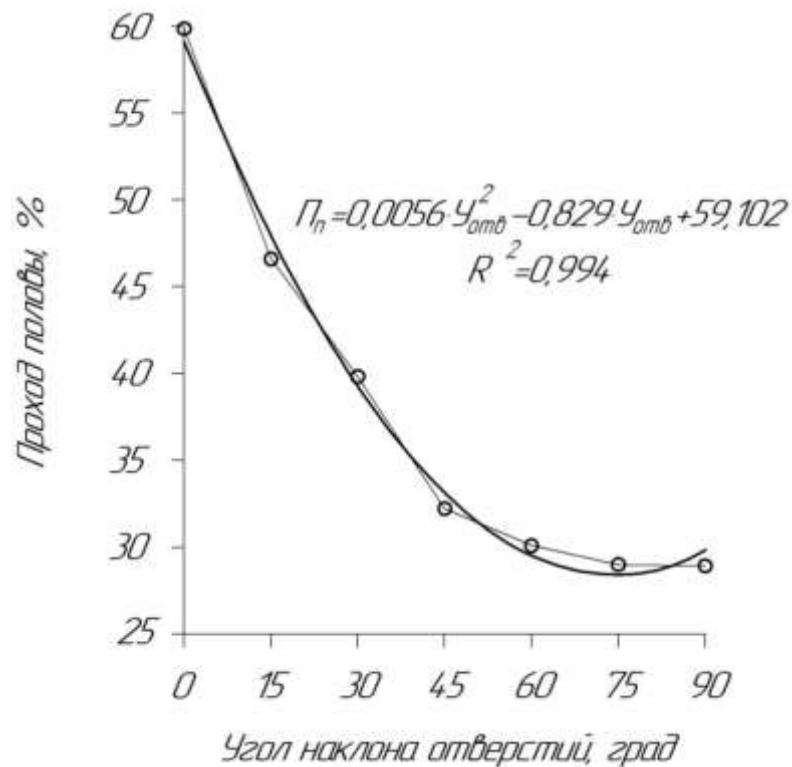


Рисунок 4.30 – Влияние угла наклона отверстий на количество половы, прошедшей сквозь решетчатое днище при скорости транспортера  $v_{mp}=3$  м/с

Наиболее адекватной моделью (с коэффициентом детерминации  $R^2=0,994$ ) для него является полиномиальная кривая второго порядка. Уравнение регрессии имеет вид [177]

$$P_n = 0,0056 \cdot U_{отв}^2 - 0,829 \cdot U_{отв} + 59,102, \quad (4.31)$$

где  $P_n$  – количество половы, прошедшей сквозь отверстия решетчатого днища (проход половы), %;

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

Полученные результаты свидетельствуют о том, что гипотеза об ускоренном движении слоев зернового вороха (скольжении по плоскостям, угол наклона которых близок к углу естественного откоса зерна) сквозь продолговатые отверстия решетчатого днища наклонной камеры адекватно отражает характер процесса. Если бы действовала гипотеза об истечении зерна с по-

стоянной (или уменьшающейся) скоростью, в связи с падением напора (по аналогии с жидкостью), то существенной разницы между интенсивностью сепарации при углах  $0^\circ$  и  $90^\circ$  быть не должно, поскольку суммарное живое сечение отверстий остается неизменным.

Для обеспечения наиболее интенсивной сепарации очесанного вороха на решетчатом днище наклонной камеры боковые кромки его отверстий должны быть сориентированы по направлению перемещения скребка [208].

Определим пропускную способность экспериментальной установки. Для оценки ее количественных параметров найдем время сепарации (истечения) свободного зерна сквозь отверстия решетчатого днища для одного контрольного участка

$$t_{cen} = \frac{L}{v_{mp} \cdot n_{уч}} = \frac{0,92}{3 \cdot 4} = 0,076 \text{ с}, \quad (4.32)$$

где  $L=0,92 \text{ м}$  – длина поверхности сепарирования;

$v_{mp}=3 \text{ м/с}$  – скорость плавающего транспортера наклонной камеры;

$n_{уч}=4$  – количество контрольных участков.

Объем свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища будет равен

$$V_{зер} = \frac{m_{зер}}{\rho_{зер}} = \frac{0,14}{850} = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3, \quad (4.33)$$

где  $m_{зер}=0,14 \text{ кг}$  – масса свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия решетчатого днища на одном контрольном участке;

$\rho_{зер}=850 \text{ кг/м}^3$  – плотность зерна пшеницы.

Следовательно, расход свободного зерна через отверстия решетчатого днища составит

$$Q_{зер} = \frac{V_{зер}}{t_{cen}} = \frac{1,65 \cdot 10^{-4}}{0,076} = 2,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (4.34)$$

Скорость сепарации (истечения) свободного зерна сквозь отверстия решетчатого днища найдем как

$$v_{cen} = \frac{Q_{зер}}{S_{отв}}, \quad (4.35)$$

где  $S_{отв}$  – площадь «живого сечения» отверстий решетчатого днища, приходящаяся на один контрольный участок,  $m^2$ .

Площадь «живого сечения» отверстий решетчатого днища, приходящаяся на один контрольный участок равна

$$S_{отв} = \frac{S_{\Sigma}}{n_{уч}}, \quad (4.36)$$

где  $S_{\Sigma}$  – суммарная площадь «живого сечения» отверстий решетчатого днища,  $m^2$ . Суммарную площадь «живого сечения» решетчатого днища определим для пяти рядов, содержащих по двенадцать отверстий с размерами  $160 \times 8$  мм (рис. 3.13).

$$S_{\Sigma} = 5 \cdot 12 \cdot 160 \cdot 8 = 768000 \text{ мм}^2 = 0,0768 \text{ м}^2. \quad (4.37)$$

Таким образом

$$S_{отв} = \frac{S_{\Sigma}}{n_{уч}} = \frac{0,0768}{4} = 0,0192 \text{ м}^2. \quad (4.38)$$

Подставив (4.38) в (4.35), окончательно получим

$$v_{cen} = \frac{Q_{зер}}{S_{отв}} = \frac{2,17 \cdot 10^{-3}}{0,0192} = 0,113 \text{ м/с}. \quad (4.39)$$

Поскольку разница теоретического (2.195) и экспериментального параметра (4.55) составляет 7,62%, то предложенная научная гипотеза с приемлемой степени адекватности отражает процесс сепарации вороха сквозь решетчатое днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна.

#### **4.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА СЕТЧАТОЙ ЯЧЕИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Для выявления численных характеристик процесса сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине сетчатого транспортера,

производилась регистрация массы его прохода сквозь ячейки полотна на каждом из четырех контрольных участков (рис. 4.31).

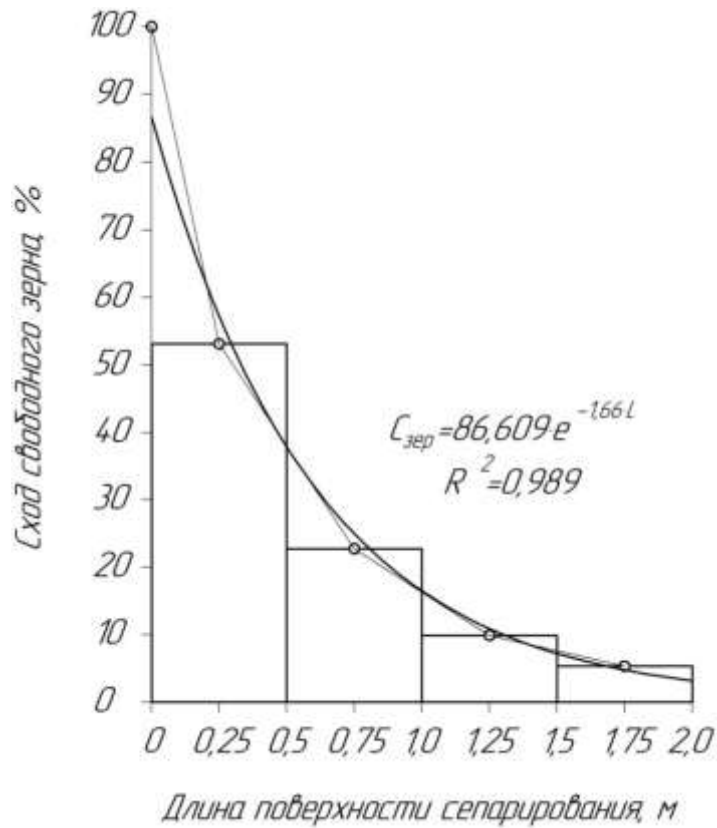


Рисунок 4.31 – Убывание свободного зерна по длине сетчатого транспортера (при  $v_{с.тр}=3$  м/с и  $S_{яч}=255$  мм<sup>2</sup>)

Остаток зерна определялся разницей между его исходным количеством в ворохе в начале участка и массой прохода на его длине. То есть, в начале эксперимента в ворохе зафиксировано стопроцентное количество свободного зерна. Далее, по мере прохождения свободного зерна по сетчатому ячеистому транспортеру, его количество убывает. Расчет количества свободного зерна, поступившего на второй контрольный участок (53,15%), определен разницей между предыдущим значением (100%) и количеством свободного зерна, прошедшего сквозь отверстия на первом контрольном участке (46,85%). Аналогичным образом были получены и остальные значения (22,71; 9,89; и 5,34% соответственно).

Полученные данные были обработаны в программе «Excel» [50, 141, 290]. По ним построен график убывания доли свободного зерна (от его ис-

ходного количества, принятого за 100%) по длине поверхности сепарирования (рис. 4.31). Уравнение регрессии, наиболее адекватно отражающее характер выявленных зависимостей ( $R^2=0,989$ ), имеет экспоненциальный вид

$$C_{\text{зер}} = 86,609 \cdot e^{-1,66L}, \quad (4.40)$$

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

$L$  – длина поверхности сепарирования, м.

Следует отметить, что экспоненциальная зависимость адекватно отражает характер изменения содержания свободного зерна в соломе в зависимости от длины сепарирующей поверхности и в случае с клавишным соломотрясом [105, 131]. Это является дополнительным свидетельством адекватности и достоверности полученных результатов.

По аналогичной методике были обработаны данные, характеризующие процесс сепарации сквозь ячейки сетчатого транспортера половы (рис. 4.32) и солоmistых включений (рис. 4.33). Согласно полученным результатам, был также построен график изменения количества указанных компонентов в ворохе по длине транспортера, принимая их исходную массу в начале процесса за 100%. Уравнение регрессии, наиболее полно отражающее характер зависимостей ( $R^2=0,971$ ), имеет вид

$$C_n = 88,806 \cdot e^{-1,032L}, \quad (4.41)$$

где  $C_n$  – количество половы, выраженное в процентах от ее исходного значения, имевшегося в начале процесса сепарации (сход половы), %;

$L$  – длина поверхности сепарирования, м.

Убывание соломы по длине сетчатого транспортера имеет вид ( $R^2=0,989$ )

$$C_c = 98,479 \cdot e^{-0,159L}, \quad (4.42)$$

где  $C_c$  – количество соломы, выраженное в процентах от ее исходного значения, имевшегося в начале процесса сепарации (сход соломы), %;

$L$  – длина поверхности сепарирования, м.



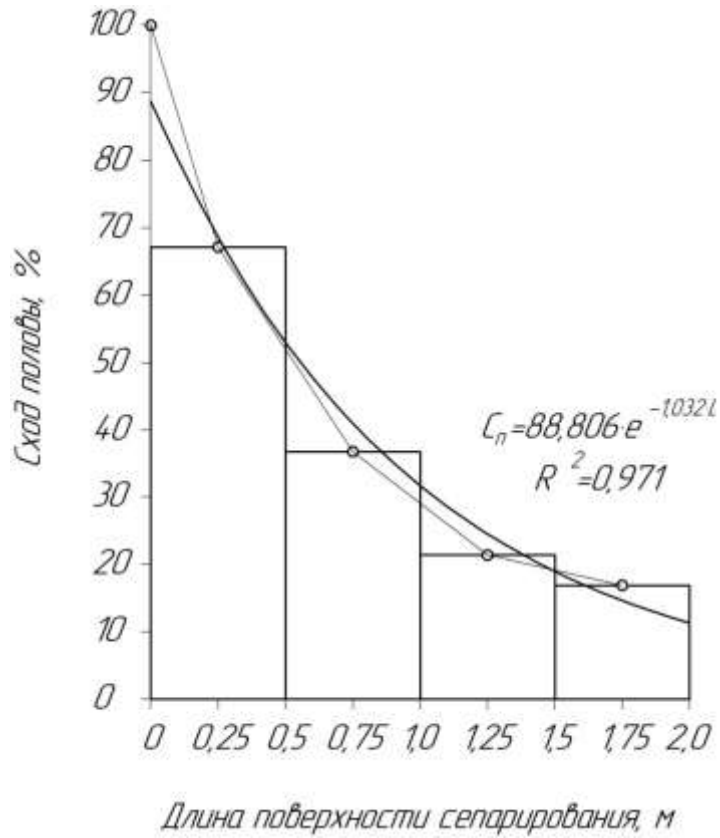


Рисунок 4.32 – Убывание соломы по длине сетчатого транспортера (при  $v_{с.тр}=3$  м/с и  $S_{яч}=255$  мм<sup>2</sup>)

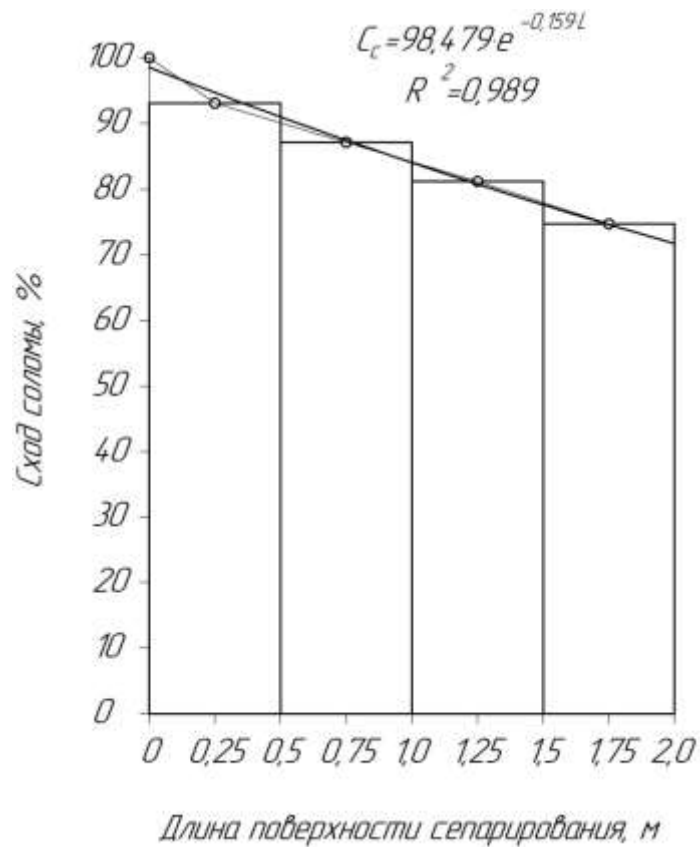


Рисунок 4.33 – Убывание соломы по длине сетчатого транспортера (при  $v_{с.тр}=3$  м/с и  $S_{яч}=255$  мм<sup>2</sup>)

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.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что 94,66% свободного зерна проходит сквозь ячейки сетчатого полотна, а 5,34% – идет сходом (рис. 4.31). Проход половы составляет порядка 83,11% (рис. 4.32), а проход солоmistых включений – не превышает 25,33% (рис. 4.33). При этом прохождение колосовой части вороха сквозь ячейки сетчатого транспортера во всех сериях эксперимента не наблюдалось.

Сход свободного зерна обусловлен тем, что при проведении серии экспериментов длина сепарирующей поверхности оказалась недостаточной. Таким образом, для полного исключения поступления свободного зерна в молотильную камеру зерноуборочного комбайна, необходимо либо увеличить длину сетчатого транспортера, либо увеличить размеры ячеек его полотна. При этом, однако, следует иметь в виду, что в технике достижение стопроцентного результата не всегда является экономически оправданной задачей. Так, реальные потери зерна на клавишном соломотрясе принято оценивать величиной порядка 1,25% [131]. При том, что это безвозвратные потери. Попадание же небольшой части свободного зерна в молотильное пространство не приведет к значимому ущербу, поскольку дроблению подвергается лишь небольшая доля непосредственно взаимодействующих с бичами зерен.

Задавшись величиной  $C_{зер}=1\%$  (согласно агротехническим требованиям дробление семенного материала не должно превышать 1% [102, 283, 284]), определим необходимую для этого длину поверхности сепарирования по следующему равенству

$$86,609 \cdot e^{-1,66L} = 1. \quad (4.43)$$

Решив его, определим длину сетчатого транспортера, обеспечивающую проход 99% свободного зерна, то есть

$$L = \frac{4,461}{1,66} \approx 2,687. \quad (4.44)$$

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. Максимальный проход свободного зерна сквозь отверстия сетчатого транспортера составляет порядка 94,66%. Для обеспечения прохода 99% свободного зерна из очесанного зернового вороха, необходимо чтобы длина сепарирующей поверхности составляла не менее 2,69 м.

#### **4.4.1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ СЕТЧАТОГО ТРАНСПОРТЕРА НА ЕГО СЕПАРИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ**

Полученные данные были обработаны в программе «Excel» [50]. По ним построен график (рис. 4.34), характеризующий зависимость количества свободного зерна прошедшего сквозь ячейки сетчатого транспортера от его скорости. Уравнение регрессии, наиболее полно отражающее характер зависимостей ( $R^2=0,976$ ), имеет линейный вид

$$P_{\text{зер}} = -10,860 \cdot v_{\text{с.тр}} + 126,351, \quad (4.45)$$

где  $P_{\text{зер}}$  – количество свободного зерна, прошедшего сквозь ячейки сетчатого транспортера (проход свободного зерна), %;

$v_{\text{с.тр}}$  – скорость сетчатого транспортера, м/с.

Анализ полученной зависимости (рис. 4.34) свидетельствует о том, что по мере увеличения скорости сетчатого транспортера количество свободного зерна, прошедшего сквозь его ячейки, уменьшается, а количество сошедшего с него зерна, наоборот, возрастает. При этом максимальный проход свободного зерна (94,66%) наблюдается при минимальной скорости сетчатого транспортера, равной 3 м/с. Наличие свободного зерна обусловлено тем, что

при проведении серии экспериментов, длина сепарирующей поверхности оказалась недостаточной.

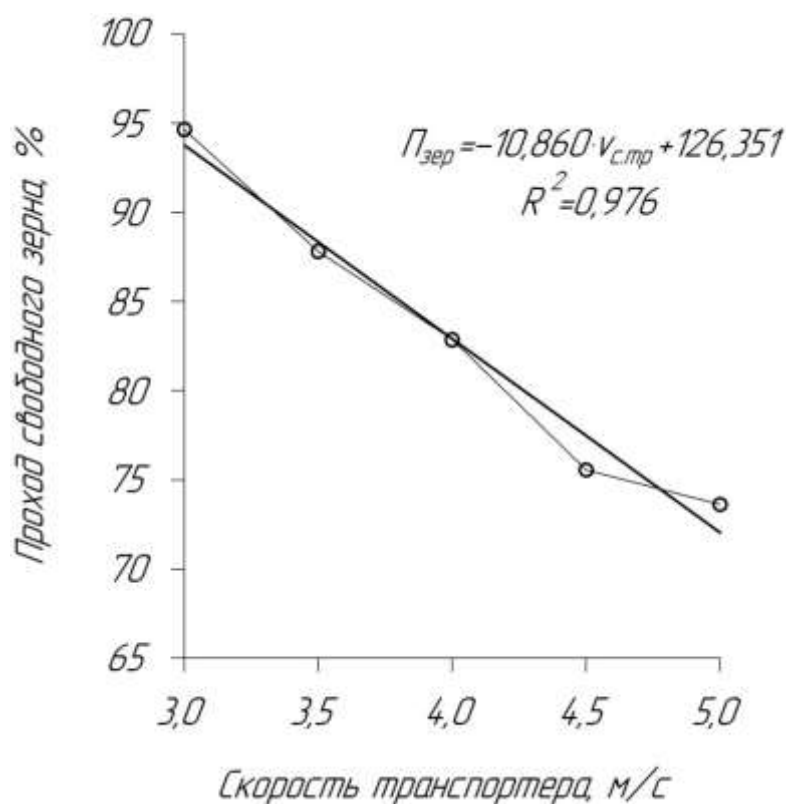


Рисунок 4.34 – Изменение количества свободного зерна прошедшего сквозь ячейки сетчатого транспортера в зависимости от его скорости (при площади ячеек полотна  $S_{\text{яч}}=255 \text{ мм}^2$ )

Для выявления характера процесса сепарации свободного зерна, были построены графики убывания свободного зерна по длине поверхности сепарирования (рис. 4.35), с регистрацией его количества на четырех контрольных участках. При этом за стопроцентное количество свободного зерна принято начало проведения эксперимента на момент его поступления в установку. Расчет количества свободного зерна, поступившего на второй контрольный участок (57,98%), определен разницей между предыдущим значением (100%) и количеством свободного зерна прошедшего сквозь отверстия на первом контрольном участке (42,02%). Аналогичным образом были получены и остальные значения (38,09; 21,49 и 12,18% соответственно) (рис. 4.35, а).

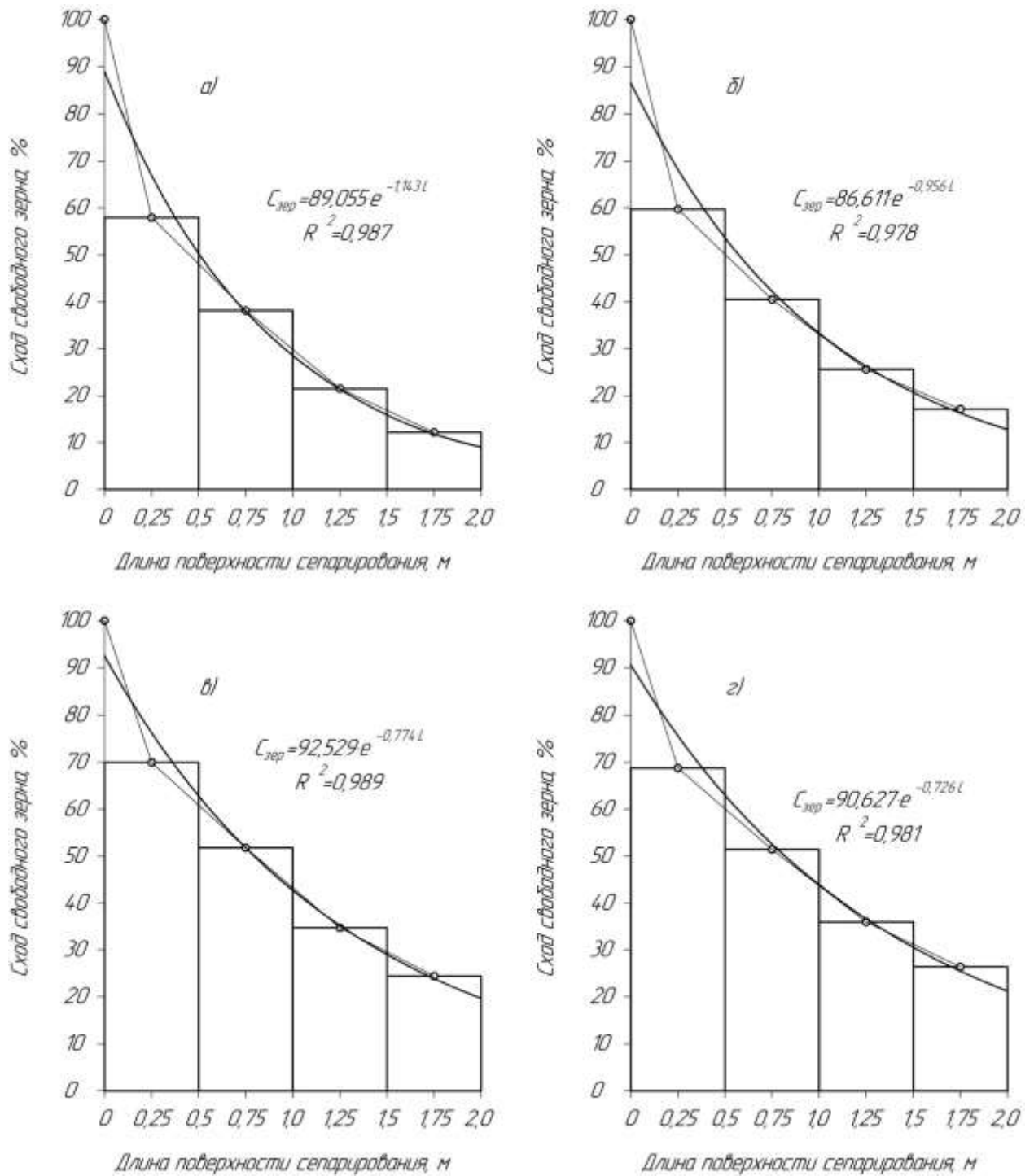


Рисунок 4.35 – Убывание свободного зерна из очесанного зернового вороха по длине поверхности сепарирования при скорости сетчатого транспортера ( $S_{яч}=255$  мм<sup>2</sup>): а)  $v_{c,mp}=3,5$  м/с; б)  $v_{c,mp}=4,0$  м/с; в)  $v_{c,mp}=4,5$  м/с; г)  $v_{c,mp}=5,0$  м/с

Аналогично методике, описанной в разделе 4.4, при помощи программы «Mathcad» [104] определены минимальные значения длин сетчатого транспортера, обеспечивающие проход 99% свободного зерна (рис. 4.36).

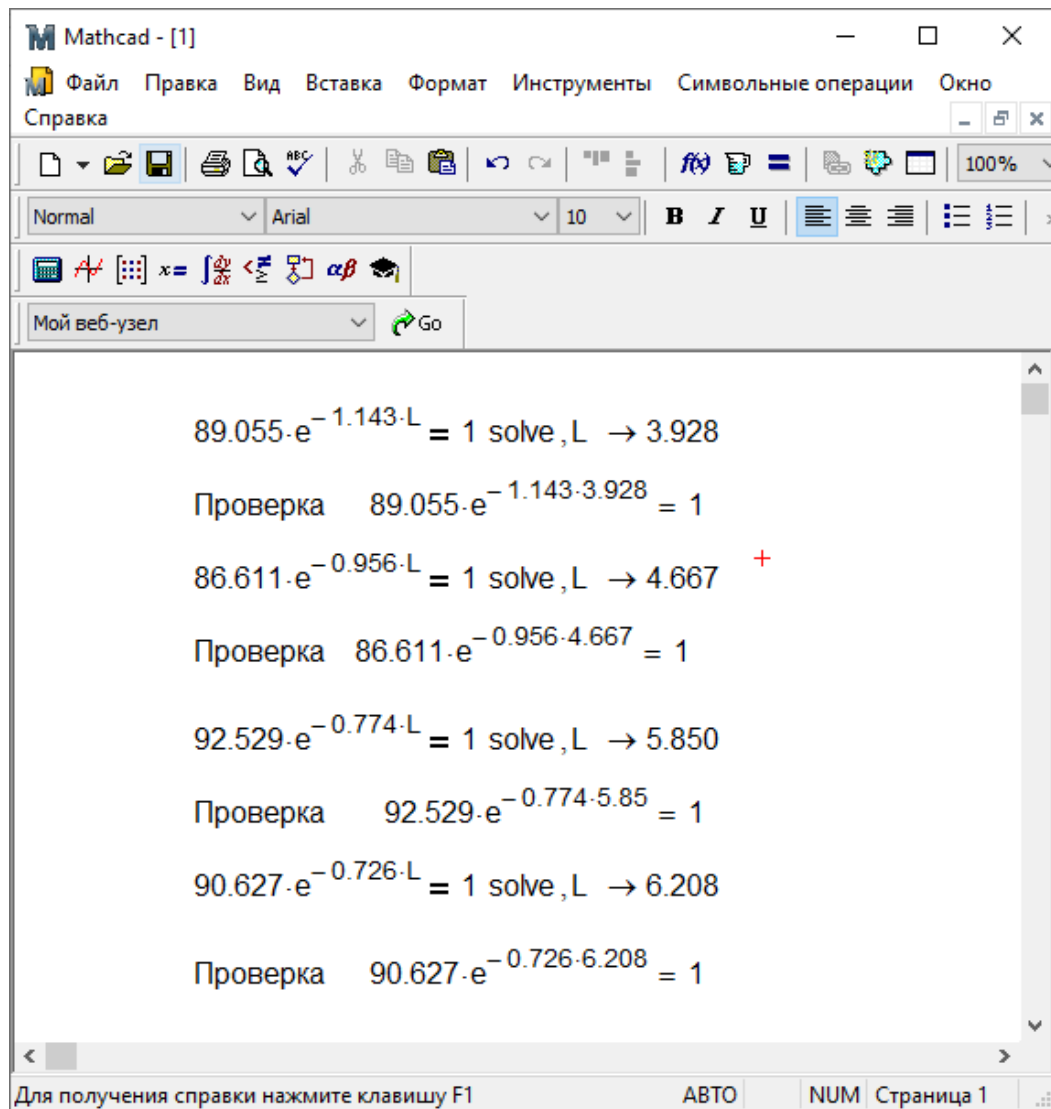


Рисунок 4.36 – Скриншот рабочего окна программы «Mathcad» при определении длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от скорости сетчатого транспортера

По ним получена зависимость длины сетчатого транспортера (обеспечивающая выделение 99% свободного зерна) от его скорости (рис. 4.37). Уравнение регрессии представляет собой прямолинейный вид ( $R^2=0,975$ )

$$L = 1,792 \cdot v_{c.mp} - 2,498, \quad (4.46)$$

где  $L$  – длина поверхности сепарирования,  $m$ ;

$v_{c.mp}$  – скорость сетчатого транспортера,  $m/c$ .

Представленный график свидетельствует о том, что, по мере увеличения скорости сетчатого транспортера, его длина, обеспечивающая выделение

99% свободного зерна, возрастает. При этом минимальная длина сепарирующей поверхности 2,69 м соответствует минимальной скорости сетчатого транспортера, равной 3 м/с.

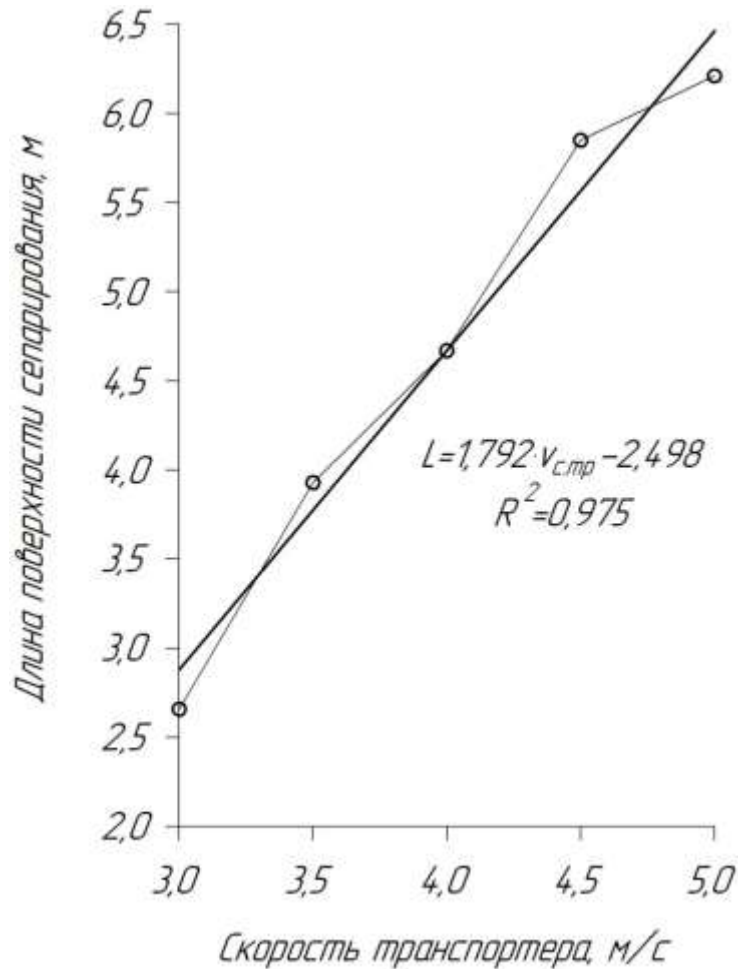


Рисунок 4.37 – Зависимость длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от скорости сетчатого транспортера

Полученные данные свидетельствуют о том, что эффективная сепарация свободного зерна из очесанного зернового вороха на сетчатом транспортере, смонтированном между наклонной камерой и молотильным устройством, возможна. Для обеспечения максимальной сепарации свободного зерна из очесанного зернового вороха длина сетчатого транспортера должна быть не менее 2,69 м. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на оптимизации размеров ячеек сетчатого полотна [180].

#### 4.4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ОТВЕРСТИЙ СЕТЧАТОГО ТРАНСПОРТЕРА НА ЕГО СЕПАРИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Данные эксперимента были обработаны в программах «Excel» [50] и «STATISTICA» [30]. По ним получена таблица 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты исследования влияния размеров отверстий сетчатого транспортера на его сепарирующую способность

Номер опыта	Факторы		Выходной параметр		
	Скорость транспортера $v_{с.мп}, м/с$	Площадь ячейки полотна $S_{яч}, мм^2$	Проход свободного зерна $П_{зер}, \%$	Проход половы $П_n, \%$	Проход соломы $П_с, \%$
1	3	255	94,66	83,11	25,33
2	3	1225	98,83	95,10	34,89
3	3	3600	99,49	97,30	41,77
4	3	9000	99,89	98,46	67,53
5	4	9000	99,47	91,34	59,01
6	4	3600	98,44	90,05	40,96
7	4	1225	97,35	88,92	30,73
8	4	255	82,87	77,28	19,68
9	5	3600	97,12	89,92	40,25
10	5	255	73,63	69,44	17,48
11	5	9000	99,28	91,03	55,08
12	5	1225	94,74	80,49	39,30

С целью выявления оптимальных размеров сетчатого полотна, по результатам экспериментов (табл. 4.8), были построены графики изменения количества свободного зерна от площади ячеек при различной скорости транспортера (рис. 4.38).

Уравнение регрессии при скорости сетчатого транспортера  $v_{с.мп}=3 м/с$  имеет следующий вид ( $R^2=0,998$ ) (рис. 4.38, а)

$$\begin{cases} П_{зер} = 0,158 + 0,371 \cdot S_{яч}, \text{ при } П_{зер} \leq 98,219; \\ П_{зер} = 98,827 + 1,257 \cdot 10^{-4} \cdot S_{яч}, \text{ при } П_{зер} > 98,219. \end{cases} \quad (4.47)$$



Уравнение регрессии при скорости сетчатого транспортера  $v_{c.mp}=4$  м/с имеет следующий вид ( $R^2=0,999$ ) (рис. 4.38, б)

$$\begin{cases} P_{зер} = 0,147 + 0,324 \cdot S_{яч}, \text{ при } P_{зер} \leq 94,533; \\ P_{зер} = 97,234 + 2,579 \cdot 10^{-4} \cdot S_{яч}, \text{ при } P_{зер} > 94,533. \end{cases} \quad (4.48)$$

Уравнение регрессии при скорости сетчатого транспортера  $v_{c.mp}=5$  м/с имеет следующий вид ( $R^2=0,999$ ) (рис. 4.38, в)

$$\begin{cases} P_{зер} = 0,150 + 0,288 \cdot S_{яч}, \text{ при } P_{зер} \leq 91,192; \\ P_{зер} = 94,499 + 5,526 \cdot 10^{-4} \cdot S_{яч}, \text{ при } P_{зер} > 91,192, \end{cases} \quad (4.49)$$

где  $P_{зер}$  – количество зерна, прошедшего сквозь ячейки сетчатого транспортера (проход зерна), %;

$S_{яч}$  – площадь ячейки сетчатого полотна,  $мм^2$ .

Использование других типов уравнений оказалось нецелесообразным, поскольку в этом случае происходит сильное искажение результатов процесса.

Аналогично свободному зерну, были построены графики изменения количества половы (рис. 4.38) и соломы (рис. 4.39) от площади ячеек при различной скорости транспортера.

В результате анализа полученных данных установлено, что сепарирующая способность сетчатого полотна повышается с увеличением площади «живого сечения» отверстий (рис. 4.38), и понижается с увеличением линейной скорости транспортера (табл. 4.8). Максимальный проход свободного зерна (99,89%) наблюдается при скорости сетчатого транспортера 3 м/с и площади «живого сечения» отверстий 9000  $мм^2$  (что, соответствует размерам ячеек полотна 90×100 мм). И наоборот, минимальный проход свободного зерна (73,63%) происходит при скорости сетчатого транспортера 5 м/с и площади «живого сечения» отверстий 255  $мм^2$  (размер ячеек 17×15 мм). Аналогичная зависимость прослеживается также на полове и соломе (рис. 4.38 и 4.39).

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.

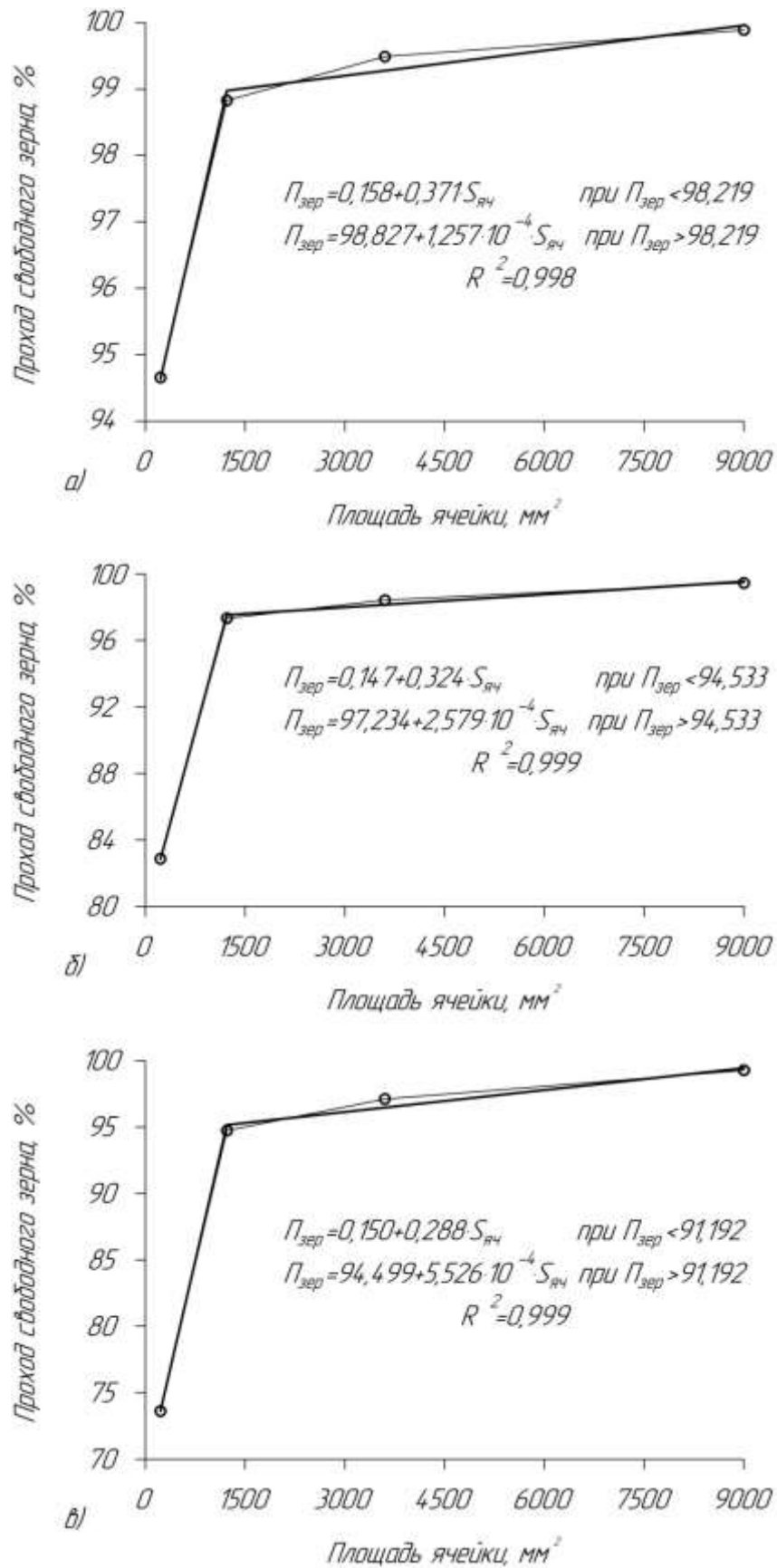


Рисунок 4.38 – График изменения количества свободного зерна от площади ячеек сетчатого полотна при скорости транспортера: а)  $v_{с.тp}=3$  м/с; б)  $v_{с.тp}=4$  м/с; в)  $v_{с.тp}=5$  м/с

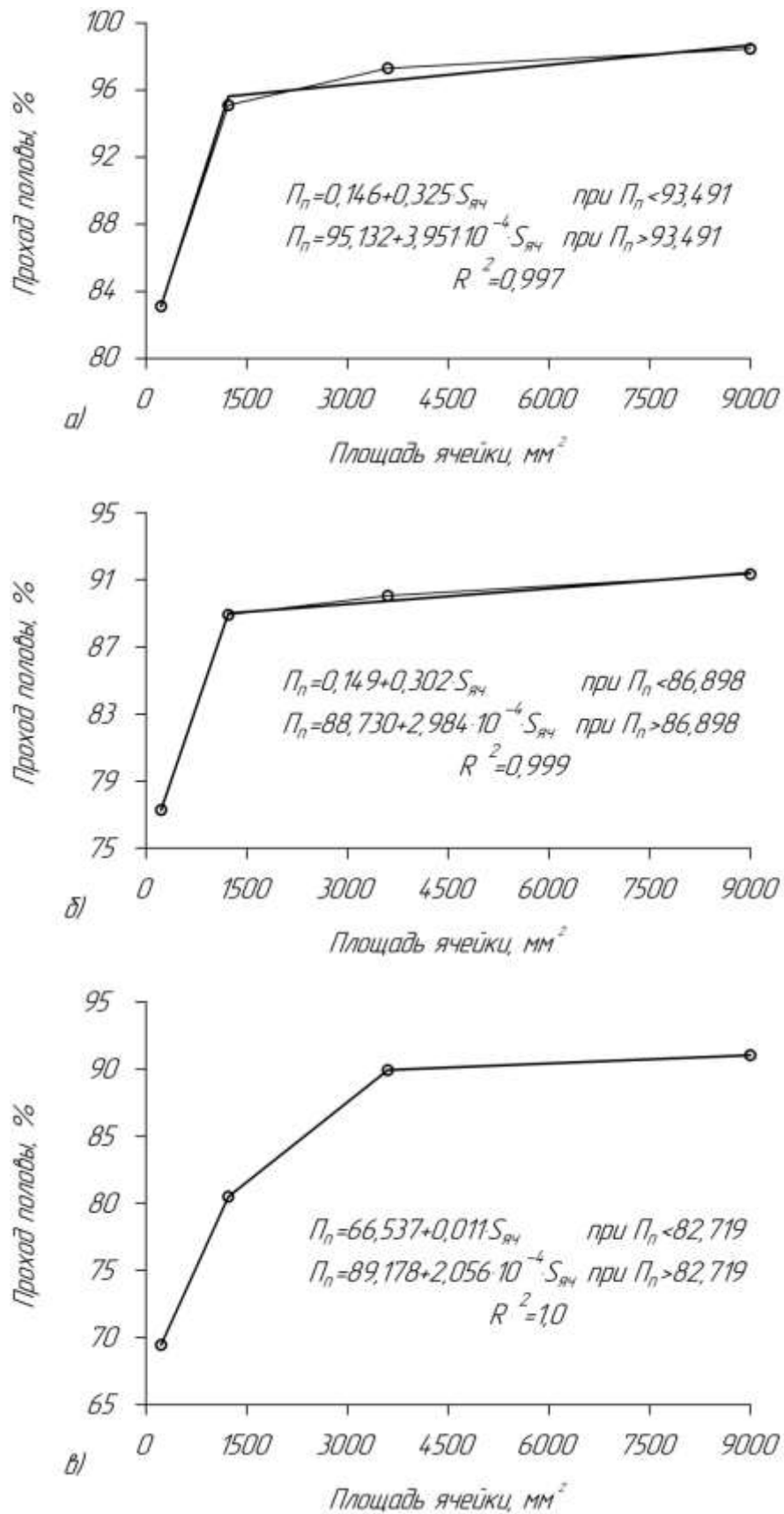


Рисунок 4.39 – График изменения количества половы от площади ячеек сетчатого полотна при скорости транспортера: а)  $v_{с.мп}=3$  м/с; б)  $v_{с.мп}=4$  м/с; в)  $v_{с.мп}=5$  м/с

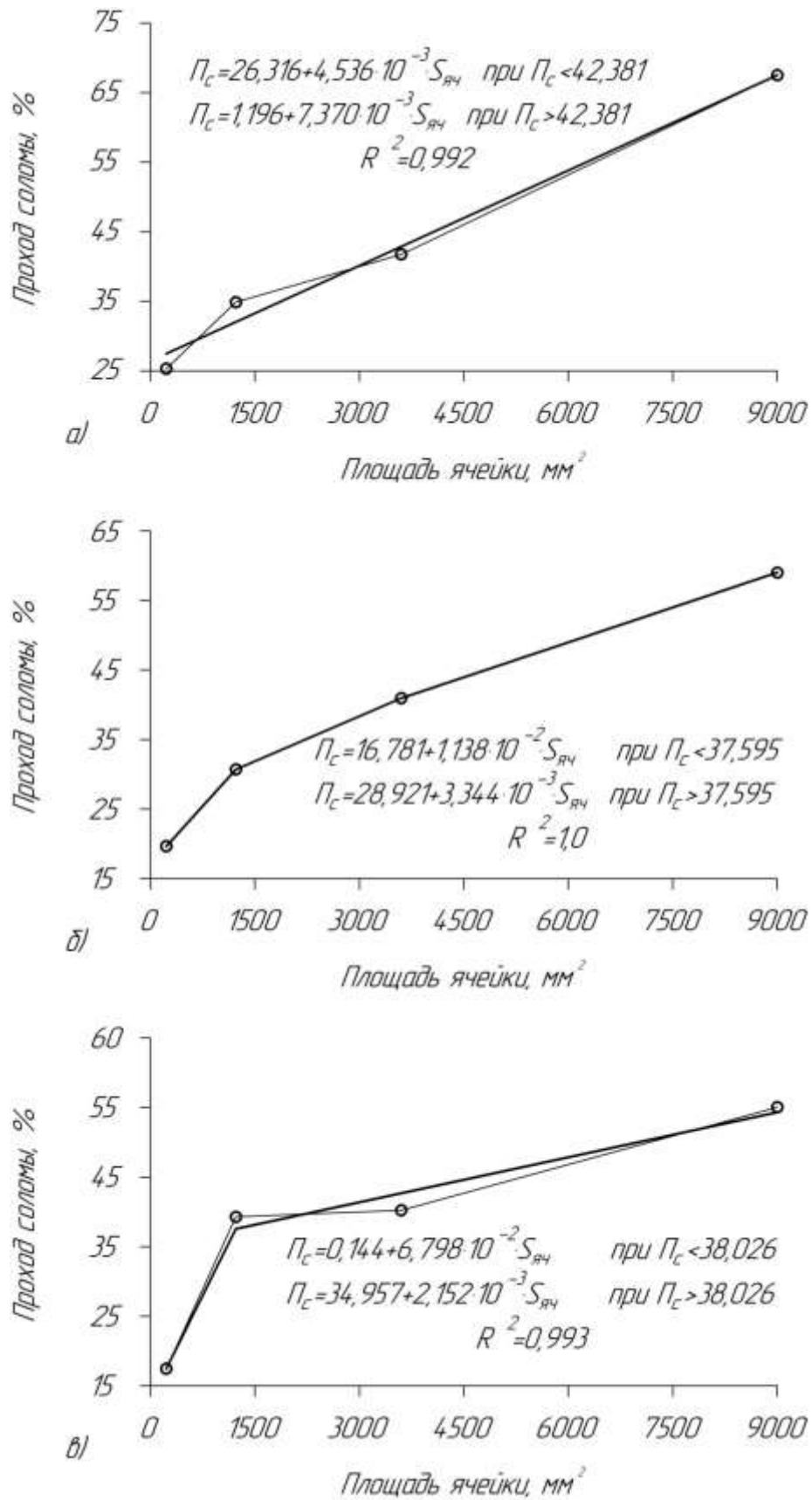


Рисунок 4.40 – График изменения количества соломы от площади ячеек сетчатого полотна при скорости транспортера: а)  $v_{c.mp}=3$  м/с; б)  $v_{c.mp}=4$  м/с; в)  $v_{c.mp}=5$  м/с

Существенными отличия в сепарирующей способности становятся только при использовании сетчатого полотна с размерами ячеек  $17 \times 15$  мм и  $90 \times 100$  мм, а также  $17 \times 15$  мм и  $60 \times 60$  мм. При этом, использование сетчатого полотна с минимальными размерами ячеек ( $17 \times 15$  мм) является нецелесообразным, поскольку в этом случае снижается эффективность сепарирующего устройства, а применение сетчатого полотна с размерами ячеек  $60 \times 60$  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 половы, 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  $35 \times 35$  мм.

Для обеспечения стабильности процесса сепарации свободного зерна при очесе растений на корню целесообразно использовать сетчатое полотно с размерами ячеек  $35 \times 35$  мм. В этом случае проход свободного зерна будет находиться в пределах 95-99%, половы – 80-95% и соломы – 35-39% [158].

Практическая реализация такого технического решения требует смещения молотильного барабана комбайна назад и укорачивания соломотряса (за ненадобностью) без нарушения его технологического процесса.

## ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. В результате исследования 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» варьи-

руется в пределах 10-150 мм и 15-480 мм, при среднем значении указанных параметров 54 мм и 125 мм соответственно.

2. Вымолот зерна посредством 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 градусов.

3. Минимизировать поступление в молотильную камеру зерноуборочного комбайна свободного зерна, позволяет снабжение наклонной камеры решетчатым днищем, длина которого должна быть не менее 1,18 м (при площади «живого сечения» отверстий порядка 60% от поверхности днища). При этом отверстия должны иметь размеры 8×160 мм и быть сориентированными длинной стороной по направлению перемещения скребка транспортера.

4. Доказано, что 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 (Патент РФ № 2677349). 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).

5. Поскольку расхождение между теоретическими и экспериментальными данными составляет 7,62%, то предложенная научная гипотеза с приемлемой степени адекватности отражает процесс сепарации вороха сквозь решетчатое днище наклонной камеры зерноуборочного комбайна и не противоречит фактам, известным из специализированной литературы.

## **5 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА**

### **5.1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА ПРИ РАБОТЕ С ОЧЕСАННЫМ ЗЕРНОВЫМ ВОРОХОМ**

Анализ конструкций зерноуборочных комбайнов, присутствующих на рынке сельскохозяйственной техники, свидетельствует о том, что и для этого вида машин свойственна закономерность, характерная для тенденций развития любых технических систем. По мере накопления опыта эксплуатации и его научного осмысления все большее число вариантов исполнения тех или иных рабочих органов отбраковывается, в связи с чем, практически все конструктивное многообразие зерноуборочных комбайнов может быть сведено к реализации одной и той же технологической последовательности воздействия на объект уборки (рис. 5.1) [161, 173].

Процесс уборки, как правило, начинается с формирования потока растительной массы на корню [167]. Затем плодосодержащие части растений отделяют от корней (срезают их вместе со стеблями или отрывают от последних) и, в зависимости от способа уборки (однофазный или двухфазный), либо укладывают в валок (с последующим подбором и обмолотом), либо сразу обмолачивают. При обмолоте происходит разделение вороха на два технологических потока, в которых осуществляется выделение зерна, поступающего после очистки в бункер, и недомолоченных колосьев, возвращаемых на повторную обработку, а солома и полова выводятся за пределы комбайна. При этом в зависимости от принятого в хозяйстве способа дальнейшего использования незерновой части урожая, она может измельчаться и разбрасываться по поверхности поля, укладываться в валки или (в последнее время довольно редко) накапливаться в копнителе, с периодическим сбросом копны на поверхность поля. Такая последовательность технологических операций харак-





увеличивается до 0,9-2,0. При этом в нем содержится до 85% свободного зерна [92, 124]. В связи с этим (теоретически) производительность машины (по сравнению с традиционной жаткой) могла бы быть увеличена в 1,3-1,5 раза, и на 20-25% мог бы быть снижен удельный расход топлива.

Однако реализовать на практике потенциальные преимущества очесывания зерна на корню пока не представляется возможным. В связи с практически полным отсутствием соломы, нарушается режим работы молотильного барабана, недогруженным оказывается соломотряс, а очистка, наоборот, оказывается перегруженной. Кроме того, велик риск дробления свободного зерна, поступающего в молотильную камеру.

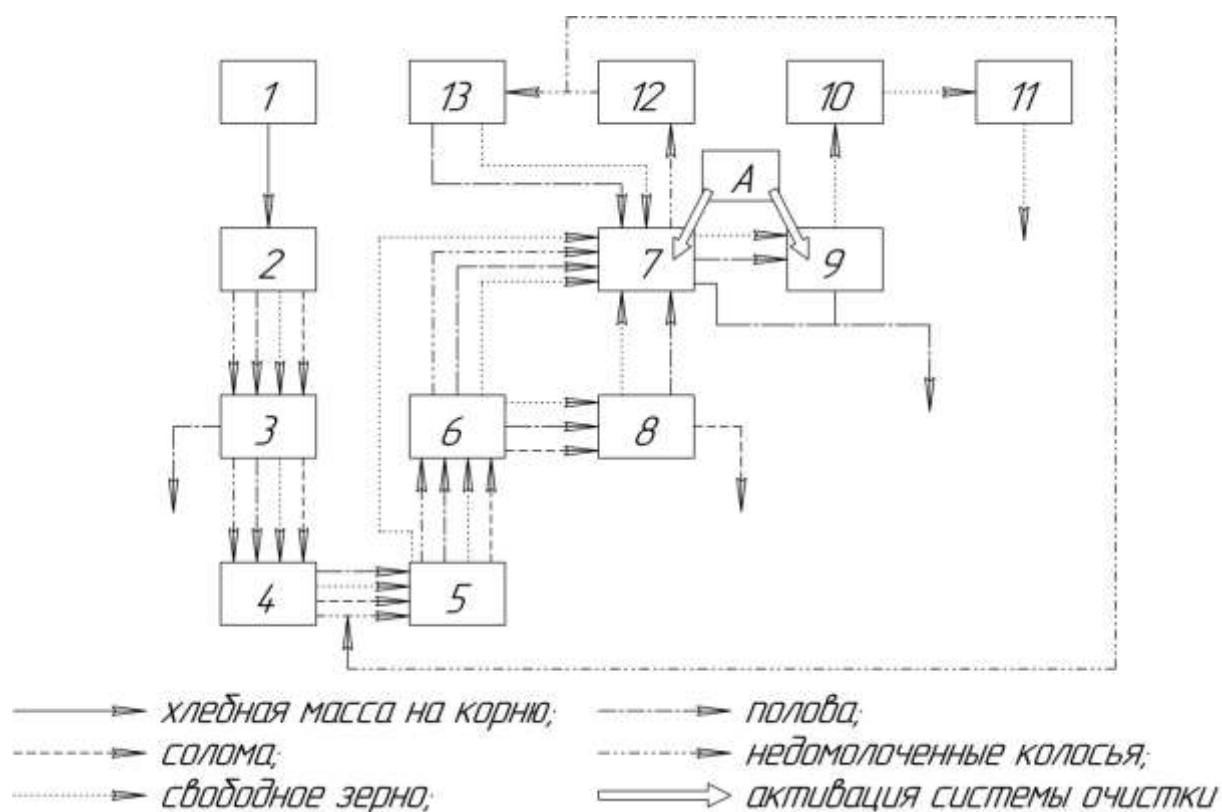


Рисунок 5.2 – Структурно-технологическая схема зерноуборочного комбайна, оснащенного очесывающим адаптером: 1 – формирование потока стеблей на корню; 2 – очес растений; 3 – первичная сепарация полова и ее вывод за пределы комбайна; 4 – подача вороха в молотилку; 5 – отделение большей части свободного зерна; 6 – обмолот; 7 – первичная сепарация зернового вороха; 8 – отделение соломы и ее вывод за пределы комбайна; 9 – окончательная очистка зерна; 10 – подача зерна в бункер; 11 – выгрузка зерна из бункера; 12 – отделение недомолоченных колосьев и их подача на повторный обмолот; 13 – второй (и последующие, при необходимости) цикл обмолота колосьев с возвратом вороха на первичную очистку

Существенным образом увеличить пропускную способность молотилки при таких параметрах вороха возможно, если предварительно осуществлять отделение от него свободного зерна и значительной части половы (рис. 1.29). Для этого технологическая последовательность воздействия на объект уборки должна быть существенно образом изменена (рис. 5.2). Она отличается от традиционной (рис. 5.1) предварением операцией предварительной сепарации вороха процесса его обмолота [163, 167].

Для осуществления этой технологической задачи нами было разработано молотильное устройство, содержащее два воронкообразных тела вращения 1 и 2 (рис. 5.3), сориентированных большими диаметрами вниз [192-194]. Их рабочие поверхности размещены в пространстве так, что образуют молотильную камеру, одна из поверхностей которой периодически совершает угловые колебания. Перемещающиеся сверху вниз в молотильном пространстве колосья 5 подвергаются поперечным колебательным нагружениям ударно-вытирающего типа, вследствие чего происходит отрыв зерновок 6 и их просыпание вниз сквозь решетчатую поверхность внутреннего тела вращения 2. Окончательная сепарация зерна должна осуществляться на перфорированной поверхности 3, выполняющей функцию соломотряса.

Экспериментальная установка (рис. 5.3) была изготовлена на заводе «Тихмаш» (г. Тихвин, Ленинградской области). Проведенные в 2010 году ее предварительные испытания свидетельствуют о том, что принятая нами концепция выделения зерна себя оправдала. Хлебная масса при совместном действии силы тяжести и угловых колебаний перемещалась вниз по уклону в сторону уменьшающегося зазора молотильной камеры, где и происходил отрыв зерен. Часть из них сквозь отверстия перфорированной поверхности тела вращения 2 просыпалась сразу внутрь на выгрузное устройство 4. Окончательное выделение зерна из соломы происходило на нижней части колеблющегося тела 3. Солома 8 сходила с перфорированной поверхности 3, а зерно вместе с половиной 7 просыпались внутрь выгрузного устройства 4. За счет того, что наружное воронкообразное тело 1 имело возможность перемещаться в

вертикальном направлении относительного внутреннего тела 2, происходил надежный контакт обмолачиваемой массы с рабочими поверхностями молотильной камеры, без нарушений технологического процесса обмолота [164].

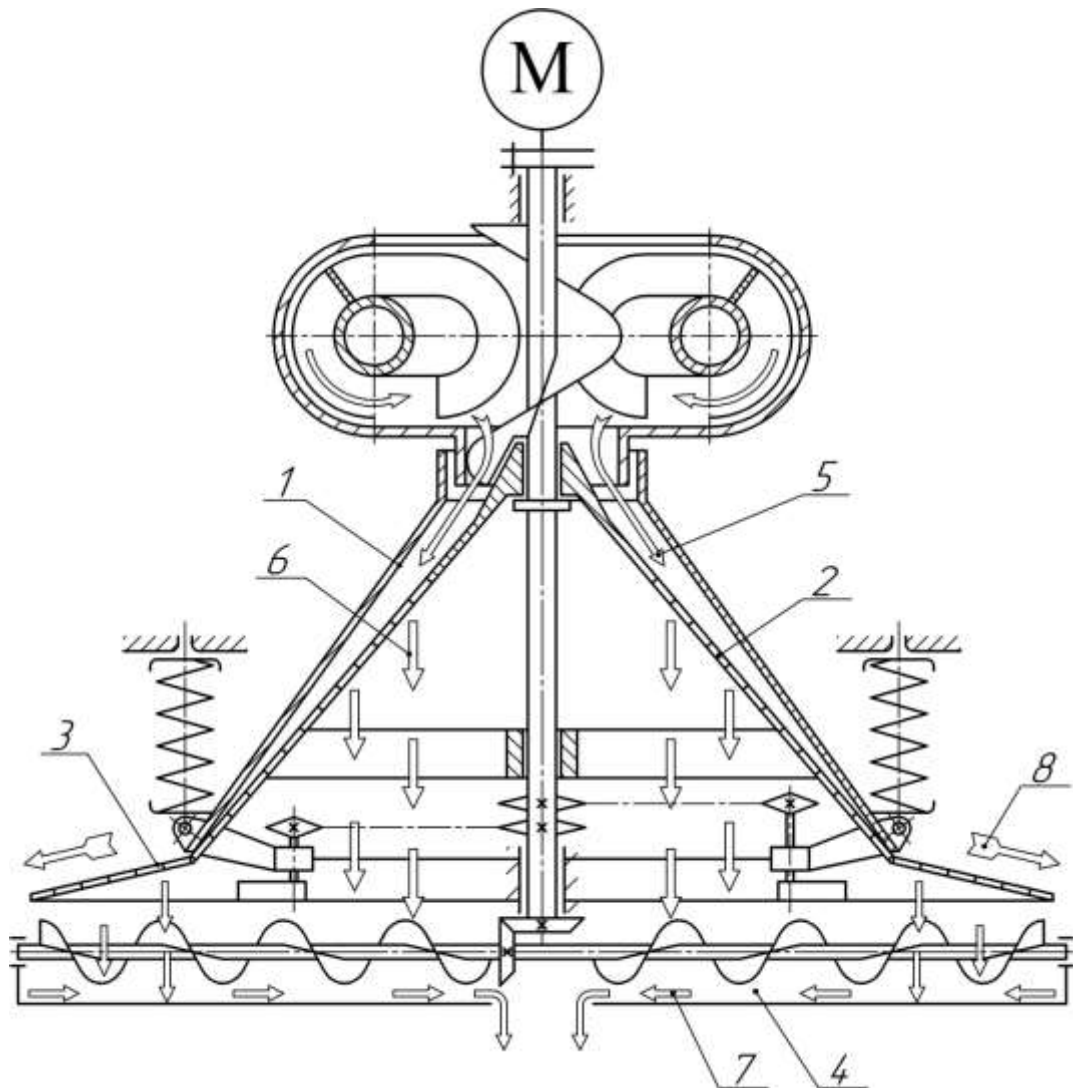


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема экспериментального молотильного устройства (Патент РФ № 2278498): 1 – наружное воронкообразное тело; 2 – внутреннее воронкообразное тело; 3 – перфорированная поверхность; 4 – выгрузное устройство; 5 – поток хлебной массы; 6 – поток основной массы зерен; 7 – поток зернового вороха; 8 – поток соломы

В результате испытаний установлено, что при принятых нами конструктивно-кинематических параметрах молотильного устройства значительная часть (до 10%) колосьев проходила сквозь перфорированную поверхность тела 2, в связи с чем, полученный зерновой ворох подлежит выделению из него прошедших колосьев и направлению их повторно на домолот [164].

Повысить вымолачивающую способность молотильного устройства (рис. 5.3) можно за счет интенсификации процесса взаимодействия рабочих органов с хлебной массой. Для этого каждое из тел вращения 1 и 2 необходимо выполнить из набора нескольких усеченных конусов 4 и 5 с увеличивающимися сверху вниз диаметрами оснований и последовательным чередованием угла наклона их образующих (рис. 5.4). Причем поверхности пологих конусов 4 внутреннего тела вращения 2 должны иметь отверстия 6 большего проходного сечения, а поверхности чередующихся с ними конусов 5, имеющих больший угол наклона, дополнительно снабжены вытирающими элементами 7 [197].

При подаче хлебной массы 25 на верхнее основание перфорированной поверхности внутреннего тела вращения 2 угловые колебания последнего обеспечивают ее перемещение от центра оси его вращения 3 к периферии. В результате этого происходит сепарация всего свободного зерна 26 из вороха и подача его в выгрузное устройство. Оставшаяся колосовая часть урожая (вместе с соломой) посредством крыла вертикального шнека 27 смещается в сторону молотильной камеры. Поскольку рабочая поверхность молотильной камеры представляет собой набор нескольких усеченных конусов 4 и 5, то характер воздействия рабочих органов устройства с хлебной массой 25 при прохождении ее через молотильный зазор происходит с нарастающим итогом окружной скорости вытирающих элементов и амплитуды колебаний.

Такое повышение интенсивности взаимодействия рабочих органов молотильного устройства с хлебной массой обеспечивает полное выделение зерна из колоса. Причем на входной части в молотильный зазор под действием ударов минимальной силы вымолачиваются более спелые зерна, а затем менее спелые (более прочные связи зерна с колосом). При дальнейшем поступлении хлебной массы 25 на поверхность пологих конусов 4 внутреннего тела вращения 2, имеющего отверстия 6 большего проходного сечения, происходит сепарация всего свободного зерна 26 из вороха и подача его в выгрузное устройство (по стрелкам 28), на шнеки 20 и 21, минуя молотильную камеру.

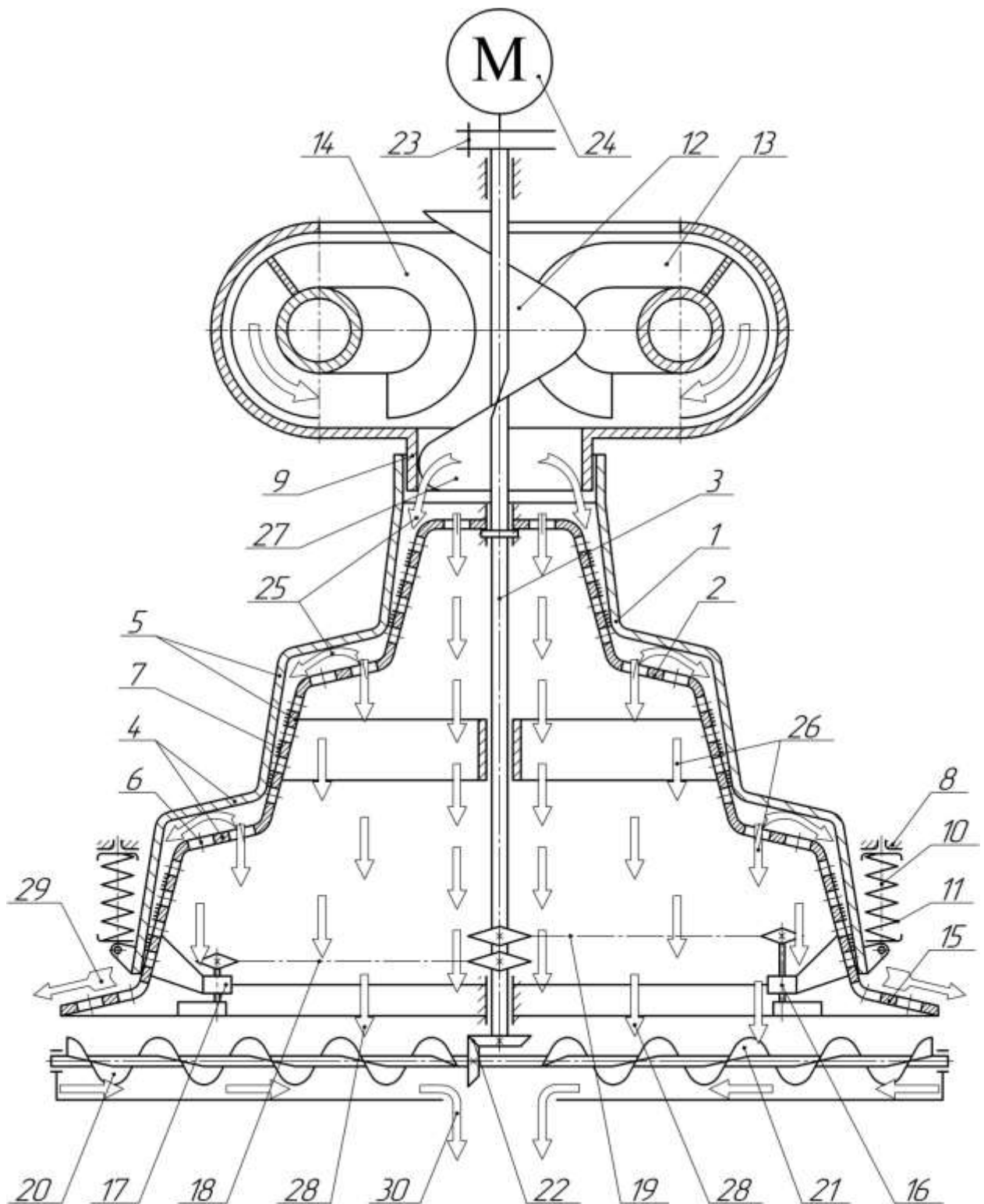


Рисунок 5.4 – Молотильное устройство (Патент РФ № 2534265): 1, 2 – тела вращения; 3 – контрприводной вал; 4, 5 – усеченные конуса; 6 – отверстия; 7 – вытирающие элементы; 8 – рама; 9 – горловина; 10 – болты; 11 – пружина; 12, 13, 14, 20, 21 – шнек; 15 – нижняя часть; 16, 17 – дебалансы; 18, 19 – передача; 22 – привод; 23 – муфта; 24 – источник крутящего момента; 25 – хлебная масса; 26, 28 – свободное зерно; 27 – крыло вертикального шнека; 29 – направление движения соломы; 30 – движение зерна на очистку

Окончательное выделение зерна из соломы происходит на нижней части 15 колеблющегося тела вращения 2. В связи с уменьшением угла наклона его поверхности и увеличения амплитуды колебаний процесс сепарации в этой зоне достигает наибольшей интенсивности. Солома сходит с поверхности (по стрелке 29), а зерно вместе с половой просыпается внутрь выгрузного устройства и подается на окончательную очистку (по стрелке 30).

Такое техническое решение обеспечивает полное выделение зерна из колоса, надежно исключив возможность дробления свободного зерна рабочими органами молотилки. При этом процесс выделения зерна из колоса происходит без нарушения технологического процесса и адаптирован к физико-механическим и биологическим свойствам зерновых культур.

Для выделения легких примесей мы синтезировали принципиально новую конструктивно-технологическую схему зерноуборочного комбайна, в которой предусмотрено предварительное разделение вороха на фракции прежде, чем зерносодержащие компоненты (необмолоченные или частично недомолоченные колосья) поступят на обмолот (рис. 5.5). Проблему объединения в одном рабочем органе транспортирующей и сепарирующей функции позволяет решить использование циклона 1, вентилятор 6 которого должен обеспечить гарантированную скорость транспортировки и исключить срыв воздушного потока и сбои в работе. Вместе с воздухом 7 должна быть удалена и самая легкая фракция вороха, существенно уменьшающая пропускную способность очистки. Таким образом, приобретенная ворохом при очесе кинетическая энергия должна быть использована как для осуществления его транспортировки, так и для первичной сепарации [196]. Более тяжелые фракции 8 (свободное зерно и колосья разной степени обмолота) посредством дозатора 9 могут быть поданы на молотильное устройство любого типа. Исходя из состава вороха и предпочтительной технологии его обработки, в первую очередь, следует выделить свободное зерно 11, для чего целесообразно использовать горизонтальную решетчатую поверхность деки 4, совершающей угловые колебания вокруг вертикальной оси.

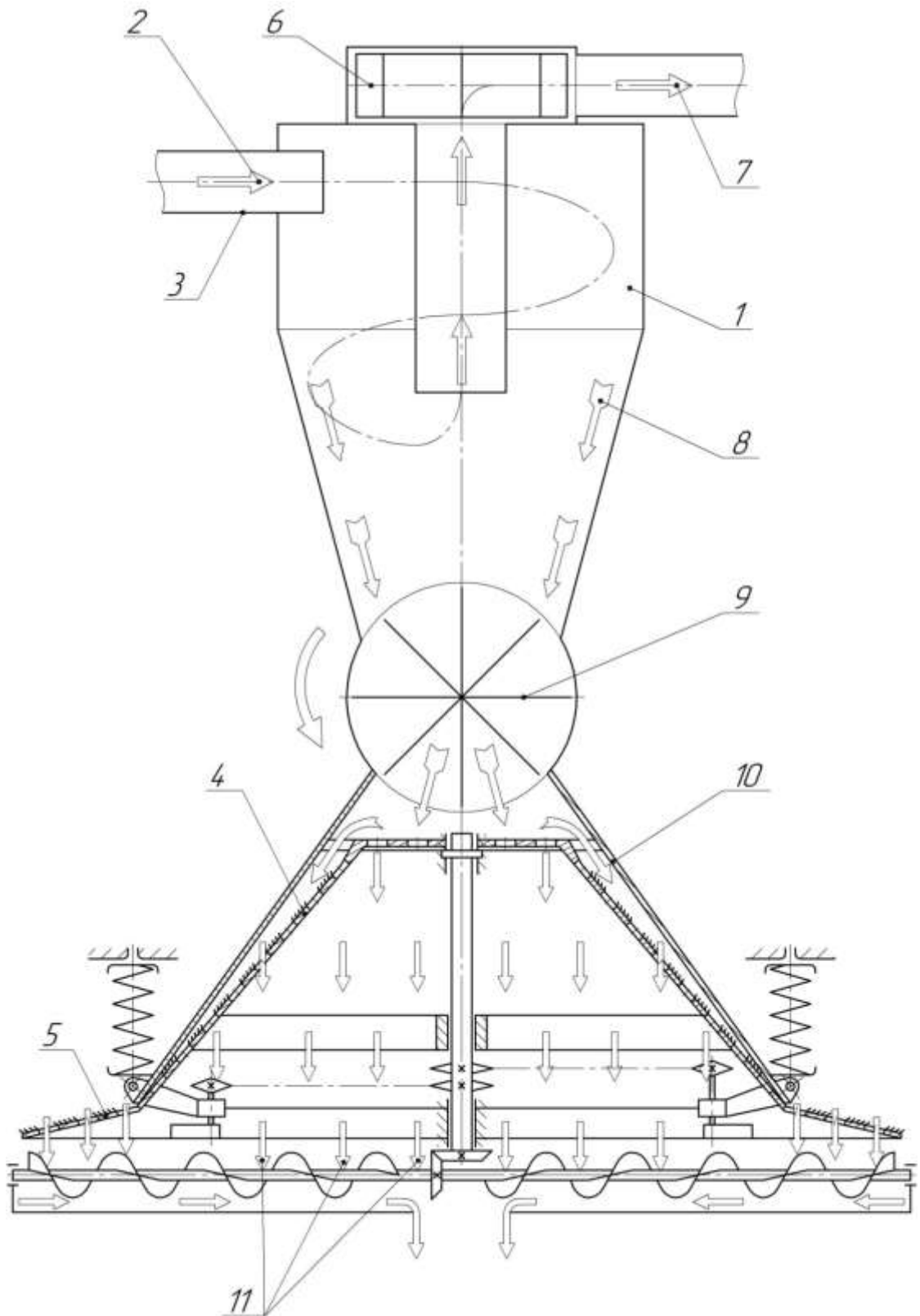


Рисунок 5.5 – Технологическая схема зерноуборочного комбайна (Патент РФ № 2482656): 1 – циклон; 2 – ворон в воздушном потоке; 3 – входной патрубок; 4 – подвижная часть молотильного устройства (дека); 5 – соломотряс; 6 – вентилятор; 7 – воздушный поток с легкими примесями; 8 – свободное зерно, тяжелые примеси и колосья; 9 – дозатор; 10 – неподвижная дека; 11 – свободное зерно и мелкие примеси

Колосья и другие тяжелые примеси за счет центробежных сил должны отбрасываться на периферию горизонтального диска деки 4 и попадать в зазор между ее колеблющейся конусной поверхностью и внутренней поверхностью неподвижной декой 10. Поперечное колебательное воздействие поверхностей дек 4 и 10 на зерна в колосьях должно с минимальными затратами энергии обеспечить их эффективный домолот, а окончательное отделение зерна от растительных остатков должен осуществить кольцевой соломотряс 5.

Решение такой масштабной организационно-технической задачи, как разработка нового комбайна, реализующего принципиально иную (по сравнению с традиционной) технологическую схему воздействия на объект уборки, требует времени, финансирования и напряженных усилий нескольких научных коллективов. В связи с этим актуальной задачей ближайшего времени является максимально возможная адаптация существующего комбайна к работе с ворохом нетрадиционного состава. Нам представляются целесообразными следующие первоочередные мероприятия (рис. 1.29):

- исключение попадания большей части свободного зерна в молотильный зазор;
- активация процесса сепарации зерна и соломы;
- оптимизация распределения воздушного потока в очистке с целью его наиболее эффективного использования.

В этой связи, определенный интерес представляют попытки финской фирмы «Sampo Rosenlew Ltd» использовать для активизации процесса сепарации вороха воздушный поток, который в селекционном комбайне «Sampo 2010» подавался как на днище жатки, так и на вход массы в молотильный зазор. Причем для гашения скорости зерен и формирования воздушного потока нужного направления межбичевые пространства барабана были закрыты щитками.

Следует отметить, что в последних модификациях комбайнов этой фирмы такой способ активации процесса сепарации не используется. Тем не менее, сама по себе идея использования воздуха для более интенсивного раз-



деления вороха уже в пределах транспортной доски заслуживает внимания и экспериментальной проверки [167].

## 5.2 УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ СЕПАРАЦИЮ СВОБОДНОГО ЗЕРНА

Данный массив изобретений позволяет осуществить предварительную сепарацию свободного зерна либо непосредственно в молотильной камере зерноуборочного комбайна, либо в различных устройствах, смонтированных перед ней (рис. 1.29).

Рассмотрим первую группу изобретений, которые обеспечивают предварительную сепарацию свободного зерна непосредственно в молотильном устройстве зерноуборочного комбайна. Как правило, это достигается тем, что поперечное сечение каждой поперечной планки 3 отклонено от радиальной (по отношению к барабану 1) ориентации в сторону направления его вращения (рис. 5.6) [202]. Причем угол  $\psi$  между рабочей поверхностью планки 3 и радиусом, проведенным от оси вращения барабана 1 в ее среднюю часть, превышает угол трения хлебной массы 5 по металлу. При поступлении очесанной хлебной массы 5 в молотильную камеру происходит предварительная сепарация большей части свободного зерна 6. Поскольку поперечное сечение каждой планки 3 отклонено от радиальной (по отношению к барабану 1) ориентации в сторону направления его вращения, а угол  $\psi$  между ее рабочей поверхностью и радиусом, проведенным от оси вращения барабана 1 в ее среднюю часть, превышает угол трения хлебной массы 5 по металлу, то соригентированные в поперечном направлении необмолоченные колосья могут преодолеть силу трения по рабочей поверхности планки 3 и перемещаться в направление вращения барабана 1. Этому способствуют как импульсы движения, передаваемые бичами барабана 1, так и генерируемый им воздушный поток. Вследствие этого сгуживание хлебной массы 5 и забивание ею отверстий подбарабана 2 не происходит. Более мелкое свободное зерно 6, не имея

стабильного контакта с бичами барабана 1 и обладая существенно меньшей по сравнению с колосьями парусностью, теряет первичный импульс движения и проходит через решетчатую поверхность подбарабанья 2 вниз.

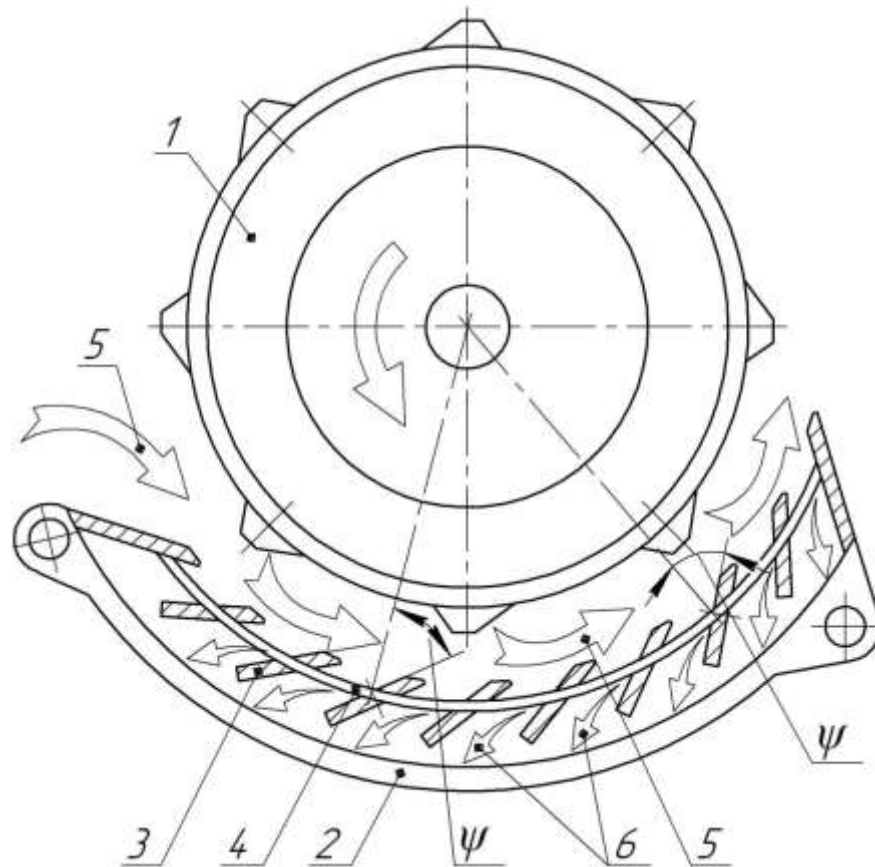


Рисунок 5.6 – Молотильное устройство (Патент РФ № 2653011): 1 – барабан; 2 – прутковопланчатое подбарабанье; 3 – поперечные планки; 4 – продольные прутки; 5 – хлебная масса; 6 – свободное зерно

Использование предлагаемого молотильного устройства позволяет выделить свободное зерно из очесанного вороха, исключить возможность сгуживания хлебной массы и забивания ею отверстий подбарабанья, а также повышает его сепарирующую способность.

Одним из недостатков рассмотренной группы изобретения является то, что сепарация свободного зерна происходит непосредственно в молотильной камере зерноуборочного комбайна. В результате этого не исключена вероятность дробления свободного зерна рабочими органами молотилки.

Вторая группа изобретений обеспечивает предварительную сепарацию свободного зерна за счет устройств, смонтированных перед молотильной камерой зерноуборочного комбайна. Предметом изобретения в таких случаях является либо наклонная камера, либо сепарирующее устройство, выполненное в виде решетчатой поверхности (снабженной различными активаторами) или в виде дополнительного соломотряса.

К одному из таких технических решений относится зерноуборочный комбайн 1 включающий наклонную камеру 2 с транспортером 3, снабженным скребками 4 и молотилку 5, между которыми смонтировано устройство для предварительного выделения свободного зерна (рис. 5.7) [203]. Последнее содержит сепарирующую решетку 6, которая смонтирована подвижно и снабжена встряхивающим механизмом 7. Причем горизонтальная ось 8, вокруг которой сепарирующая решетка 6 совершает угловые колебания, расположена выше оси вращения встряхивающего механизма 7.

Предлагаемый зерноуборочный комбайн работает следующим образом. При перемещении комбайна 1 по полю, адаптер (на схеме не показан) очесывает растения и подает хлебную массу 9 в сторону наклонной камеры 2. Скребки 4 транспортера 3 увлекают за собой хлебную массу 9 и направляют ее в сторону устройства для предварительного выделения свободного зерна. В результате того, что сепарирующая решетка 6 совершает угловые колебания вокруг горизонтальной оси 8, то происходит расслоение хлебной массы 9. Свободное зерно 10, перемещаясь в нижние слои, проходит сквозь отверстия сепарирующей решетки 6 и поступает на очистку, минуя молотильную камеру, а оставшаяся колосовая часть урожая 11, получив импульс движения вперед, переходит на обмолот. При этом исключается возможность забивания отверстий сепарирующей решетки компонентами очесанного зернового вороха.

Использование предлагаемого зерноуборочного комбайна позволяет минимизировать поступление свободного зерна в молотильную камеру, надежно исключив вероятность его дробления рабочими органами молотилки.

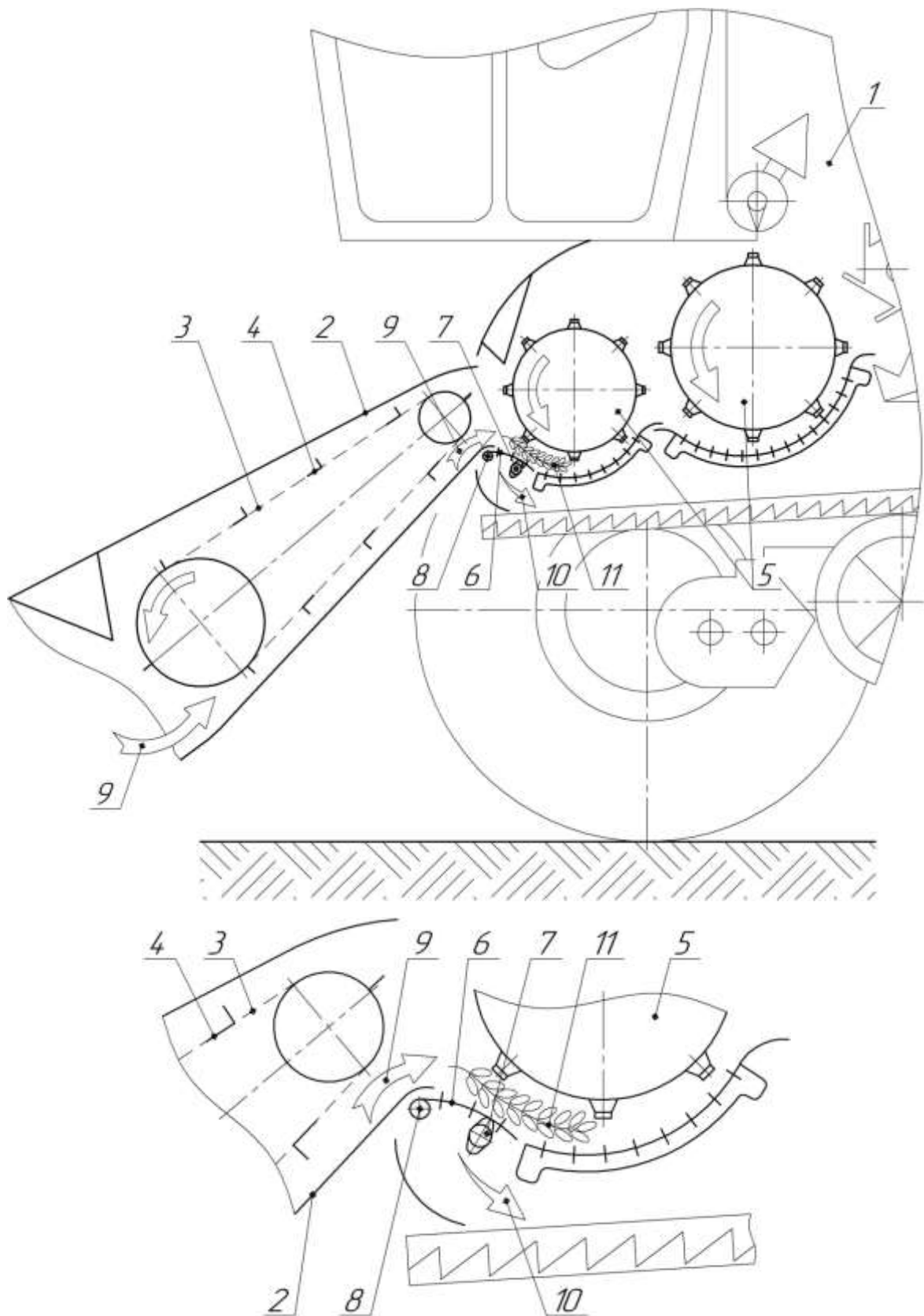


Рисунок 5.7 – Зерноуборочный комбайн, содержащий сепарирующую решетку (Патент РФ № 2655749): 1 – комбайн; 2 – наклонная камера; 3 – транспортер; 4 – скребок; 5 – молотилка; 6 – сепарирующая решетка; 7 – встряхивающий механизм; 8 – горизонтальная ось; 9 – хлебная масса; 10 – свободное зерно; 11 – колосовая часть урожая

Аналогичное техническое решение реализовано в зерноуборочном комбайне 1, содержащем наклонную камеру 2 и молотилку 5, между которыми смонтировано устройство для предварительного выделения свободного зерна (рис. 5.8) [204]. Последнее выполнено в виде сепарирующей решетки 6 и шнека 7, снабженного двумя многозаходными спиральями. При этом витки половинок 8 и 9 указанных спиралей со стороны наклонной камеры имеют наклон вправо на угол, превышающий  $45^\circ$  к вертикальной плоскости, а половинки 10 и 11 – влево.

Предлагаемый зерноуборочный комбайн работает следующим образом. При перемещении комбайна 1 по полю, адаптер (на схеме не показан) очесывает растения и подает полученную хлебную массу 12 в сторону наклонной камеры 2. Скрепки 4 транспортера 3 увлекают хлебную массу 12 за собой и направляют ее в сторону устройства для предварительного выделения свободного зерна. В связи с тем, что половинки 8-11 спиралей шнека 7 имеют разное направление навивки витков, в результате взаимодействия с ними происходит более интенсивное расслоение хлебной массы 12 по направлению стрелок 13. При этом свободное зерно 14, перемещаясь в нижние слои, пересекает отверстия сепарирующей решетки 6 по более длинной траектории (по диагонали), в результате чего увеличивается шанс его поступления непосредственно на очистку, минуя молотильную камеру. Оставшаяся колосовая часть урожая 15, получив посредством взаимодействия с витками спиралей шнека 7 импульс движения вперед, поступает на обмолот в молотилку 5. При этом дополнительное поперечное воздействие на колос способствует выделению из него части зерен уже на сепарирующей решетке 6, что увеличивает полноту обмолота в молотилке 5.

Использование предлагаемого зерноуборочного комбайна позволяет минимизировать поступление свободного зерна в молотильную камеру, сведя к минимуму вероятность его дробления рабочими органами молотилки.

Однако, в связи с тем, что длина сепарирующей решетки в рассмотренных двух вариантах имеет небольшие размеры (во всяком случае, меньше ее

ширины), то эффективность процесса предварительного выделения свободного зерна у них невелика.

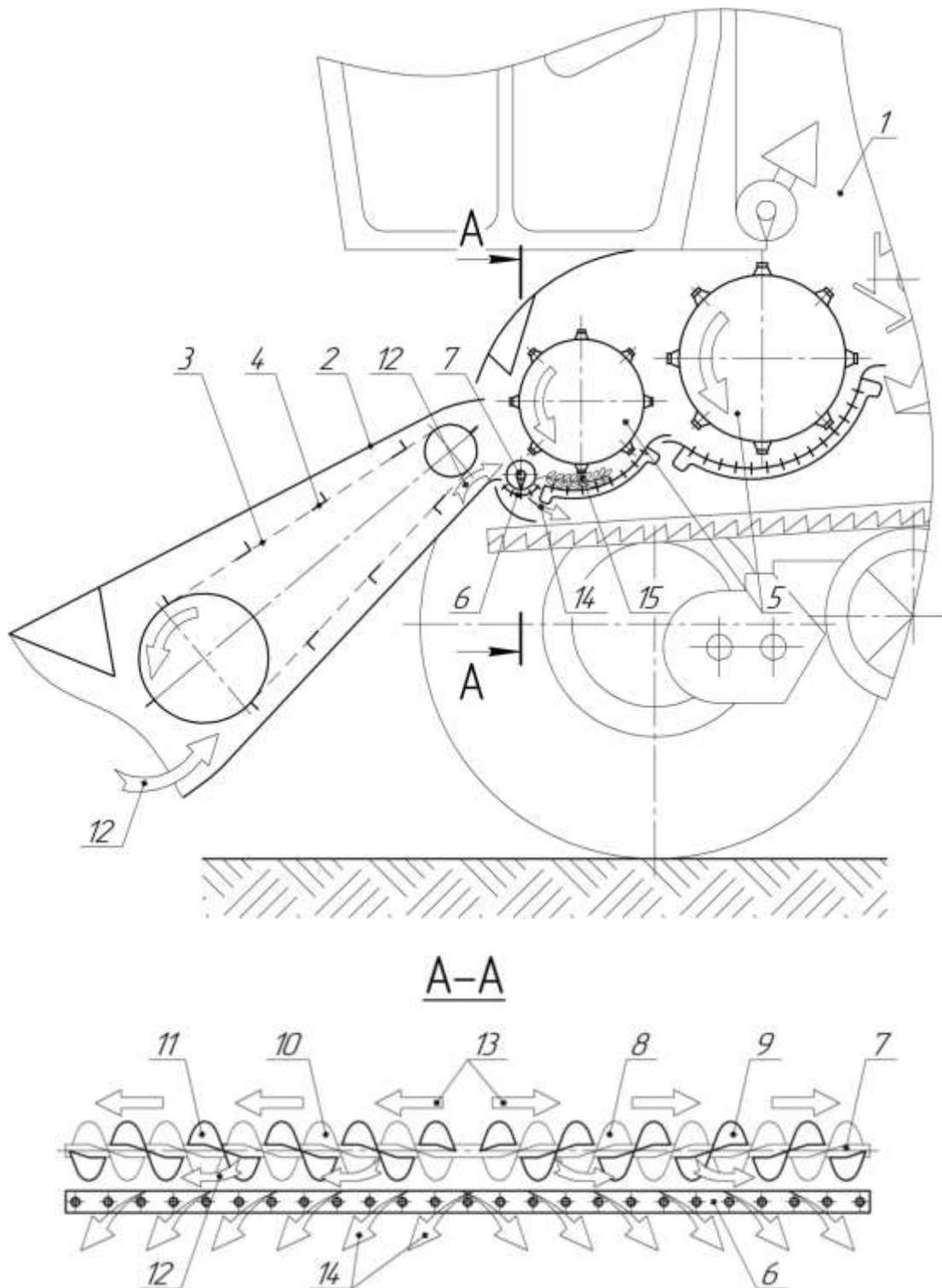


Рисунок 5.8 – Зерноуборочный комбайн, снабженный устройством для предварительного выделения свободного зерна (Патент РФ № 2658389): 1 – комбайн; 2 – наклонная камера; 3 – транспортер; 4 – скребок; 5 – молотилка; 6 – сепарирующая решетка; 7 – шнек; 8-11 – витки шнека; 12 – хлебная масса; 13 – направление движения хлебной массы; 14 – свободное зерно; 15 – колосовая часть урожая

Следующий вариант предварительного выделения свободного зерна из очесанного зернового вороха до его поступления в молотильную камеру предполагает размещение перед барабаном дополнительного клавишного соломотряса 7 (рис. 5.9), каждая клавиша которого представляет собой коробчатый корпус без днища [207]. При этом дополнительный клавишный соломотряс 7 смонтирован подвижно посредством коленчатого вала 8.

Предлагаемый зерноуборочный комбайн работает следующим образом. При перемещении комбайна 1 по полю, адаптер (на схеме не показан) очесывает растения и подает хлебную массу 9 в сторону наклонной камеры 2. Скребки 4 транспортера 3 увлекают ее за собой и направляют в сторону устройства для предварительного выделения свободного зерна. В результате того, что клавиши дополнительного соломотряса 7 совершают угловые колебания вокруг коленчатого вала 8, то происходит интенсивное расслоение хлебной массы 9. Свободное зерно 10, перемещаясь в нижние слои, проходит сквозь отверстия клавиш дополнительного соломотряса 7 и поступает на очистку 11, минуя молотильную камеру, а оставшаяся колосовая часть урожая 12, получив импульс движения вперед, переходит на обмолот. При этом исключается возможность забивания отверстий клавиш дополнительного соломотряса 7 компонентами очесанного зернового вороха.

Использование предлагаемого зерноуборочного комбайна позволяет минимизировать поступление свободного зерна в молотильную камеру, надежно исключив вероятность его дробления рабочими органами молотилки.

Одним из недостатков указанного технического решения является то, что практическая реализация идеи требует смещения молотильного барабана комбайна назад и укорачивания основного соломотряса (за ненадобностью).

Наиболее предпочтительным вариантом для осуществления предварительного выделения свободного зерна из очесанного зернового вороха до его поступления в молотилку является наклонная камера зерноуборочного комбайна (рис. 5.10). Она содержит плавающий транспортер 3, решетчатое днище 4 и устройство для отвода свободного зерна 5 из молотильной камеры 6.

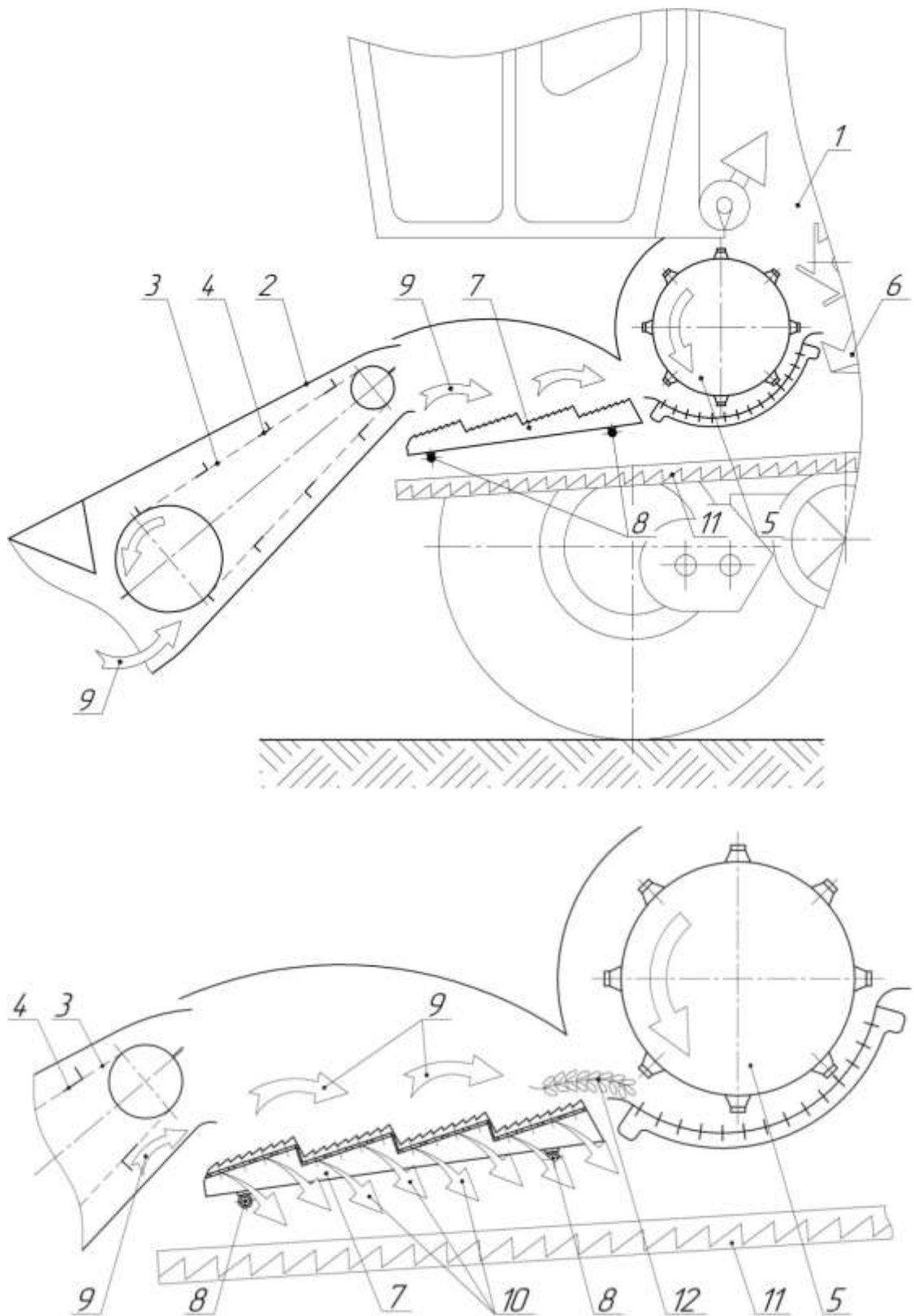


Рисунок 5.9 – Зерноуборочный комбайн, оснащенный дополнительным клавишным соломотрясом (Патент РФ № 2685735): 1 – комбайн; 2 – наклонная камера; 3 – транспортер; 4 – скребок; 5 – молотильное устройство; 6 – основной соломотряс; 7 – дополнительный соломотряс; 8 – коленчатый вал; 9 – хлебная масса; 10 – свободное зерно; 11 – система очистки; 12 – колосовая часть урожая



Отверстия 7 решетчатого днища 4 расположены продольно по отношению к направлению движения скребков 8, а плавающий транспортер 3 снабжен устройством для очистки отверстий 7 решетчатого днища 4. Устройство для очистки отверстий 7 решетчатого днища 4 выполнено в виде щетки 9, которая смонтирована после скребка 8 посредством поводка 10. При этом верхняя кромка каждого отверстия 7 снабжена криволинейным продольным язычком 11, сориентированным в направлении, противоположном направлению движения скребка 8 и расположенным ниже поверхности днища 4. Причем нижняя кромка 12 язычка 11 отогнута по отношению к поверхности днища 4 на угол  $\tau$ , превышающий  $90^\circ$  [208].

Наклонная камера зерноуборочного комбайна работает следующим образом. При перемещении зерноуборочного комбайна 2 по полю адаптер (на схеме не показан) очесывает растения. Полученный таким образом ворох 13, состоящий из свободного зерна, мелких примесей и недомолоченных колосьев с частью стеблей (с соломой), поступает в нижнюю часть наклонной камеры 1. Скребки 8 транспортера 3 увлекают за собой ворох 13 и перемещают его вверх (по направлению стрелки 14) вдоль решетчатого днища 4, где и происходит его предварительная сепарация. Свободное зерно и часть мелких примесей 15 проходят сквозь отверстия 7 решетчатого днища 4 и поступают на устройство для отвода свободного зерна 5. Далее свободное зерно и мелкие примеси 15 подаются на транспортную доску 16, а оставшаяся часть первичного вороха 13 (солома и частично недомолоченные колоски 17) подается плавающим транспортером 3 в молотильную камеру 6 комбайна 2 на домолот. В случае заклинивания отдельных компонентов 18 исходного вороха 13 в отверстия 7, следующая за скребком 8 щетка 9 либо проталкивает своим упругим ворсом указанный объект сквозь отверстие 7 вниз, либо перемещает его вперед до поверхности язычка 11. Совместное действие ворса щетки 9 и наклонной поверхности язычка 11 позволяет поднять компонент вороха 18 на поверхность решетчатого днища 4, ликвидируя, таким образом, забивание отверстий 7 [185].

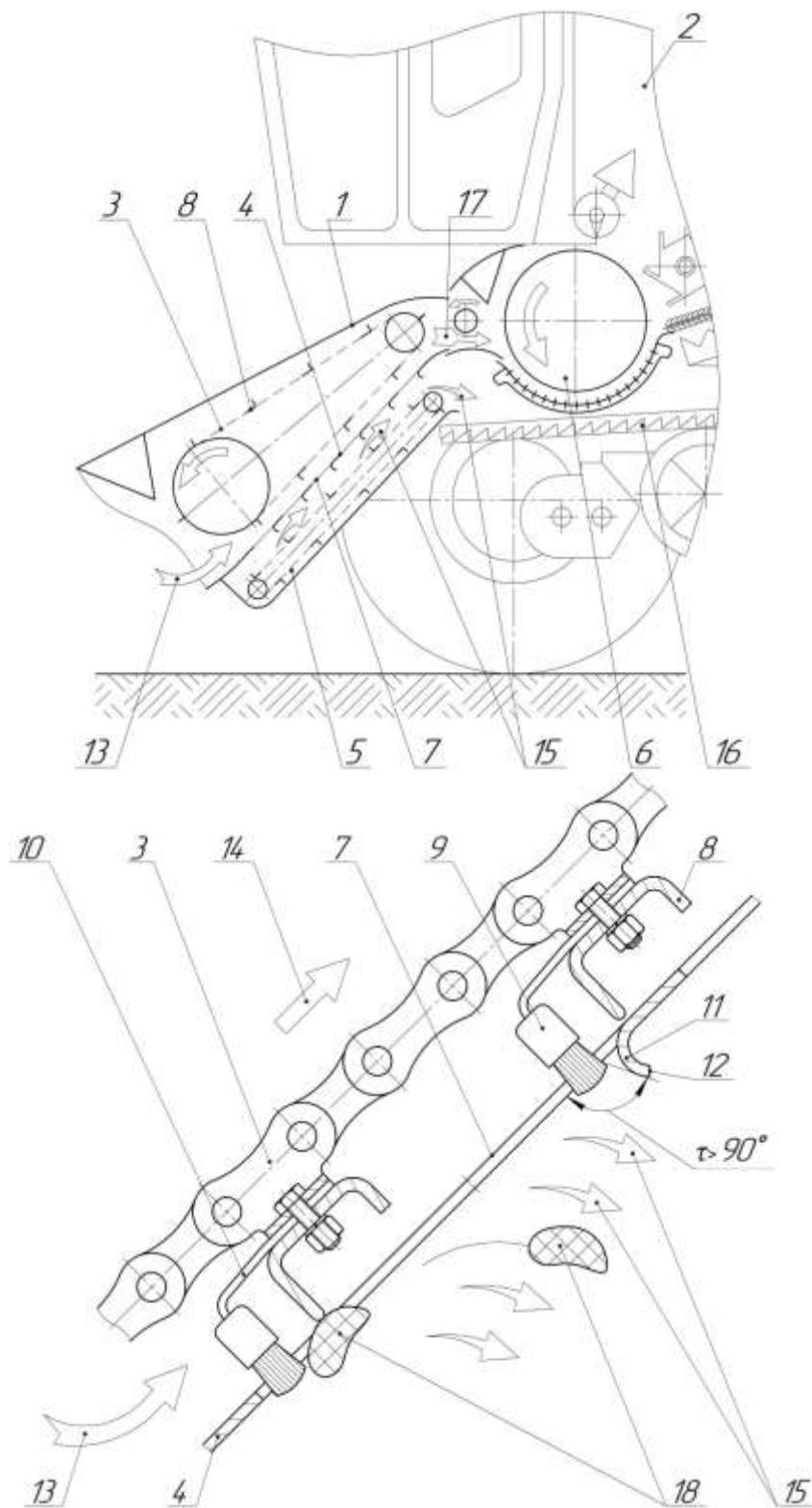


Рисунок 5.10 – Наклонная камера зерноуборочного комбайна, оснащенная перфорированным днищем и приспособлением для его очистки (Патент РФ № 2725729): 1 – наклонная камера; 2 – комбайн; 3 – плавающий транспортер; 4 – решетчатое днище; 5 – устройство для отвода свободного зерна; 6 – молотильная камера; 7 – устройство для очистки отверстий; 8 – скребок; 9 – щетка; 10 – поводок; 11 – язычок; 12 – нижняя кромка; 13 – очесанный ворох; 14 – направление движения; 15 – мелкие примеси; 16 – транспортная доска; 17 – недомолоченные колоски; 18 – крупные включения

Поскольку в свободном состоянии ворс щеток 9 опущен ниже поверхности решетчатого днища 4, то при выходе из отверстия 7 исключается его контакт с острыми металлическими кромками, поскольку нижняя кромка 12 язычка 11 отогнута на угол  $\tau$ , превышающий  $90^\circ$ . То есть, в этом случае криволинейная поверхность язычка 11 выполняет функцию лифтера, поднимающего ворс, что существенно уменьшает интенсивность его износа.

Использование предлагаемой наклонной камеры позволяет повысить эффективность процесса сепарации свободного зерна, исключить возможность его дробления рабочими органами молотилки и увеличить долговечность щеток.

Однако, несмотря на принципиальную возможность осуществления этого технологического процесса, следует учитывать и негативные последствия, возникающие в связи с неизбежным утяжелением конструкции наклонной камеры.

В связи с этим, произведены расчеты продольной устойчивости зерноуборочного комбайна, в агрегате с очесывающей жаткой и модернизированной наклонной камеры. По их результатам установлено, что угол продольной статической устойчивости для комбайна в агрегате с очесывающей жаткой и серийной наклонной камерой составляет  $\alpha_{уст}=32^\circ$ , тогда как аналогичный параметр для комбайна в агрегате с очесывающей жаткой и модернизированной наклонной камерой равен  $\alpha_{уст}=31^\circ$  [183].

Поскольку разница между параметрами сравниваемых вариантов исполнения комбайна составляет порядка 3%, то правомерен вывод о том, что реализация технического решения, обеспечивающего предварительную сепарацию свободного зерна в наклонной камере, не оказывает существенного влияния на его устойчивость при очесе растений на корню, поэтому целесообразно сосредоточиться на оценке работоспособности конструкции в полевых условиях.

### 5.3 УСТРОЙСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ СЕПАРАЦИЮ ЛЕГКИХ ПРИМЕСЕЙ ИЗ ОЧЕСАННОГО ЗЕРНОВОГО ВОРОХА

При изучении физико-механических свойств очесанного зернового вороха установлено, что большую долю в нем составляют легкие примеси. Следовательно, для того чтобы улучшить пропускную способность перфорированного днища наклонной камеры необходимо выполнить их предварительную сепарацию. Испытывая очесыватели зерна на корню различной конструкции, мы пришли к выводу, что целесообразно было бы использовать в технологическом процессе энергию воздушного потока, которая в существующей конструкции гасится на сетчатых кожухах. При этом удаляются только легкие примеси, не превышающие по размерам зерна основной культуры.

Радикальным решением была бы технологическая схема, в которой легкие примеси сепарировались бы не по размерам (на сетчатой поверхности), а по парусности в сепараторах инерционного типа. В качестве вариантов конструктивного решения проблемы рассматривалось следующее техническое решение (рис. 5.5) [199]. Воздушный поток транспортирует ворох до циклона, в котором и должно происходить его разделение на легкие примеси и свободное зерно вместе с недомолоченными колосьями. Тяжелая фракция из циклона поступает на сепарацию по размеру. После чего колосья домолачиваются. Учитывая то, что практически реализовать указанную конструктивную схему мы не можем ввиду отсутствия финансирования, изыскиваем менее радикальные технические решения, способные решить хотя бы часть проблем без полной перекомпоновки комбайна. В частности, предложена схема инерционной сепарации легких примесей непосредственно в корпусе очесывателя (рис. 5.11, *a*). Для этого заднюю стенку 9 адаптера необходимо снабдить жалюзийной решеткой, образованную набором продольных пластин 10, оснащенных механизмом поворота вокруг горизонтальной оси 11.

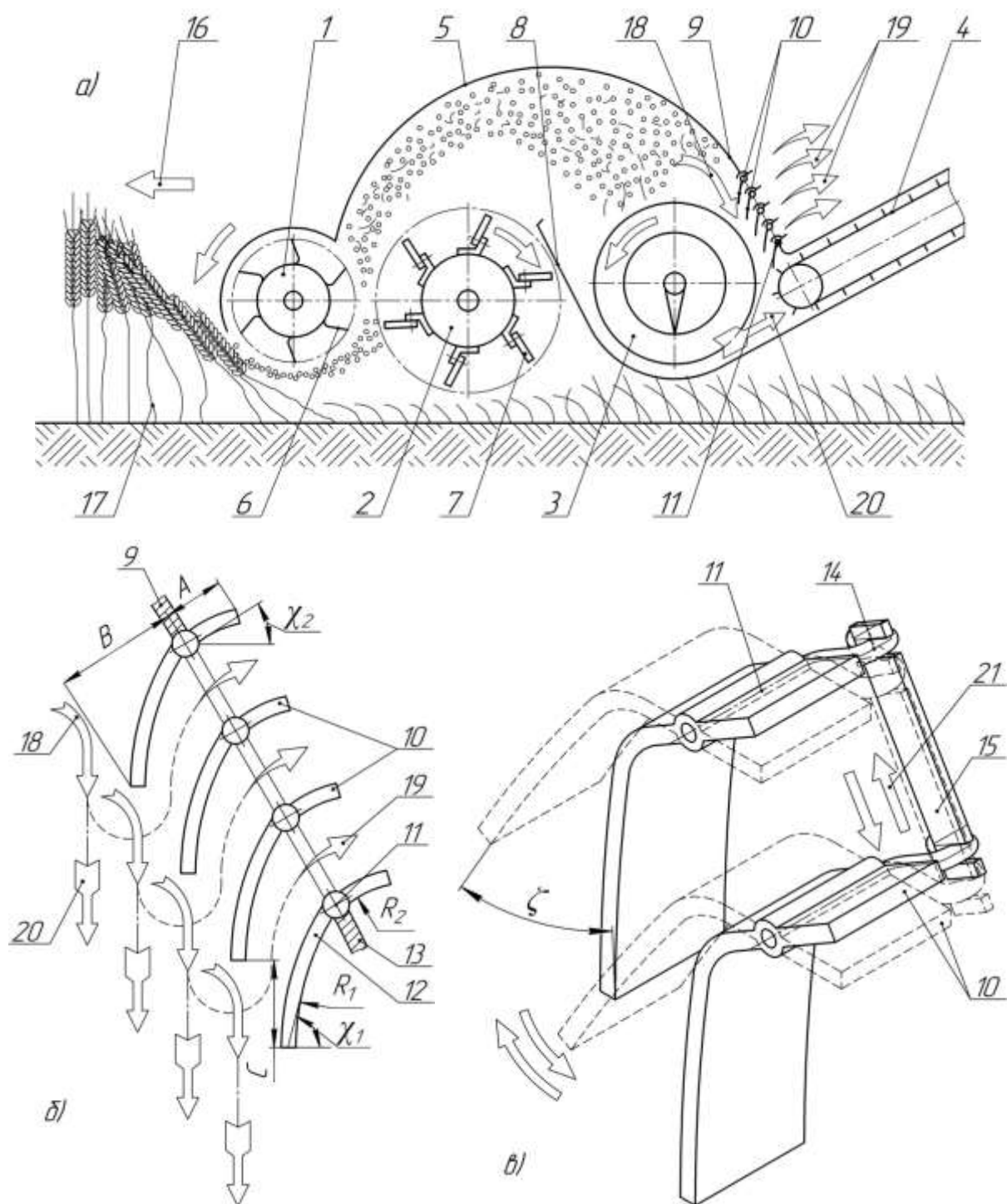


Рисунок 5.11 – Принципиальная схема очесывающего адаптера, оснащенного жалюзийной решеткой (Патент РФ № 2566017): а) общий вид; б) детализация фаз сепарации очесанного вороха на жалюзийной решетке; в) регулировка угла наклона продольных пластин жалюзийной решетки; 1, 2 – очесывающие рабочие органы; 3, 4 – транспортирующие рабочие органы; 5 – корпус; 6, 7 – зубья (гребенки); 8 – отсекающий щиток; 9 – задняя стенка адаптера; 10 – продольная пластина; 11 – горизонтальная ось; 12 – нижний ряд набора пластин; 13 – глухая стенка; 14 – эксцентрик; 15 – поводок; 16 – направление движения адаптера; 17 – растения; 18 – ворох; 19 – легкие примеси; 20 – тяжелые компоненты вороха; 21 – направление движения поводка

Нижний ряд 12 набора пластин 10 жалюзийной решетки смонтирован напротив глухой стенки 13 корпуса 5 адаптера и выполняет функцию регулируемого дефлектора. Механизм поворота пластин 10 включает в себя эксцентрик 14 и поводок 15. Пластины 10 жалюзийной решетки смонтированы с перекрытием (величина  $C$ ) и внедрением большей части поперечного сечения каждой из них внутрь корпуса 5 очесывающего адаптера ( $B > A$ ). При этом расположенная внутри корпуса 5 кромка каждой из пластин 10 сориентирована вниз, а поперечное сечение выполнено криволинейным и сориентировано вогнутостью в сторону задней стенки 9 корпуса 5. Причем радиус кривизны поперечного сечения пластины 10 и угол его наклона к горизонту уменьшаются снизу вверх ( $R_1 > R_2$  и  $\chi_1 > \chi_2$ ) (рис. 5.11, б).

Устройство для обмолота растений на корню работает следующим образом. При движении адаптера в направлении стрелки 16 зубья 6 и 7 барабанов 1 и 2 очесывают растения 17 снизу вверх. Полученный таким образом ворох 18 под действие инерционных сил и воздушного потока поступает в сторону задней стенки 9 адаптера. При прохождении вороха 18 вдоль отверстий жалюзийной решетки, воздушный поток, резко меняет направление движения, захватывая значительную часть легких примесей 19 (полову, сболину) и вынося их наружу из корпуса 5 адаптера. Более тяжелые компоненты 20 вороха (зерно, недомолоченные колоски) под действием силы тяжести, опускаются в нижнюю часть корпуса 5 и выводятся шнеком 3 к наклонному транспортеру 4, который подает их в молотилку комбайна. Вследствие того, что радиус кривизны поперечного сечения пластины 10 и угол его наклона к горизонту уменьшаются снизу вверх ( $R_1 > R_2$  и  $\chi_1 > \chi_2$ ), то траектория движения легких примесей на выходе из щелей жалюзийной решетки близка к горизонтальной, что существенно уменьшает запыление лобового стекла кабины зерноуборочного комбайна. При этом нижний ряд 12 набора пластин 10 жалюзийной решетки смонтирован напротив глухой стенки 13 корпуса 5 адаптера и выполняет функцию регулируемого дефлектора, обеспечивающего стабильность скорости воздушного потока в нижней щели жалюзийной ре-

шетки. Изменение угла наклона  $\zeta$  продольных пластин 10 (показано пунктиром) осуществляется за счет перемещения поводка 15 в направлении стрелки 21 и позволяет достичь минимальных потерь свободного зерна при максимальном удалении из адаптера легких примесей 19 (рис. 5.11, в).

Использование предлагаемого устройства позволяет снизить содержание легких примесей в очесанном ворохе, надежно исключив возможность забивания отверстий жалюзийной решетки задней стенки адаптера, а также повысить производительность процесса уборки растений на корню.

Между тем, чрезмерное количество легких примесей уменьшает не только пропускную способность решетчатого днища наклонной камеры, но и увеличивает нагрузку на систему очистки, что может стать «узким местом» лимитирующим производительность комбайна. Повысить пропускную способность системы очистки зерноуборочного комбайна при гарантированном отсутствии потерь урожая можно за счет сепарирующего устройства 4, размещенного над транспортной доской 3 (рис. 5.12) [205]. Сепарирующее устройство 4 выполнено в виде поперечного воздуховода 5, всасывающая щель 6 которого сориентирована вниз. При этом воздуховод 5 помещен внутрь сетчатого вращающегося барабана 7 и расположен над пальцевой решеткой 8 в конце транспортной доски 3. Причем размер отверстий 9 сетчатого барабана 7 превышает размер легкой фракций вороха.

Предлагаемый зерноуборочный комбайн работает следующим образом. При перемещении комбайна по полю в направлении стрелки 10, наклонная камера 1 подает хлебную массу 11 от адаптера (на схеме не показан) к молотильному устройству 2, где и происходит ее обмолот. Полученный в результате обмолота зерновой ворох (свободное зерно, солома, легкие мелкие примеси, обмолоченные и необмолоченные колоски, прошедшие сквозь деку молотильного устройства) поступает на транспортную доску 3, колебательные движения которой обеспечивают расслоение его по слоям. Свободное зерно 12 перемещается в нижние слои, а солома и легкие мелкие примеси 13 – в верхние. При поступлении зернового вороха на пальцевую решетку 8, воз-

душные потоки 14 вентилятора 15 интенсивно продувают его по всей толщине.

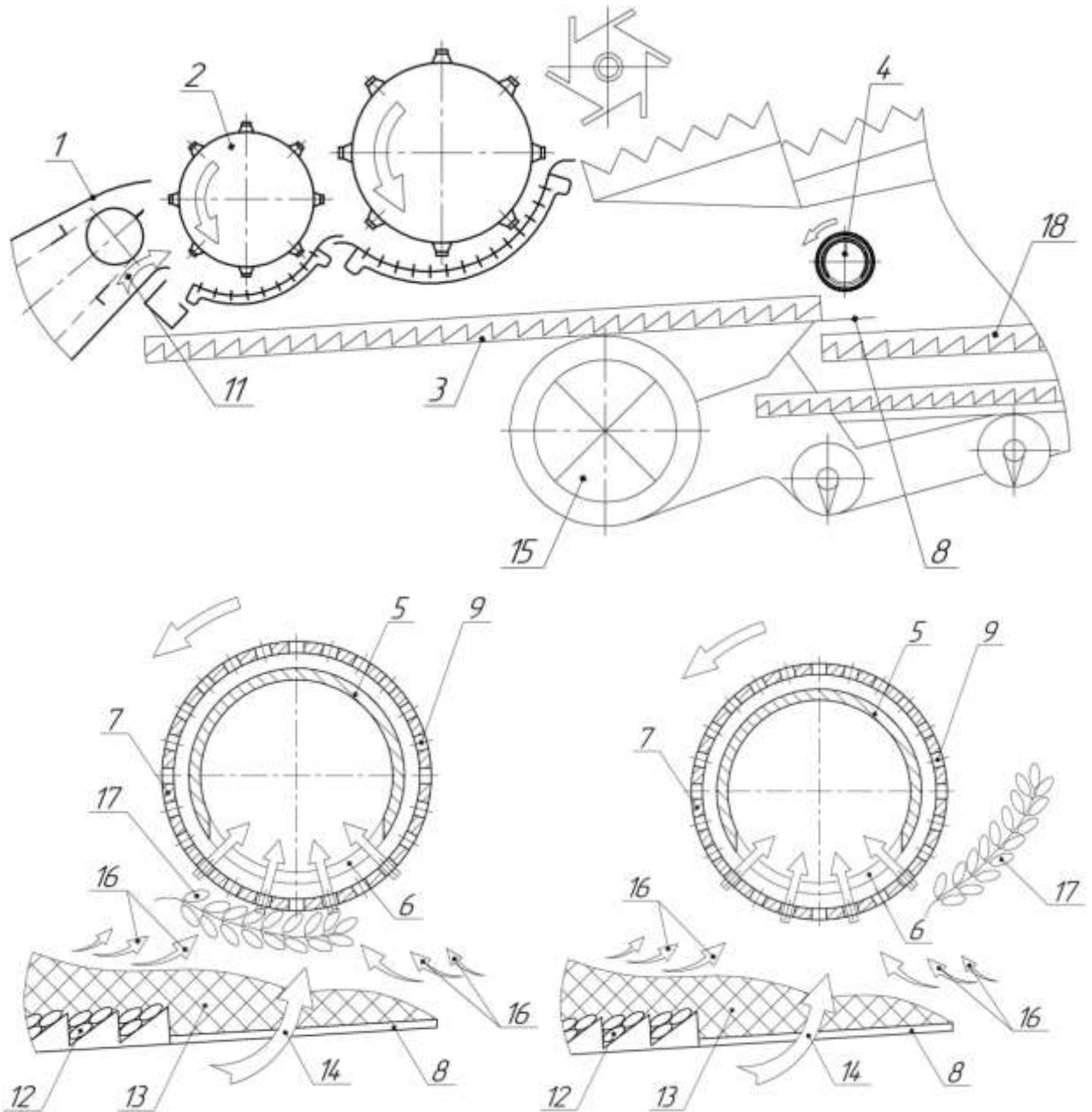


Рисунок 5.12 – Зерноуборочный комбайн, оснащенный сепаратором для удаления легких примесей (Патент РФ № 2672399): 1 – наклонная камера; 2 – молотильное устройство; 3 – транспортная доска; 4 – сепарирующее устройство; 5 – поперечный воздуховод; 6 – всасывающая щель; 7 – сетчатый барабан; 8 – пальцевая решетка; 9 – отверстия; 10 – направление движения; 11 – хлебная масса; 12 – свободные зерна; 13 – легкие примеси; 14, 16 – воздушный поток; 15 – вентилятор; 17 – необмолоченный колос; 18 – система очистки

Полова и легкие мелкие примеси 13 захватываясь воздушным потоком 14, 16 от вентилятора 15 и дополнительного сепарирующего устройства 4,



проходят сквозь отверстия 9 решетчатого барабана 7 и выводятся вместе с ним за пределы зерноуборочного комбайна. Более тяжелое свободное зерно 12 и необмолоченные колоски 17 остаются внутри его корпуса и подаются на решета системы очистки 18. Вследствие того, что всасывающая щель 6 поперечного воздуховода 5 сориентирована вниз, то оседание необмолоченных колосков 17 на рабочей поверхности сетчатого барабана 7 возможно только лишь в его нижней части. Дальнейший поворот сетчатого барабана 7 на острый угол приводит к выводу необмолоченных колосков 18 из зоны действия воздушного потока 16 поперечного воздуховода 5 и отбросу их в сторону решет системы очистки 18.

Такое техническое решение обеспечивает повышение эффективности процесса сепарации половы и легких мелких примесей, что увеличивает пропускную способность системы очистки зерноуборочного комбайна при гарантированном отсутствии потерь урожая.

#### **5.4 ИЗЫСКАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ МОЛОТИЛЬНО-СЕПАРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

При разработке структурно-технологической схемы установлено, что у большинства колосовых зерновых культур чешуи, охватывающие каждую зерновку, дополнительно укрепляют ее положение и препятствуют эффективной реализации ударного воздействия на нее в процессе обмолота бичей молотильного барабана. Следовательно, вне зависимости от способа отделения плодосодержащей части растения от земли (срезание традиционной жаткой или очес на корню) целесообразно предварительно разрушить или, во всяком случае, ослабить чешуйчатое окружение каждой зерновки. Это реализуется в зерноуборочном комбайне 1, включающем наклонную камеру 2 с транспортером 3, снабженным скребками 4 и молотильно-сепарирующее устройство 5, между которыми смонтировано приемное устройство 6 (рис. 5.13) [201].

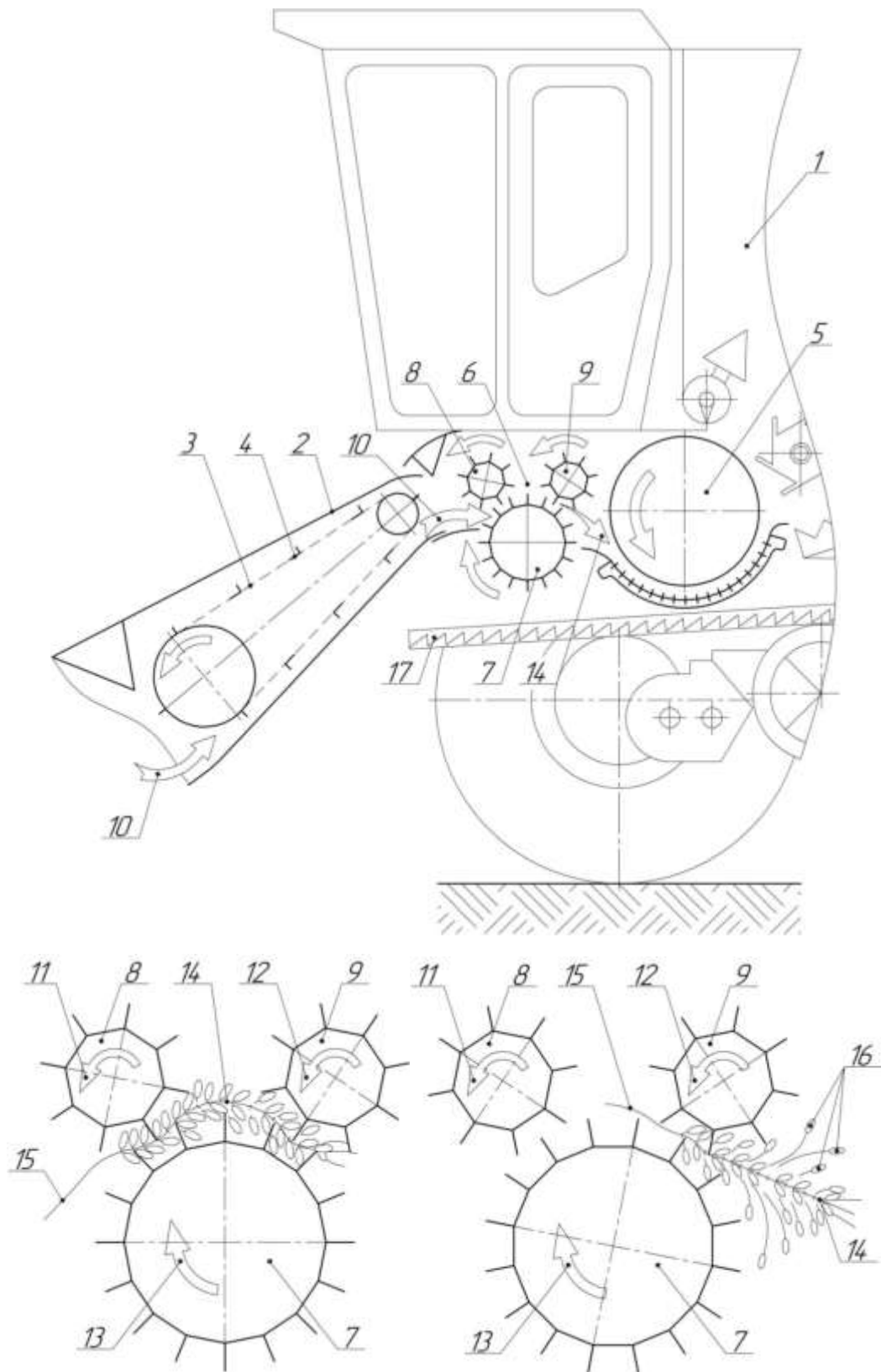


Рисунок 5.13 – Зерноуборочный комбайн, содержащий приемное устройство (Патент РФ № 2631344): 1 – комбайн; 2 – наклонная камера; 3 – транспортер; 4 – скребки; 5 – молотильно-сепарирующее устройство; 6 – приемное устройство; 7 – нижний ребристый барабан; 8, 9 – вальцы; 10 – хлебная масса; 11-13 – направление вращения; 14 – колос; 15 – соломина; 16 – отдельные зерновки; 17 – транспортная доска

Последнее состоит из нижнего ребристого барабана 7 и расположенных над ним последовательно двух ребристых вальцов 8 и 9 меньшего диаметра. При этом ребристый валец 8 выполняет функцию подающего элемента, а валец 9 – направляющего элемента. Причем оси их вращения размещены с разных сторон от вертикальной поперечной плоскости, проходящей через ось вращения нижнего ребристого барабана 7.

Предлагаемый зерноуборочный комбайн работает следующим образом. При перемещении комбайна 1 по полю жатка (на схеме не показана) срезает растения и подает их в сторону наклонной камеры 2. Скребки 4 транспортера 3 увлекают за собой хлебную массу 10 и направляют ее в сторону приемного устройства 6. Синхронно вращающиеся ребристые вальцы меньшего диаметра 8 и 9 и нижний ребристый барабан 7 по направлению стрелок 11-13 захватывают колос 14 с соломиной 15 и интенсивно подвергают его знакопеременной поперечной деформации. В результате такого взаимодействия рабочих органов приемного устройства 6 с колосом 14 происходит гарантированное разрушение связей его зерновок с чешуйчатой структурой без чрезмерного измельчения соломины 15. Отдельные зерновки 16 в процессе взаимодействия с ребрами вальцов 8 и 9 и барабана 7 отрываются от стержня колоса 14, после чего поступают на транспортную доску 17 и далее на очистку. Размочаленный в результате контакта с барабаном 7 и вальцами 8 и 9 колос 14 с разрушенной чешуйчатой структурой и ослабленной связью оставшихся зерновок с его стержнем поступает в молотильно-сепарирующее устройство 5, где в результате ударов бичей барабана происходит окончательный вымолот зерновок.

Предварительная подготовка колоса существенно облегчает домолот, уменьшает энергоемкость процесса и увеличивает производительность комбайна.

## 5.5 АЛГОРИТМ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Как было отмечено ранее, вся хлебная масса, полученная при очесе растений на корню, поступает непосредственно в молотильное устройство зерноуборочного комбайна (рис. 5.14). Это затрудняет процесс дальнейшего обмолота оставшейся колосовой части урожая, увеличивает его энергоемкость, а также снижает пропускную способность устройства. Кроме того, наблюдается повышенное дробление (до 8%) свободного зерна рабочими органами молотилки, что приводит к снижению его всхожести и стойкости при хранении [219, 258].

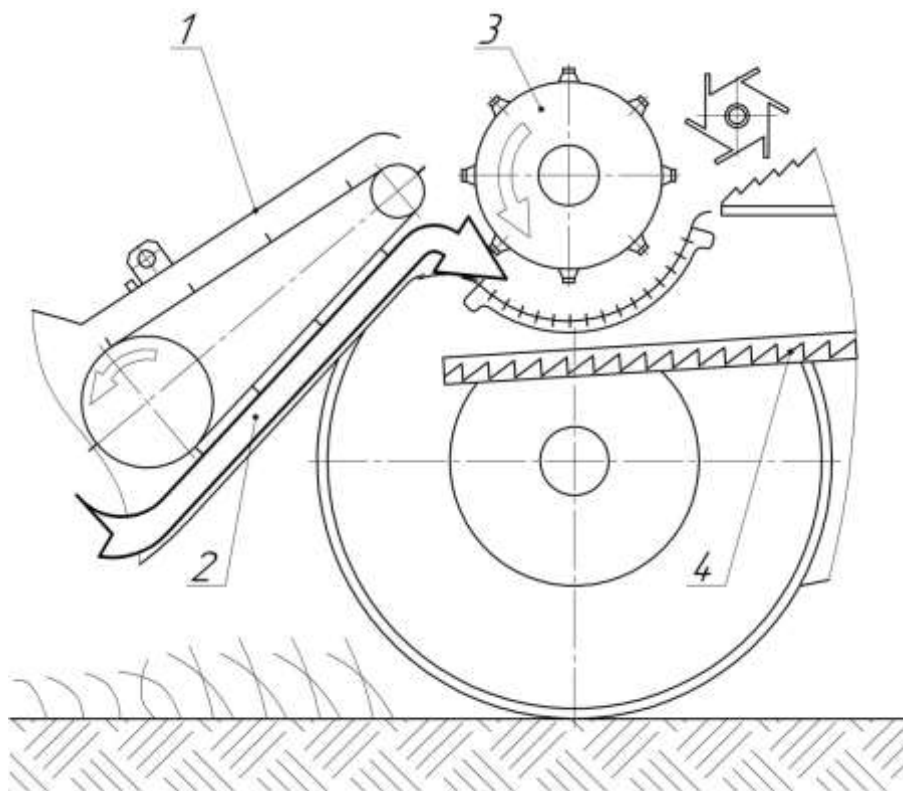


Рисунок 5.14 – Классическая технологическая схема зерноуборочного комбайна при очесе растений на корню: 1 – наклонная камера; 2 – очесанный зерновой ворох; 3 – молотильное устройство; 4 – транспортная доска

Минимизировать негативное воздействие бичей молотильного устройства на свободное зерно позволяет его предварительная сепарация. Если при-

держиваться классической технологической схемы комбайна, то одним из наиболее приемлемых мест для ее осуществления является наклонная камера, днище которой должно быть выполнено решетчатым, а под ним смонтировано дополнительное устройство (скребковый транспортер) для подачи хлебной массы на транспортную доску минуя молотильную камеру (рис. 5.15). При этом, как свидетельствуют результаты лабораторных исследований, при оптимальном сочетании размеров отверстий, длины наклонной камеры (1,3 м) достаточно для практически полного выделения свободного зерна из очесанного зернового вороха. Оставшаяся колосовая часть урожая вместе с солоmistыми включениями поступает в молотильную камеру для дальнейшего обмолота.

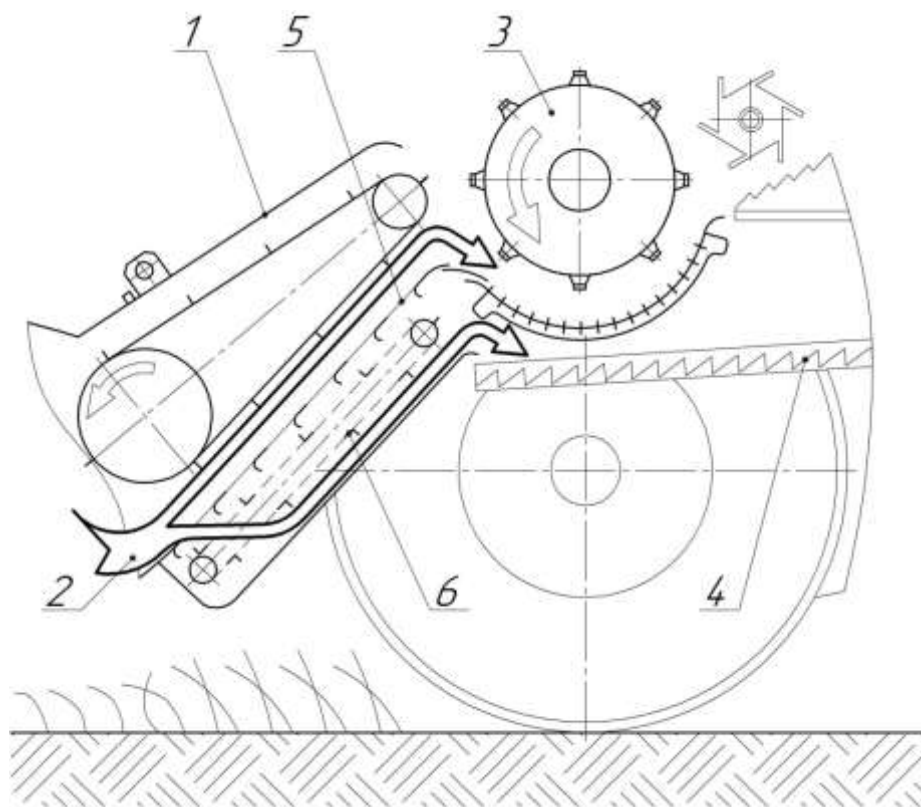


Рисунок 5.15 – Технологическая схема зерноуборочного комбайна, обеспечивающая предварительное выделение свободного зерна в наклонной камере: 1 – наклонная камера; 2 – очесанный зерновой ворох; 3 – молотильное устройство; 4 – транспортная доска; 5 – решетчатое днище; 6 – скребковый транспортер

В качестве альтернативного варианта предварительного выделения свободного зерна из очесанного зернового вороха может быть использовано сепарирующее устройство предбарabanного типа, выполненное в виде сетчатого транспортера и смонтированное перед молотильным устройством (рис. 5.16). Проведенные эксперименты показали его работоспособность. Однако, в связи с тем, что свободное зерно должно пройти через две рабочие ветви сепарирующего устройства, то для этого необходима сравнительно большая длина транспортера (2,69 м) по сравнению с наклонной камерой зерноуборочного комбайна. Кроме того, практическая реализация такой идеи требует смещения барабана комбайна назад и укорачивания соломотряса (за не надобностью) без нарушения технологического процесса.

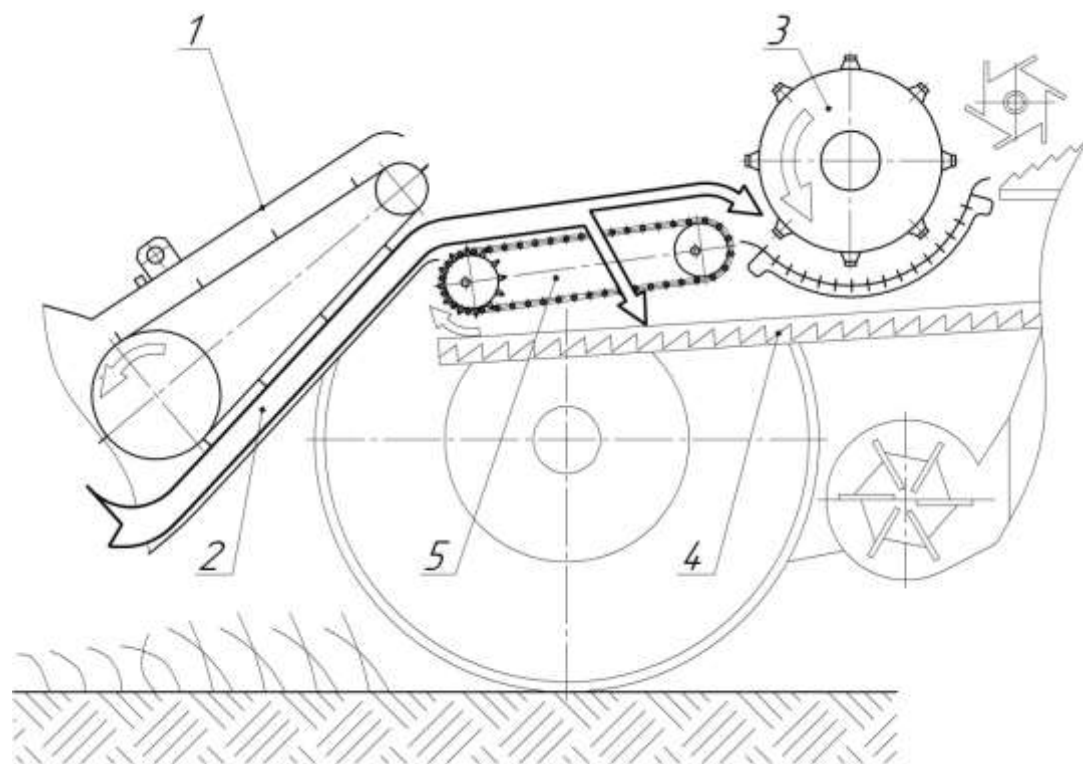


Рисунок 5.16 – Технологическая схема зерноуборочного комбайна, обеспечивающая предварительное выделение свободного зерна на сетчатом транспортере: 1 – наклонная камера; 2 – очесанный зерновой ворох; 3 – молотильное устройство; 4 – транспортная доска; 5 – сетчатый транспортер

Наиболее перспективным направлением развития технологической схемы зерноуборочного комбайна при очесе растений на корню является снабже-

ние его сепарирующим устройством предбарabanного типа, содержащим скребковый транспортер и горизонтальное прутковое решето, лишённое поперечных планок (рис. 5.17). Такое техническое решение позволяет повысить сепарирующую способность устройства, а также снизить металлоёмкость 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.

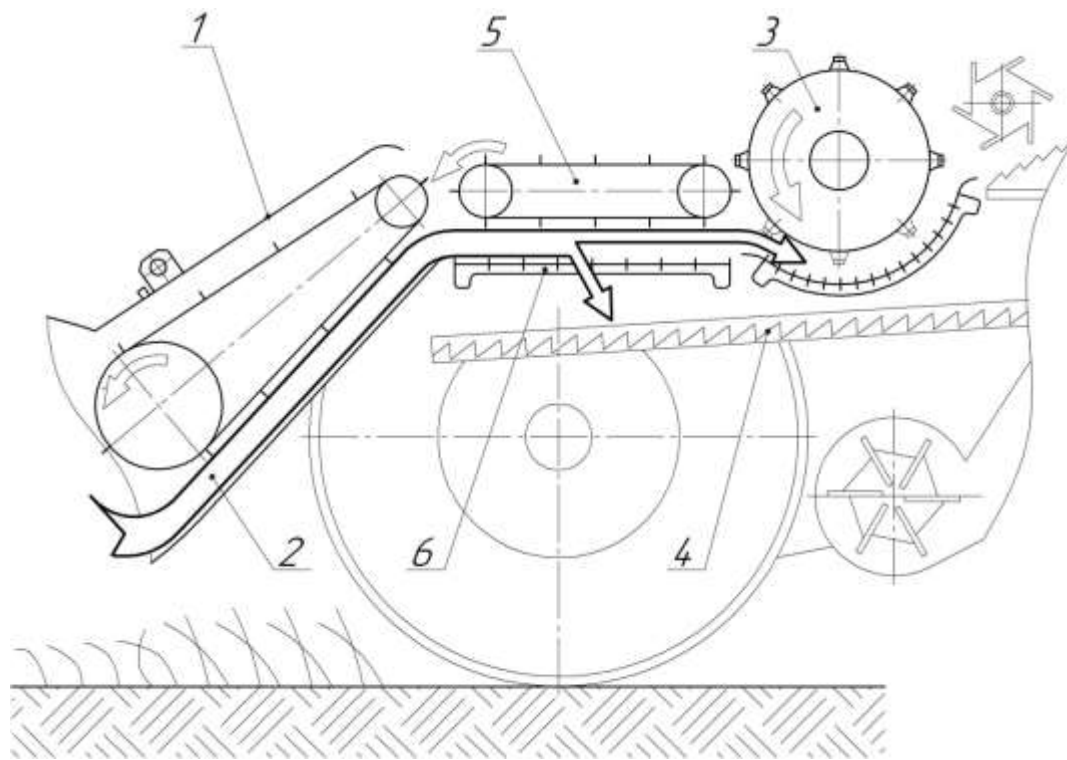


Рисунок 5.17 – Технологическая схема зерноуборочного комбайна, обеспечивающая предварительное выделение свободного зерна на горизонтальном прутковом решете: 1 – наклонная камера; 2 – очесанный зерновой ворох; 3 – молотильное устройство; 4 – транспортная доска; 5 – скребковый транспортер; 6 – прутковое решето

## ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ

1. Разработан алгоритм пошаговой адаптации конструкции зерноуборочного комбайна к физико-механическим свойствам зерновых культур и очесанного зернового вороха предполагающий различную степень радикальности изменение схемы и сути технологического процесса.

2. Перспективными направлениями модернизации технологической схемы зерноуборочного комбайна являются:

- выделение свободного зерна из очесанного вороха до его поступления в молотильное устройство, в том числе на сепарирующих рабочих органах, размещенных перед молотильным барабаном, смещенным назад на значительное расстояние (Патенты РФ № 267734, № 2685735);

- увеличение эффективности воздействия молотильного барабана на колосья, лишенные соломин (Патент РФ № 2653011);

- более полное выделение из очесанного вороха значительной части половы и мелких легких примесей непосредственно в корпусе очесывателя, снабженного для этой цели очисткой инерционного типа (Патент РФ № 2566017);

- активация процесса сепарации свободного зерна, половы и мелких примесей (Патенты РФ № 2655749, 2672399, 2658389);

- снижение энергоемкости выделения зерна из колоса за счет применения поперечного колебательного характера нагружения его связей со стержнем (Патенты РФ № 2278498, № 2534265, № 2482656, № 2631344);

- гашение (или технологическое использование) избыточного воздушного потока, создаваемого очесывающим барабаном (Патент РФ № 2566017).

3. Угол продольной статической устойчивости зерноуборочного комбайна в агрегате с модернизированной наклонной камерой и очесывающим адаптером составляет 31°. Поскольку снабжение зерноуборочного комбайна модернизированной наклонной камерой уменьшает угол продольной устойчивости всего на 3%, то такое снижение устойчивости не существенно.



4. Реализация всего комплекса перспективных изменений в технологический процесс зерноуборочного комбайна требует его радикальной переконфигурации. При сохранении сложившегося компоновочного решения возможна частичная модернизация машины, включающая мероприятия по совершенствованию наклонной камеры, системы выпуска избыточного воздуха из корпуса очесывателя и оптимизации конструкции барабана и подбарабана.

## 6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В ПРОИЗВОДСТВО

По результатам проведенных лабораторных исследований установлено, что снабжение наклонной камеры зерноуборочного комбайна решетчатым днищем позволяет гарантированно исключить поступление свободного зерна в молотильное устройство. В результате этого повышается производительность агрегата, снижаются сроки уборки урожая и мощность на привод молотильного барабана. Других преимуществ по сравнению с серийной наклонной камерой зерноуборочного комбайна не выявлено. Таким образом, при расчете экономической эффективности в базовом и в проектном вариантах, одинаковыми могут быть приняты: ширина захвата, коэффициент использования сменного времени и количество обслуживающего персонала [96, 98].

Экономический эффект от изъятия из поступающего на обмолот очесанного вороха свободного зерна включает два компонента. Во-первых, на величину  $\Delta N$  уменьшается мощность, потребляемая барабаном. А во-вторых, увеличивается фактическая пропускная способность молотилки  $q_{\phi}$ . Выполним ориентировочный расчет величины указанных компонентов. При этом будем считать, что пропускная способность молотилки комбайна  $q = 10 \text{ кг/с}$ . С учетом изменения состава вороха вследствие очеса полагаем, что это соответствует производительности комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10». Полагаем, что в очесанном ворохе содержится 80% свободного зерна, которое направляется непосредственно на транспортную доску и далее на решета.

Кроме того, следует учитывать возникновение дополнительного положительного эффекта, заключающегося в получении дополнительной выручки от уменьшения в конечной продукции доли дробленого зерна, которая по данным ряда исследователей превышает агротехнические требования и составляет порядка 8% [124, 219, 258]. Однако, поскольку точных опытных данных о величине снижения степени дробления зерна в результате оборудования наклонной камеры решетчатым днищем у нас нет, то экономическую

оценку внедрения разработки в производство будем выполнять только из расчета экономии эксплуатационных затрат.

## 6.1 РАСЧЕТ ЭКОНОМИИ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД МОЛОТИЛЬНОГО БАРАБАНА

Принято считать, что мощность, потребляемая барабаном, расходуется на преодоление вредных сопротивлений (23%), деформацию (перетираание) массы в зазоре между барабаном и декой (70%) и на удар и сообщение вороху дополнительной скорости (7%) [227, 105].

### 1. Мощность, расходуемая на удар и разгон хлебной массы

При перенаправлении свободного зерна непосредственно в систему очистки (минуя барабан), во-первых, исключается последняя составляющая энергозатрат, отнесенная к массе свободного зерна. Это обусловлено тем, что выводимая из процесса масса зерна не подвергается ударам и не приобретает дополнительной кинетической энергии.

По мнению М.А. Пустыгина [227], затраты мощности на удар и разгон хлебной массы можно определить по формуле

$$N_3 = \xi \cdot m_{св} \cdot v_б^2, \quad (6.1)$$

где  $m_{св}=8$  кг/с – ежесекундная масса свободного зерна, изымаемая из очесанного зернового вороха;

$v_б = 30$  м/с – линейная скорость бича;

$\xi = 0,3$  – коэффициент.

Подставив значения параметров в формулу (6.1), имеем  $N_3 = 2,16$  кВт.

### 2. Уменьшение мощности, расходуемой на деформацию материала

Исходим из того, что мощность, расходуемая на различные виды деформации материала, в 10 раз превышает мощность, расходуемую на удар и

разгон массы [227]. То есть, получив расчетным путем мощность, расходуемую на удар и разгон массы ( $N_{3\Sigma}$ ), умножая ее на 10 можно получить искомый результат ( $N_{2\Sigma}$ ).

Для этого сначала найдем оба параметра для базового варианта расчета, когда свободное зерно поступает в барабан

$$N_{3\Sigma} = 0,3 \cdot 10 \cdot 30^2 = 2700 \text{ Вт} = 2,7 \text{ кВт}. \quad (6.2)$$

Тогда

$$N_{2\Sigma} = 10 \cdot N_{3\Sigma} = 10 \cdot 2,7 = 27 \text{ кВт}, \quad (6.3)$$

где  $N_{2\Sigma}$  – мощность, расходуемая на различные виды деформации материала в зазоре между барабаном и декой в базовом варианте, то есть, при поступлении в молотильный зазор всего объема свободного зерна, *кВт*.

Оценивая энергозатраты, необходимые на деформацию вороха, лишённого зерна, следует иметь в виду, что они обусловлены не массой компонентов, а их объемом, который и подвергается разного рода деформациям. В работе М.А. Пустыгина этому посвящен целый раздел [227]. Следовательно, чтобы адекватно оценить уменьшение мощности, потребляемой процессом деформации, необходимо сравнивать не массы (исходную и оставшуюся после изъятия зерна – 10 и 2 кг/с, соответственно), а исходный объем вороха и объем его части, оставшейся после изъятия свободного зерна. То есть, имеет место пропорция

$$\frac{V_{\Sigma}}{V_2} = \frac{N_{2\Sigma}}{N_2}, \quad (6.4)$$

где  $V_{\Sigma} = V_2 + V_{зер}$  – объем исходного вороха,  $\text{м}^3$ ;

$N_2$  – мощность, расходуемая на деформацию вороха, лишённого свободного зерна, *кВт*;

$V_2$  – объем двух килограммов вороха, лишённого свободного зерна,  $\text{м}^3$ ;

$V_{зер}$  – объем 8 кг зерна,  $\text{м}^3$ .

Что касается объема зерна, то его можно найти, ориентируясь на насыпную массу пшеницы  $\rho_{зер} = 730 \dots 850 \text{ кг/м}^3$ . Тогда  $V_{зер} = 8/800 = 0,01 \text{ м}^3$ .

Удельная масса соломы варьируется в пределах от 40 до 100 кг/м<sup>2</sup>. М.А. Пустыгин в своих расчетах принимал нижний предел, для соломы длиной 0,8 м. Установлено, что по мере измельчения массы ее удельная масса возрастает. Так, солома в 2,5 раза плотнее соломы. Поскольку в очесанном ворохе в основном присутствует соломины длиной 0,15 ... 0,20 м, будем считать, что удельная плотность вороха, лишённого зерна, находится посередине между соломой большой длины и половой. То есть,  $\rho_v = 70 \text{ кг/м}^3$ . Тогда  $V_2 = 2/70 = 0,0285 \text{ м}^3$ .

Соответственно,  $V_\Sigma = 0,0385 \text{ м}^3$ .

Подставив полученные результаты в формулу (6.4) и преобразовав ее, имеем

$$N_2 = \frac{N_{2\Sigma} \cdot V_2}{V_\Sigma} = \frac{27 \cdot 0,0285}{0,0385} \approx 20 \text{ кВт}. \quad (6.5)$$

Следовательно, изъятие из очесанного вороха свободного зерна позволяет сэкономить мощность, потребляемую на деформацию хлебной массы, в количестве

$$\Delta N_2 = N_{2\Sigma} - N_2 = 27 - 20 = 7 \text{ кВт}. \quad (6.6)$$

Суммируя эту мощность с ранее полученной экономией на удар и разгон хлебной массы ( $N_3 = 2,16 \text{ кВт}$ ), имеем

$$\Delta N_\Sigma = \Delta N_2 + N_3 = 7 + 2,16 = 9,16 \text{ кВт}. \quad (6.7)$$

С учетом общего КПД механизма привода, который равен 0,9 [72, 223], можно констатировать, что экономия мощности на привод барабана, вследствие изъятия из очесанного вороха свободного зерна, будет не меньше 10,2 кВт, что составляет порядка 11,97% от исходной величины, приходящейся на обмолот, или 4,79% от мощности двигателя комбайна КЗС-10К «Полесье GS-10».

Однако, вследствие того, что модернизированная наклонная камера содержит дополнительное оборудование, обеспечивающее подачу свободного зерна на транспортную доску, то полученное значение следует уменьшить на величину мощности, необходимую на его привод.

## 6.2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Определим мощность на привод дополнительного устройства, смонтированного под днищем наклонной камеры, которое обеспечивает подачу свободного зерна, минуя молотильную камеру. Для этого воспользуемся методикой расчета скребкового конвейера [223]

$$N_{дон} = \frac{F_t \cdot v_k}{\eta_{зв} \cdot \eta_{пр}}, \quad (6.8)$$

где  $F_t$  – тяговое усилие на ведущей звездочке,  $H$ ;

$v_k$  – скорость скребкового конвейера,  $м/с$ ;

$\eta_{зв}=0,98$  – КПД ведущей звездочки скребкового конвейера;

$\eta_{пр}=0,9$  – КПД передаточного механизма привода.

Тяговое усилие (окружная сила) на ведущей звездочке

$$F_t = \xi^m \cdot \Sigma W, \quad (6.9)$$

где  $\xi=1,1$  – коэффициент сопротивления на натяжной и отклоняющей звездочках, учитывающий потери в шарнирах цепи при их огибании и потери в подшипниках;

$m$  – число звездочек, кроме ведущей;

$\Sigma W$  – суммарные сопротивления движения скребкового конвейера:

$$\Sigma W = W_p + W_x, \quad (6.10)$$

где  $W_p$  – сопротивление передвижению груза и тягового органа на рабочей ветви скребкового конвейера,  $H$ ;

$W_x$  – сопротивление передвижению тягового органа на холостой ветви скребкового конвейера,  $H$ .

Силы сопротивления передвижения на рабочей и холостой ветвях конвейера можно рассчитать по следующим формулам:

- для рабочей ветви

$$W_p = g \cdot L_k \cdot (q_z + q_y) \cdot (\xi_p \cdot \cos \alpha_{нак} + \sin \alpha_{нак}), \quad (6.11)$$

- для холостой ветви

$$W_x = g \cdot L_k \cdot q_{\text{ц}} \cdot (\xi_x \cdot \cos \alpha_{\text{нак}} - \sin \alpha_{\text{нак}}), \quad (6.12)$$

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

$L_k$  – длина скребкового конвейера, обеспечивающего подачу свободного зерна на транспортную доску (приложение П), *м*;

$q_z, q_{\text{ц}}$  – линейные массы соответственно груза и тягового органа, *кг/м*;

$\xi_p, \xi_x$  – коэффициенты сопротивления перемещению груза и тягового органа соответственно по рабочей и холостой ветви скребкового конвейера;

$\alpha_{\text{нак}}$  – угол наклона конвейера, равный углу наклона днища наклонной камеры к горизонту (приложение П), *град*.

Линейная масса груза на одном метре длины конвейера

$$q_z = \frac{m_{\text{св}}}{v_k}, \quad (6.13)$$

где  $m_{\text{св}}$  – ежесекундная масса свободного зерна, изымаемая из очесанного зернового вороха (производительность конвейера), *кг/с*;

$v_k$  – скорость тягового рабочего органа скребкового конвейера, *м/с*.

Считаем, что скорость скребкового конвейера, смонтированного под днищем наклонной камеры зерноуборочного комбайна равна скорости плавающего транспортера, то есть  $v_k=v_{\text{мп}}=3 \text{ м/с}$ .

При выделении 8 *кг* свободного зерна из очесанного зернового вороха, линейная масса груза составит

$$q_z = \frac{m_{\text{св}}}{v_k} = \frac{8}{3} = 2,67 \text{ кг/м}. \quad (6.14)$$

Линейная плотность одного метра скребкового конвейера равна

$$q_{\text{ц}} = 0,7 \cdot q_z = 0,7 \cdot 2,67 = 1,87 \text{ кг/м}, \quad (6.15)$$

где  $q_z$  – линейная масса груза, *кг/м*;

Согласно рекомендациям [223], принимаем коэффициенты сопротивления перемещению груза и тягового органа соответственно по рабочей и холостой ветви скребкового конвейера  $\xi_p=0,6, \xi_x=0,3$ .

Силы сопротивления передвижению определим исходя из того, что длина конвейера равна длине решетчатого днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна

- для рабочей ветви

$$W_p = 9,81 \cdot 1,3 \cdot (2,67 + 1,87) \cdot (0,6 \cdot \cos 45 + \sin 45) = 65,50 \text{ Н}; \quad (6.16)$$

- для холостой ветви

$$W_x = 9,81 \cdot 1,3 \cdot 1,87 \cdot (0,3 \cdot \cos 45 - \sin 45) = -31,56 \text{ Н}. \quad (6.17)$$

Знак минус показывает, что сила  $W_x$  способствует движению тягового органа, то есть является движущей силой.

Тогда, суммарные сопротивления движения скребкового конвейера

$$\Sigma W = 65,50 - 31,56 = 33,94 \text{ Н}. \quad (6.18)$$

Тяговое усилие на ведущей звездочке составит

$$F_t = 1,1^2 \cdot 33,94 = 41,07 \text{ Н}. \quad (6.19)$$

Подставив все составляющие в формулу 6.8, окончательно получим

$$N_{oon} = \frac{41,07 \cdot 3}{0,98 \cdot 0,9} = 141,84 \text{ Вт} \approx 0,2 \text{ кВт}. \quad (6.20)$$

Таким образом, экономия мощности на привод молотильного барабана вследствие изъятия из очесанного вороха свободного зерна с учетом дополнительного оборудования окончательно составит 10 кВт.

### 6.3 РАСЧЕТ ЭКОНОМИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ

Расчет экономической эффективности выполним согласно ГОСТ 53056-2008 [61], а исходные данные представим в виде таблицы 6.1.

Удельный расход топлива для проектного варианта определен из регуляторной характеристики двигателя ЯМЗ-236БЕ-2-28 по величине его номинальной мощности.



Таблица 6.1 – Исходные данные

Наименование показателей	Принятое значение	Значение показателей	
		базового	проектного
Рабочая ширина захвата, м	$B_p$	6,0	6,0
Рабочая скорость, км/ч	$V_p$	7,0	7,35
Продолжительность смены, ч	$T_{см}$	7,0	7,0
Коэффициент использования сменного времени	$\tau_{см}$	0,63	0,63
Номинальная мощность двигателя, кВт	$N_e$	213	203
Годовая сезонная нагрузка, ч			
- комбайн	$T_{з.к}$	160	160
- жатка	$T_{з.ж}$	128	128
Балансовая стоимость, руб.			
- комбайн	$B_{с.к}$	6900000	6900000
- жатка	$B_{с.ж}$	1300000	1400000
в т.ч. сметная стоимость разработки	$K_{\partial}$		100000
Норма амортизационных отчислений, %			
- комбайн	$a_k$	10	10
- жатка	$a_{ж}$	12,5	12,5
Норматив затрат на ремонт, ТО и хранение (от цены техники)			
- комбайн	$P_k$	10,3	10,3
- жатка	$P_{ж}$	7,8	7,8
Обслуживающий персонал, чел	$L$	1	1
Часовая тарифная ставка, руб/ч	$C_q$	210,50	210,50
Удельный расход топлива двигателя, г/кВт·ч	$q_m$	216	200
Цена топлива, руб/кг	$C_m$	56,90	56,90

## Производительность агрегатов

$$W_q = 0,1 \cdot B_p \cdot V_p \cdot \tau_{см}, \quad (6.21)$$

$$W_{см} = W_q \cdot T_{см}, \quad (6.22)$$

$$W_z = W_q \cdot T_{з.к}, \quad (6.23)$$

где  $W_q$ ,  $W_{см}$ ,  $W_z$  – производительность агрегатов соответственно часовая, сменная и годовая, *га/ч*, *га/смену*, *га/год*;

$B_p$  – рабочая ширина захвата, *м*;

$V_p$  – рабочая скорость, *км/ч*;

$\tau_{см}$  – коэффициент сменного времени;

$T_{см}$  – продолжительность смены, *ч*;

$T_{з.к}$  – годовая сменная загрузка зерноуборочного комбайна, *ч*;

- в базовом варианте

$$W_{q1} = 0,1 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 0,63 = 2,65 \text{ га/ч}, \quad (6.24)$$

$$W_{см1} = 2,65 \cdot 7 = 18,55 \text{ га/смену}, \quad (6.25)$$

$$W_{z1} = 2,65 \cdot 160 = 424 \text{ га/год}, \quad (6.26)$$

- в проектном варианте

$$W_{q2} = 0,1 \cdot 6 \cdot 7,35 \cdot 0,63 = 2,78 \text{ га/ч}, \quad (6.27)$$

$$W_{см2} = 2,78 \cdot 7 = 19,46 \text{ га/смену}, \quad (6.28)$$

$$W_{z2} = 2,78 \cdot 160 = 444,8 \text{ га/год}. \quad (6.29)$$

Затраты труда на уборку

$$T_n = \frac{L}{W_q}, \quad (6.30)$$

где  $L$  – количество обслуживающего персонала, *чел.*;

- в базовом варианте

$$T_{n1} = \frac{1}{2,65} = 0,38 \text{ чел.ч/га}, \quad (6.31)$$

- в проектном варианте

$$T_{n2} = \frac{1}{2,78} = 0,36 \text{ чел.ч/га}. \quad (6.32)$$

Снижение затрат на уборке

$$C_{mn} = \frac{T_{n1} - T_{n2}}{T_{n1}} \cdot 100 = \frac{0,38 - 0,36}{0,38} \cdot 100 = 5,26 \%. \quad (6.33)$$

Затраты на оплату труда

$$Z_n = \frac{C_q \cdot K_o \cdot R_{соц} \cdot Л}{W_q}, \quad (6.34)$$

где  $C_q$  – часовая тарифная ставка, руб/ч;

$K_o$  – коэффициент увеличения оплаты труда по тарифу;

$R_{соц}$  – процент начислений на собственные нужды, %;

- в базовом варианте

$$Z_{n1} = \frac{210,50 \cdot 1,574 \cdot 1,39 \cdot 1}{2,65} = 173,80 \text{ руб/га}, \quad (6.35)$$

- в проектном варианте

$$Z_{n2} = \frac{210,50 \cdot 1,574 \cdot 1,39 \cdot 1}{2,78} = 165,66 \text{ руб/га}. \quad (6.36)$$

Затраты на ремонт и техническое обслуживание

$$P_m = \frac{B_{с.к} \cdot P_{\kappa}}{100 \cdot T_{з.к} \cdot W_q} + \frac{B_{с.жс} \cdot P_{\text{жс}}}{100 \cdot T_{з.жс} \cdot W_q}, \quad (6.37)$$

где  $B_{с.к}$ ,  $B_{с.жс}$  – балансовая стоимость соответственно зерноуборочного комбайна и очесывающей жатки, руб;

$P_{\kappa}$ ,  $P_{\text{жс}}$  – норматив затрат на ремонт, ТО и хранение (от цены техники) соответственно зерноуборочного комбайна и очесывающей жатки, %;

- в базовом варианте

$$P_{m1} = \frac{6900000 \cdot 10,3}{100 \cdot 160 \cdot 2,65} + \frac{1300000 \cdot 7,8}{100 \cdot 128 \cdot 2,65} = 1975,12 \text{ руб/га}, \quad (6.38)$$

- в проектном варианте

$$P_{m2} = \frac{6900000 \cdot 10,3}{100 \cdot 160 \cdot 2,78} + \frac{1400000 \cdot 7,8}{100 \cdot 128 \cdot 2,78} = 1913,77 \text{ руб/га}. \quad (6.39)$$

Амортизационные отчисления

$$A_m = \frac{B_{с.к} \cdot a_{\kappa}}{100 \cdot T_{з.к} \cdot W_q} + \frac{B_{с.жс} \cdot a_{\text{жс}}}{100 \cdot T_{з.жс} \cdot W_q}, \quad (6.40)$$

где  $a_{\kappa}$ ,  $a_{\text{жс}}$  – норма амортизационных отчислений соответственно зерноуборочного комбайна и очесывающей жатки, %;

- в базовом варианте

$$A_{m1} = \frac{6900000 \cdot 10}{100 \cdot 160 \cdot 2,65} + \frac{1300000 \cdot 12,5}{100 \cdot 128 \cdot 2,65} = 2106,43 \text{ руб/га}, \quad (6.41)$$

- в проектном варианте

$$A_{m2} = \frac{6900000 \cdot 10}{100 \cdot 160 \cdot 2,78} + \frac{1400000 \cdot 12,5}{100 \cdot 128 \cdot 2,78} = 2043,05 \text{ руб/га}. \quad (6.42)$$

Стоимость топлива

$$T_c = \frac{N_e \cdot q_m \cdot \eta \cdot C_m}{1000 \cdot W_q}, \quad (6.43)$$

где  $N_e$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$q_m$  – удельный расход топлива двигателя, г/кВт·ч;

$\eta = 0,85$  – коэффициент использования мощности двигателя;

$C_m$  – цена топлива, руб/кг;

- в базовом варианте

$$T_{c1} = \frac{213 \cdot 216 \cdot 0,85 \cdot 56,90}{1000 \cdot 2,65} = 839,69 \text{ руб/га}, \quad (6.44)$$

- в проектном варианте

$$T_{c2} = \frac{203 \cdot 200 \cdot 0,90 \cdot 56,90}{1000 \cdot 2,78} = 747,89 \text{ руб/га}, \quad (6.45)$$

Всего прямых затрат

$$P_3 = Z_n + P_m + A_m + T_c, \quad (6.46)$$

- в базовом варианте

$$P_{31} = 173,80 + 1975,12 + 2106,43 + 839,69 = 5095,04 \text{ руб/га}, \quad (6.47)$$

- в проектном варианте

$$P_{32} = 165,66 + 1913,77 + 2043,05 + 747,89 = 4870,37 \text{ руб/га}. \quad (6.48)$$

Прочие прямые затраты

$$P_{n3} = \frac{h \cdot P_3}{100}, \quad (6.49)$$

где  $h$  – процент общих затрат, %;

- в базовом варианте

$$П_{нз1} = \frac{10 \cdot 5095,04}{100} = 509,50 \text{ руб} / \text{га}, \quad (6.50)$$

- в проектном варианте

$$П_{нз2} = \frac{10 \cdot 4870,37}{100} = 487,04 \text{ руб} / \text{га}, \quad (6.51)$$

Удельные эксплуатационные затраты

- в базовом варианте

$$\mathcal{E}_{y\partial 1} = П_{з1} + П_{нз1} = 5095,04 + 509,50 = 5604,54 \text{ руб} / \text{га}, \quad (6.52)$$

- в проектном варианте

$$\mathcal{E}_{y\partial 2} = П_{з2} + П_{нз2} = 4870,37 + 487,04 = 5357,41 \text{ руб} / \text{га}. \quad (6.53)$$

Годовая экономия эксплуатационных затрат

$$\mathcal{E}_{экс} = (\mathcal{E}_{y\partial 1} - \mathcal{E}_{y\partial 2}) \cdot Q, \quad (6.54)$$

где  $Q$  – убираемая площадь, га;

$$\mathcal{E}_{экс} = (5604,54 - 5357,41) \cdot 500 = 123565 \text{ руб}. \quad (6.55)$$

Удельные капитальные вложения равны

- в базовом варианте

$$K_{y\partial 1} = \frac{B_{с.к1}}{W_{ч1} \cdot T_{з.к}} + \frac{B_{с.ж1}}{W_{ч2} \cdot T_{з.ж}} = \frac{6900000}{2,65 \cdot 160} + \frac{1300000}{2,65 \cdot 128} = 20106,13 \text{ руб} / \text{га}, \quad (6.56)$$

- в проектном варианте

$$K_{y\partial 2} = \frac{B_{с.к2}}{W_{ч2} \cdot T_{з.к}} + \frac{B_{с.ж2}}{W_{ч2} \cdot T_{з.ж}} = \frac{6900000}{2,78 \cdot 160} + \frac{1400000}{2,78 \cdot 128} = 19446,94 \text{ руб} / \text{га}. \quad (6.57)$$

Приведенные затраты

- в базовом варианте

$$П_{з.y\partial 1} = \mathcal{E}_{y\partial 1} + 0,1 \cdot K_{y\partial 1} = 5604,54 + 0,1 \cdot 20106,13 = 7615,15 \text{ руб} / \text{га}, \quad (6.58)$$

- в проектном варианте

$$П_{з.y\partial 2} = \mathcal{E}_{y\partial 2} + 0,1 \cdot K_{y\partial 2} = 5357,41 + 0,1 \cdot 19446,94 = 7302,10 \text{ руб} / \text{га}. \quad (6.59)$$

Годовой экономический эффект

$$\Gamma_{эф} = (P_{з.уд1} - P_{з.уд2}) \cdot Q = (7615,15 - 7302,10) \cdot 500 = 156525 \text{ руб.} \quad (6.60)$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений

$$T_{ок} = \frac{K_{раз}}{\Gamma_{эф}}, \quad (6.61)$$

где  $K_{раз}$  – стоимость конструкторской разработки, руб.

$$T_{ок} = \frac{100000}{156525} = 0,64 \text{ года.} \quad (6.62)$$

Энергонасыщенность агрегата

$$F = \frac{N_e}{G_{жс} + G_k}, \quad (6.63)$$

где  $N_e$  – номинальная мощность двигателя комбайна, кВт;

$G_{жс}$  – масса очесывающей жатки, кг;

$G_k$  – масса зерноуборочного комбайна, кг.

- в базовом варианте

$$F_1 = \frac{N_{e1}}{G_{жс1} + G_{к1}} = \frac{213}{1870 + 16100} = 0,0118 \text{ кВт}, \quad (6.64)$$

- в проектном варианте

$$F_2 = \frac{N_{e2}}{G_{жс2} + G_{к2}} = \frac{203}{1940 + 16100} = 0,0113 \text{ кВт}, \quad (6.65)$$

Удельная энергоёмкость операции

$$\mathcal{E} = \frac{N_e}{W_2}, \quad (6.66)$$

где  $W_2$  – годовая производительность агрегатов, га/год;

- в базовом варианте

$$\mathcal{E}_1 = \frac{N_{e1}}{W_{21}} = \frac{213}{424} = 0,502 \text{ кВт/га}, \quad (6.67)$$

- в проектном варианте

$$\mathcal{E}_2 = \frac{N_{e2}}{W_{22}} = \frac{203}{444,8} = 0,456 \text{ кВт/га.} \quad (6.68)$$

Коэффициент эффективности капитальных вложений

$$\mathcal{E}_k = \frac{G_{эф}}{K_{раз}} = \frac{156525}{100000} = 1,56. \quad (6.69)$$

Если предположить, что 30% от всей посевной площади в России, занятой под зерновыми колосовыми культурами (39558 тыс. га, табл. 1.1) будут убраны посредством очеса растений на корню, а средняя нагрузка на один комбайн составит 500 га, то годовой экономический эффект для народного хозяйства страны окажется равным порядка 3,72 млрд. рублей.

### ВЫВОДЫ ПО ШЕСТОЙ ГЛАВЕ

1. Модернизация наклонной камеры зерноуборочного комбайна путем снабжения ее решетчатым днищем и устройством для отвода свободного зерна и подачи его 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%. При этом, мощность на привод дополнительного оборудования, обеспечивающего подачу свободного зерна на транспортную доску комбайна, составит 0,2 кВт.

2. 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.

3. 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  $v_{фак.сен}=0,105$  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 эффек-

тивности 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 зерна и его подачи на очистку, минуя молотильное устройство, позволила уменьшить затраты мощности на привод барабана на  $10 \text{ кВт}$ , 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  $8 \times 160$  мм, сориентированных длинной стороной по направлению перемещения скребка 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 –  $45^\circ$ .

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абаев, В.В. Оптимизация машинно-технологического обеспечения ресурсосберегающих процессов уборки зерновых культур в регионах с широким диапазоном распределения урожайности: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Абаев Василий Васильевич. – Ростов-на-Дону, 2011. – 36 с.
2. А.С. № 1165278 СССР, МПК А01D41/08. Устройство для обмо- лота растений на корню / И.К. Голубев, Б.И. Гончаров, В.Н. Цыбульников, Б.П. Трухин, В.И. Белоконь, В.А. Найда. – Заявка № 3633051/30-15 от 24.05.1983; опубл. 07.07.1985, бюл. № 25.
3. А.С. № 1715232 СССР, МПК А01D41/08. Устройство для обмо- лота сельскохозяйственных культур на корню / Н.Н. Аблогин, Н.Н. Данчен- ко. – Заявка № 4794116/15 от 21.02.1990; опубл. 29.12.1992, бюл. № 8.
4. А.С. № 232642 СССР, МПК А01D41/00, А01D41/12. Зерноубо- рочный комбайн / А.Д. Логин, В.М. Медведчиков, В.П. Гаврилов, Ю.И. При- бытков. – Заявка № 1172163/30-15 от 10.07.1967; опубл. 11.12.1968, бюл. № 1.
5. А.С. № 235451 СССР, МПК А01D41/12. Наклонная камера зер- ноуборочного комбайна / Р.К. Калимуллин. – Заявка № 1222191/30-15 от 28.11.1968; опубл. 16.01.1969, бюл. № 5.
6. А.С. № 372968 СССР, МПК МПКА01D41/12, А01F12/20. Наклон- ная камера зерноуборочного комбайна / П.М. Трибурт, Б.В. Пушкарев, В.С. Паршин. – Заявка № 1680664/30-15 от 13.07.1971; опубл. 12.03.1973, бюл. № 14.
7. А.С. № 1687078 СССР, МПК А01D41/12. Наклонная камера зер- ноуборочного комбайна / А.В. Дементьев, В.И. Скорик, Б.К. Пастухов, Ж.С. Садыков, Б.И. Андусенко. – Заявка № 4689013/15 от 12.05.1989; опубл. 30.10.1991, бюл. № 40.
8. А.С. № 1766310 СССР, МПК А01D41/08. Комбайн для уборки зерновых культур на корню / Н.Н. Данченко, В.Н. Шкин- дер, Н.Н. Аблогин, Н.Ф. Стоев и др. – Заявка № 4670394/15 от 06.02.1989, опубл. 07.10.1992, бюл. № 37.

9. А.С. № 1124893 СССР, МПКА01F12/24. Дека молотильного устройства / А.Г. Рыбалко, Э.А. Цебоев. – Заявка № 3630501/30-15 от 26.05.1983; опубл. 23.11.1984, бюл. № 43.

10. А.С. № 1015855 СССР, МПК А01F12/24. Дека молотильного устройства / А.А. Шамин, В.И. Машинов, Е.Г. Воистинов, В.Г. Игнатъев, К.И. Ростовцев. – Заявка № 2684897/30-15 от 14.11.1978; опубл. 07.05.1983, бюл. № 17.

11. А.С. № 1056952 СССР, МПК А01F7/00. Молотильное устройство / А.М. Вахрушев, А.С. Вишняков, В.В. Гречко, В.Н. Мурин, В.Л. Пахаруков. – Заявка № 3463396/30-15 от 05.07.1982; опубл. 30.11.1983, бюл. № 44.

12. Алдошин, Н.В. Жатка «Озон» на уборке белого люпина / Н.В. Алдошин, Н.А. Лылин, М.А. Мосяков // Современные тенденции развития технологий и технических средств в сельском хозяйстве: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию А.П. Тарасенко, доктора технических наук, заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора кафедры сельскохозяйственных машин Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I. Под общей редакцией Н.И. Бухтоярова, В.И. Оробинского, И.В. Баскакова. – 2017. – С. 102-109.

13. Алдошин, Н.В. Выбор кинематического параметра работы очесывающей жатки «Озон» / Н.В. Алдошин, М.А. Мосяков // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России: Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвященной 100-летию академика Д.К. Беляева. – 2017. – С. 13-19.

14. Алдошин, Н.В. Изучение ударного воздействия рабочих органов комбайна на качество зерна белого люпина / Н.В. Алдошин, Н.А. Аладьев // Научно-технический прогресс в АПК. Международная научно-практическая конференция, в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал». – 2016. – С. 16-22.

15. Алдошин, Н.В. Пути улучшения работы очистки зерноуборочного комбайна / Н.В. Алдошин // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный аграрный университет имени В.П. Горячкина». – 2017. – № 6 (82). – С. 43-47.
16. Антипин, В.Г. Комбайн для зоны повышенного увлажнения / В.Г. Антипин, А.И. Метин // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1972. – № 10. – С. 47-48.
17. Артемов, В.Е. Совершенствование технологии уборки зерновых колосовых культур с использованием прицепного подборщика-измельчителя соломы: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Артемов Вадим Евгеньевич. – Краснодар, 2005. – 23 с.
18. Астафьев, В.Л. Оценка эффективности зерноуборочных комбайнов различных классов в условиях Северного Казахстана / В.Л. Астафьев, Э.В. Жалнин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т. 12. – № 3. – С. 17-21.
19. Ахматов, А.А. Травмирование зерна шнековым питающим устройством / А.А. Ахматов, В.И. Оробинский, В.Н. Солнцев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4 (47). – С. 98-101.
20. Ахматов, А.А. К обоснованию истечения зерновых смесей в питающем устройстве / А.А. Ахматов, В.И. Оробинский, В.П. Шацкий, В.Н. Солнцев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 4 (51). – С. 114-120.
21. Барсуков, Л.А. Исследование возможности частичного обмолота хлебной массы наклонным транспортером зерноуборочного комбайна: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Барсуков Леонид Афанасьевич. – Свердловск, 1974. – 176 с.

22. Басканьян, Г.А. Определение сил прочности связи зерна с колосом и обмолачиваемости зерновых колосовых культур: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Басканьян Георгий Аркадьевич. – М., 1963. – 31 с.
23. Бердышев, В.Е. Методология оценки качества функционирования зерноуборочных комбайнов / В.Е. Бердышев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 2 (76). – С. 85-89.
24. Бердышев, В.Е. Методология совершенствования рабочих органов зерноуборочных комбайнов / В.Е. Бердышев // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 8. – С. 32-34.
25. Бердышев, В.Е. Обоснование параметров рабочих органов молотилки зерноуборочного комбайна с аксиально-роторной молотильно-сепарирующей системой: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Бердышев Виктор Егорович. – М., 2014. – 486 с.
26. Блохин, В.Н. Пособие по теоретической механике / В.Н. Блохин, А.М. Случевский. – Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2014. – 231 с.
27. Блохин, В.Н. Справочник по теоретической механике / В.Н. Блохин, С.И. Старовойтов, В.П. Лапик. – Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2012. – 415 с.
28. Богданов, И.Н. Пневматический транспорт в сельском хозяйстве / И.Н. Богданов. – М.: Росагропромиздат, 1991. – 128 с.
29. Борисова, Л.В. Повышение эффективности функционирования уборочных машин на основе моделей экспертных знаний: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01, 05.20.03/ Борисова Людмила Викторовна. – Ростов-на-Дону, 2007. – 48 с.
30. Боровиков, В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В.П. Боровиков. – СПб.: Питер, 2001. – 656 с.
31. Боровков, А.А. Математическая статистика. Оценка параметров. Проверка гипотез / А.А. Боровков. – М.: Наука, 1984. – 472 с.
32. Брандт, З. Анализ данных. Статические и вычислительные методы для научных работников и инженеров / З. Брандт. – М.: Мир, 2003. – 686 с.

33. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендиев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
34. Бурьянов, А.И. Моделирование процесса очеса зерновых культур однобарабанной жаткой / А.И. Бурьянов, М.А. Бурьянов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2012. – № 4. – С. 2-5.
35. Бурьянов, А.И. Эффективность технологии уборки зерновых культур комбайновым очесом / А.И. Бурьянов, М.А. Бурьянов, И.В. Червяков // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 9. – С. 34-39.
36. Бурьянов, М.А. Параметры и режимы процесса очеса зерновых культур навесной на комбайн жаткой: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Бурьянов Михаил Алексеевич. – зерноград, 2011. – 194 с.
37. Бурьянов, А.И. Совершенствование инерционного способа уборки зерновых культур очесом / А.И. Бурьянов, М.А. Бурьянов, И.В. Червяков // Вестник аграрной науки Дона. – 2016. – Т. 2. – № 34. – С. 15-23.
38. Бурьянов, М.А. Определение биологических потерь зерна озимой пшеницы при различной продолжительности уборки в условиях Ростовской области / М.А. Бурьянов, А.И. Бурьянов, О.А. Костыленко // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 2 (225). – С. 10-14.
39. Бурьянов, М.А. Разработка и совершенствование методов обоснования технологии комбайновой уборки зерновых культур очесом / М.А. Бурьянов // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – № 2 (38). – С. 59-72.
40. Бутовченко, А.В. Интенсификация процесса сепарации материалов в отделении очистки семяочистительного агрегата: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Бутовченко Андрей Владимирович. – Ростов-на-Дону, 2008. – 23 с.
41. Бышов, Н.В. Перспективная система контроля загрузки наклонной камеры зерноуборочного комбайна / Н.В. Бышов, Р.В. Безносюк, В.В. Фокин и др. // Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. – 2015. – С. 182-185.



42. Бышов, Н.В. Машина для уборки зерновых культур / Н.В. Бышов, А.И. Ряднов, О.А. Федорова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 1 (49). – С. 298-303.
43. Валеев, Г.А. Качественная оценка обмолота зерновых культур на основе исследования напряженно-деформированного состояния модели растительной массы: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Валеев Галимжан Абубакирович. – Челябинск, 1983. – 180 с.
44. Варывдин, В.В. Расчет деталей и механизмов подъемно-транспортных машин с элементами САПР / В.В. Варывдин, Н.А. Романеев, В.В. Никитин. – Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2013. – 131 с.
45. Варывдин, В.В. Проектирование механических передач / В.В. Варывдин, Н.А. Романеев, Н.Ю. Кожухова. – Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2009. – 183 с.
46. Василенко, И.Ф. Зерновые комбайны СССР и зарубежных стран / И.Ф. Василенко. – М.: Сельхозгиздат, 1958. – 294 с.
47. Васильев, А.С. Основы программирования в среде LabVIEW / А.С. Васильев, О.Ю. Лашманов. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 82 с.
48. Волкова, Н.А. Экономическое обоснование инженерно-технических решений в дипломных проектах / Н.А. Волкова. – Пенза: Пензенская ГСХА, 2000. – 167 с.
49. Воскобойников, Ю.Е. Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad / Ю.Е. Воскобойников. – СПб.: Лань, 2011. – 224 с.
50. Вуколов, Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL: учеб. пособие для вузов / Э.А. Вуколов. – М.: Инфра-М, 2004. – 464 с.
51. Галкин, А.В. Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата / А.В. Галкин,

Д.Г. Фадеев, И.В. Ущাপовский // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – № 3. – С. 389-399.

52. Галкин, А.В. Исследование затрат энергии на привод гребневого очесывающе-транспортирующего барабана льноуборочной машины / А.В. Галкин, Д.Г. Фадеев // Агротехника и энергообеспечение. – 2014. – № 1. – С. 198-203.

53. Галкин, А.В. Энергетические показатели гребневых очесывающе-транспортирующих аппаратов при различных способах очеса стеблей льна / А.В. Галкин, Д.Г. Фадеев // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 9. – С. 9-11.

54. Гарманов, А.В. Крейтовая система LTR. Руководство пользователя / А.В. Гарманов. – М.: ООО «Л КАРД», 2020. – 508 с.

55. Гиевский, А.М. Повышение эффективности работы универсальных воздушно-решетных зерноочистительных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Гиевский Алексей Михайлович. – Воронеж, 2016. – 364 с.

56. Гиевский, А.М. Применение конечно-объемного метода решения уравнений гидродинамики для обоснования отдельных параметров пневмосистемы зерноочистительных машин / А.М. Гиевский, В.И. Оробинский, В.А. Гулевский, А.В. Чернышов // Вестник аграрной науки. – 2017. – № 5 (68). – С. 65-73.

57. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.

58. Горбачев, И.В. Организация и технология уборки зерновых уборочно-транспортными комплексами / И.В. Горбачев. – М.: Изд-во Высшая школа, 1983. – 111 с.

59. Горбачев, И.В. Как убрать зерновые без потерь / И.В. Горбачев, Ю.М. Шрейдер // Сельский механизатор. – 2012. – № 6. – С. 6-7.

60. Горбачев, И.В. Подготовка полей к уборке зерновых / И.В. Горбачев, Ю.М. Шрейдер // Сельский механизатор. – 2012. – № 8. – С. 16-18.

61. ГОСТ 53056-2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.
62. ГОСТ 30483-97 Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержания мелких зерен и крупности; содержания зерен пшеницы, поврежденных клопом-черепашкой; содержание металломагнитной примеси / ВНИИЗ, МТК 2. – М.: Стандартинформ, 2009. – 19 с.
63. ГОСТ 20915-75. Сельскохозяйственные машины. Методы определения условий испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 27 с.
64. ГОСТ 28301-2015. Комбайны зерноуборочные. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2016. – 39 с.
65. ГОСТ 10842-89. Зерно. Методы определения массы 1000 зерен. – М.: Стандартинформ, 2009. – 4 с.
66. ГОСТ 7.0.11-2011. Диссертация и автореферат. Структура и правила оформления. – М.: Стандартинформ, 2012. – 12 с.
67. Горячкин, В.П. Собрание сочинений в трех томах / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – Т. 1. – 720 с.
68. Гриценко, В.В. Семеноведение полевых культур / В.В. Гриценко, З.М. Калошина. – М.: Колос, 1972. – 116 с.
69. Гудков, Д. А. Повышение эффективности уборки зерновых культур путем обоснования сроков начала уборки и режимов работы зерноуборочных комбайнов в условиях северо-запада РФ: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.20.01/ Гудков Денис Александрович. – Санкт-Петербург-Павловск, 2003. – 20 с.
70. Гузенков, П.Г. Детали машин / П.Г. Гузенков. – М.: Высшая школа, 1982. – 351 с.
71. Гячев, Л.В. Движение материалов в трубах и бункерах / Л.В. Гячев. – М.: Машиностроение, 1968. – 184 с.
72. Детали машин и основы конструирования / Под ред. М.Н. Ерохина. – М.: КолосС, 2004. – 462 с.

73. Долгов, И.А. Влияние условий уборки на конструкцию зерноуборочного комбайна / И.А. Долгов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2011. – №6. – С. 27-29.

74. Долгов, И.А. Уборочные сельскохозяйственные машины. (Конструкция, теория, расчет): учебник / И.А. Долгов. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 707 с.

75. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

76. Дридигер, В.К. Уборка озимой пшеницы методом очеса растений в технологии No-till / В.К. Дридигер, Р.Г. Гаджиумаров, Е.Я. Яговитова // Достижение науки и техники АПК. – 2020. – Т. 34. – № 10. – С. 78-84.

77. Дринча, В.М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки / В.М. Дринча. – Воронеж: Изд-во НПО «МОДЭК», 2006. – 384 с.

78. Дьяконов, В.П. Компьютерная математика. Теория и практика / В.П. Дьяконов. – М.: Нолидж, 2001. – 1296 с.

79. Ермольев, Ю.И. Интенсификация технологических операций в воздушно-решетных зерноочистительных машинах / Ю.И. Ермольев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1989. – 494 с.

80. Ермольев, Ю.И. Технологические основы интенсификации процесса сепарации зерна воздушными зерноочистительными машинами и агрегатами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Ермольев Юрий Иванович. – Ростов-на-Дону, 1990. – 300 с.

81. Ермольев, Ю.И. Моделирование процесса сепарации зерновых отходов на транспортерном скельператоре / Ю.И. Ермольев, Г.И. Лукинов // Вестник ДГТУ. – 2002. – № 2 (12). – С. 144-146.

82. Ермольев, Ю.И. Моделирование процесса сепарации сыпучих материалов на транспортном сепараторе / Ю.И. Ермольев, Г.И. Лукинов, М.В. Шелков // Вестник ДГТУ. – 2001. – № 3 (9). – С. 31-41.

83. Ермольев, Ю.И. Моделирование технологической операции предварительной сепарации зернового вороха / Ю.И. Ермольев, Г.И. Лукинов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2009. – Т. 9. – № 3 (42). – С. 448-457.

84. Жалнин, Э.В. Методологические и технологические решения проблемы комплексной механизации уборки зерновых культур в условиях интенсивного зернопроизводства: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Жалнин Эдуард Викторович. – М., 1987. – 56 с.

85. Жалнин, Э.В. Прогнозы развития зерноуборочной техники / Э.В. Жалнин // Техника в сельском хозяйстве. – 1998. – № 4. – С. 3-7.

86. Жалнин, Э.В. Расчет основных параметров зерноуборочных комбайнов: монография / Э.В. Жалнин. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. – 2001. – 105 с.

87. Жалнин, Э.В. Расчет основных параметров зерноуборочных комбайнов с использованием принципа гармоничности их конструкции: монография / Э.В. Жалнин. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2011. – 104 с.

88. Жалнин, Э.В. Какие комбайны нужны российскому полю / Э.В. Жалнин // Сельский механизатор. – 2006. – № 5. – С. 6-7.

89. Жалнин, Э.В. Типаж комбайнов: какой есть и какой нужен / Э.В. Жалнин // Сельский механизатор. – 2012. – № 8. – С. 6-8.

90. Жалнин, Э.В. Методологические аспекты механизации производства зерна в России / Э.В. Жалнин. – М.: ПОЛИГРАМ СЕРВИС, 2012. – 368 с.

91. Жалнин, Э.В. Уборка с очесом на корню: за и против / Э.В. Жалнин // Сельский механизатор. – 2013. – № 8. – С. 10-12.

92. Жалнин, Э.В. Эффективное использование зерноуборочных комбайнов / Э.В. Жалнин // Сельский механизатор. – 2013. – № 9. – С. 5-7.

93. Жалнин, Э.В. Технические инновации в сельскохозяйственном производстве и ресурсосберегающий эффект / Э.В. Жалнин // АгроСнабФорум. – 2017. – № 3 (151). – С. 14.

94. Жалнин, Э.В. Основные задачи внедрения очесывающих жаток «ОЗОН» / Э.В. Жалнин // Сельский механизатор. – 2018. – № 5. – С. 10-11.
95. Зайцев, А.А. Анализ и синтез дифференцированного процесса обмолота и создание средств его реализации: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Зайцев Алексей Анатольевич. – Балашиха, 2002. – 386 с.
96. Зангиев, А.А. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка / А.А. Зангиев, А.Н. Скороходов. – М.: КолосС, 2006. – 320 с.
97. Инвестиции в России. 2019: Стат. сб. / Росстат. – М., 2019. – 228 с.
98. Иофинов, С.А. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов, Э.П. Бабенко, Ю.А. Зуев. – М.: Агропромиздат, 1985. – 272 с.
99. Лачуга, Ю.Ф. Технологии и средства уборки зерновых культур очесом / Ю.Ф. Лачуга // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 5. – С. 2-6.
100. Казаков, В.Е. Повреждение зерна на корню при уборке урожая / В.Е. Казаков. – М., 1964. – 245 с.
101. Казаков, Е.Д. Зерноведение с основами растениеводства / Е.Д. Казаков. – М.: Колос, 1983. – 352 с.
102. Карпенко, А.Н. Сельскохозяйственные машины / А.Н. Карпенко, В.М. Халанский. – М.: Агропромиздат, 1989. – 527 с.
103. Карпенко, Р.Н. Изменение фракционного состава вороха при уборке семенников люцерны очесом / Р.Н. Карпенко, А.В. Чернышов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2006. – № 13. – С. 165-171.
104. Кирьянов, Д.В. Mathcad 15 / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
105. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. – М.: Колос, 1980. – 671 с.
106. Кленин, Н.И. Ударное воздействие на хлебную массу в процессе обмолота / Н.И. Кленин, Ю.Ф. Лачуга // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1970. – № 12. – С. 40-41.

107. Кленин, Н.И. Исследование вымолота и сепарации зерна: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Кленин Николай Иванович. – М., 1977. – 424 с.
108. Клочков, А.В. Комбайны зерноуборочные / А.В. Клочков, В.А. Попов, А.В. Адашь. – Мн.: УП «Новик», 2000. – 192 с.
109. Клочков, А.В. Основные результаты исследования зерноуборочных комбайнов в 2019 году / А.В. Клочков, В.В. Гусаров, Р.В. Богатырев // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: материалы международной научно-технической конференции. – Гомель: научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2019. – С. 106-108.
110. Ковлягин, Ф.В. Уборка зерновых культур методом очеса / В.Ф. Ковлягин, Г.Г. Маслов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1991. – № 8. – С. 5-6.
111. Колчин, А.В. Датчики средств диагностирования машин / А.В. Колчин. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.
112. Комбайн зерноуборочный самоходный КЗС-10К «ПАЛЕССЕ GS10». Инструкция по эксплуатации. – 2013. – 231 с.
113. Комогорцев, В.Ф. Приближенные числа и действия над ними / В.Ф. Комогорцев, В.А. Погоньшев. – Брянск: Издательство БГСХА, 2008. – 24 с.
114. Комогорцев, В.Ф. Исследование устойчивости цилиндра с обрешеченной 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.
115. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
116. Косолапов, Е.В. Применение аналого-цифрового преобразователя для исследования прочностных свойств стебельного материала / Е.В. Косолапов, О.П. Матушкин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6. – С. 30-34.

117. Кравченко, Н.П. Обоснование приоритетных инноваций в растениеводстве и оценка их эффективности: автореф. дисс. ... д-ра экон. наук: 08.00.05 / Кравченко Николай Петрович. – Майкоп, 2011. – 46 с.

118. Ксенович, И.П. Сельскохозяйственные машины и оборудование: Машиностроение, энциклопедия в сорока томах / И.П. Ксенович, Г.П. Варламов, Н.Н. Колчин. – М.: Машиностроение, 1998. – 136 с.

119. Кубышев, В.А. Исследование ориентирующей способности плоского решета с продолговатыми отверстиями / В.А. Кубышев, П.Н. Лапшин, А.И. Климок // Науч.-техн. бюл. СибНИИ мех. и электриф. с.х.-ва. Вып. 4. – 1978. – С. 3-12.

120. Кубышев, В.А. Пути повышения производительности и качества работы решет с продолговатыми отверстиями / В.А. Кубышев и др. // Сб. науч. тр. Уральск. научн.-исслед. ин-та с.х.-ва. Вып. 4. – Челябинск, 1973. – С. 158-171.

121. Кудрявцев, В.А. Краткий курс высшей математики / В.А. Кудрявцев, Б.П. Демидович. – М.: Наука, 1986. – 576 с.

122. Кухарев, О.Н. Исследование физико-механических составляющих стебля растения / О.Н. Кухарев, И.Н. Семов, М.А. Федин // Сборник статей всероссийской научно-практической конференции «Участие молодых ученых в решении актуальных вопросов АПК России». – Пенза: РИО ПГСХА, 2016. – С. 17-20.

123. Лапшин, И.П. Исследование вероятности разворота частиц на перемычках отверстия решета / И.П. Лапшин, А.С. Архипов // Через опыт – в науку: Материалы региональной научно-практической конференции. – Курган: ИПП «Зауралье», 1995. – С. 228-229.

124. Леженкин, А.Н. Методология формирования энерго- и ресурсосберегающей технологии уборки зерновых культур в условиях фермерских хозяйств: на примере Украины: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Леженкин Александр Николаевич. – М., 2008. – 503 с.



125. Леженкин, А.Н. Машина с очесывающим устройством / А.Н. Леженкин // Сельский механизатор. – 2004. – № 12. – С. 2.
126. Леженкин, А.Н. Уборка соломы после очеса растений / А.Н. Леженкин // Сельский механизатор. – 2005. – № 1 – С. 19.
127. Липкович, Э. И. Механико-технологические основы процессов обмолота и сепарации в молотильных устройствах зерноуборочных комбайнов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Липкович Эдуард Иосифович. – зерноград, 1975. – 45 с.
128. Липкович, Э. И. Процессы обмолота и сепарации в молотильных аппаратах зерноуборочных комбайнов / Э.И. Липкович. – зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1973. – 166 с.
129. Липкович, Э.И. Уборка урожая комбайнами «Дон» / Э.И. Липкович, В.И. Рогуля, Н.И. Шабанов и др. – М.: Росагропромиздат, 1989. – 220 с.
130. Липовский, М.И. Повышение эффективности обмолота и сепарации грубого вороха в комбайнах для Нечерноземной зоны: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Липовский Марат Исаакович. – Санкт-Петербург, 2000. – 443 с.
131. Листопад, Г.Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Г.Е. Листопад. – М.: Агропромиздат, 1986. – 688 с.
132. Листопад, И.А. Планирование эксперимента в исследованиях по механизации сельскохозяйственного производства / И.А. Листопад. – М.: Агропромиздат, 1988. – 88с.
133. Логинов, В.Н. Электрические измерения механических величин / В.Н. Логинов. – М.: Энергия, 1976. – 104 с.
134. Ломакин, С.Г. Исследование влияния параметров молотильного устройства на качественные и энергетические показатели процесса обмолота: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ломакин Сергей Герасимович. – М., 1972. – 231 с.
135. Ломакин, С.Г. Анализ технического уровня зерноуборочных комбайнов «Ростсельмаш» / С.Г. Ломакин, В.Е. Бердышев // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профес-

сионального образования «Московский государственный аграрный университет имени В.П. Горячкина». – 2017. – № 6 (82). – С. 34-42.

136. Ломакин, С.Г. Условия уборки зерна в Российской Федерации и обеспеченность сельскохозяйственных предприятий зерноуборочными комбайнами / С.Г. Ломакин, В.Е. Бердышев // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный аграрный университет имени В.П. Горячкина». – 2016. – № 4 (74). – С. 11-15.

137. Лурье, А.Б. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин / А.Б. Лурье, А.А. Громбчевский. – Л.: Машиностроение, 1977. – 528 с.

138. Любимов, А.И. Некоторые способы повышения эффективности работы зерновых решет / А.И. Любимов // Тр. ВНИИЗ. Вып. 42. – М., 1963. – С. 238-246.

139. Люк, Ю. Специальные математические функции и их аппроксимация / Ю. Люк. – М.: Мир, 1980. – 608 с.

140. Майстренко, А.А. Исследование процесса обмолота и сепарации риса в двухпоточном рисозерновом комбайне СКД-5РС: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Майстренко Алексей Алексеевич. – Краснодар, 1972. – 23 с.

141. Макарова, Н.В. Статистика в Excel / Н.В. Макарова, В.Я. Трофимец. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

142. Макаров, Р.А. Тензометрирование в машиностроении: справочное пособие / Под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.

143. Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. – М.: Радио и связь, 1988. – 231 с.

144. Мальцев В.Ф. Система биологизации земледелия Нечерноземной зоны России. Ч. 1. / В.Ф. Мальцев, М.К. Каюмов, Е.В. Просянкин, Б.С. Лихачев и др. – М.: Росинформагротех, 2002. – 544 с.

145. Маслов, Г.Г. Эффективность снижения механических повреждений зерна комбайнами / Г.Г. Маслов, Я.С. Ефимкин, Ю.Сю. Чен // В сборни-

ке: Технологии XXI века: Проблемы и перспективы развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 ч. – 2017. – С. 161-164.

146. Мачихин, С.А. Движение верхнего слоя зерновой смеси на вибрирующей рифленой поверхности / С.А. Мачихин, А.А. Рындин, А.М. Васильев, А.Н. Стрелюхина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – Т. 80. – № 4. – С. 55–62.

147. Маяцкая, И.А. Разработка механико-математических моделей семян сельскохозяйственных культур, убираемых зернокомбайнами: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Маяцкая Ирина Александровна. – Ростов-на-Дону, 2000. – 22 с.

148. Мекшун, Ю.Н. Повышение эффективности процесса сепарации зерна путем применения решетного конвейера с поперечными колебаниями рабочей поверхности: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Мекшун Юрий Николаевич. – Курган, 2006. – 180 с.

149. Методы и результаты определения естественной силы связи зерна с колосом в период созревания и полной спелости / А.И. Бурьянов и др. // Зерновое хозяйство России. – 2018. – № 6. – С. 21-25.

150. Механизация растениеводства / В.Н. Солнцев, А.П. Тарасенко, В.И. Оробинский, О.И. Поливаев, А.В. Ворохобин, А.П. Дьячков; под ред. канд. техн. наук В.Н. Солнцева. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 383 с.

151. Михайлов, М.Р. Анализ использования зерноуборочной техники на различных этапах срока эксплуатации / М.Р. Михайлов // Вестник аграрной науки. – 2018. – № 5 (74). – С. 65-70.

152. Мосяков, М.А. Обоснование параметров рабочих органов очесывающей жатки для уборки белого люпина: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Мосяков Максим Александрович. – М., 2018. – 167 с.

153. Никитин, В.В. Улучшение качества обработки междурядий ягодных кустарников в условиях суглинистых почв повышенной влажности путем совершенствования конструктивно-режимных параметров дисковой бо-

роны: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Никитин Виктор Васильевич. – Брянск, 2009. – 237 с.

154. 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.

155. 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.

156. 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.

157. Никитин, В.В. Определение оптимальной длины днища наклонной камеры зерноуборочного комбайна при очесе / В.В. Никитин // Сельский механизатор. – 2018. – № 5. – С. 8-9.

158. Никитин, В.В. Определение оптимальных размеров отверстий сетчатого транспортера / В.В. Никитин // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 11 (102). – С. 17-26.

159. Никитин, Н.Н. Курс теоретической механики / Н.Н. Никитин. – М.: Высш. шк., 1990. – 606 с.

160. Обоснование выбора комбайна для уборки семенных посевов зерновых культур / В.И. Орбинский и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4 (59). – С. 86-91.

161. Ожерельев, В.Н. Современные зерноуборочные комбайны / В.Н. Ожерельев. – М.: Колос, 2008. – 176 с.

162. Ожерельев, В.Н. Алгоритм инженерного творчества в примерах / В.Н. Ожерельев. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2015. – 192 с.

163. Ожерельев, В.Н. Пути снижения энергоемкости молотильных устройств зерноуборочных комбайнов / В.Н. Ожерельев, М.В. Ожерельева, Ф.Н. Котиков // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2006. – № 1 (5). – С. 60-64.

164. 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.

165. Ожерельев, В.Н. 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.

166. Ожерельев, В.Н. Энергоемкость выделения зерна из колоса / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 4. – С. 22-24.

167. 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.

168. 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.

169. 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.

170. 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.

171. 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.

172. Ожерельев, В.Н. Стратегия совершенствования конструкции зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 8. – С. 39-43.

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

174. 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.

175. 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.

176. 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. II. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», 2018. – С. 137-143.

177. 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.

178. Ожерельев, В.Н. 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.

179. 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.

180. Ожерельев, В.Н. 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.

181. 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.

182. 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.

183. 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.

184. 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.

185. 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.

186. Озимые зерновые культуры: биология и технологии возделывания: монография / Под ред. Н.М. Белоуса. – Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2010. – 137.

187. Оробинский, В.И. Снижение травмирования зерна при уборке за счет совершенствования процесса доработки колосового вороха в молотилке комбайна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Оробинский Виктор Иванович. – Воронеж, 1987. – 212 с.

188. Оробинский, В.И. Улучшение качества семян / В.И. Оробинский, А.М. Гиевский, А.П. Тарасенко // Совершенствование технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: сб. науч. тр. Воронежского гос. аграр. ун-та. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2003. – С. 148-153.

189. Оробинский, В.И. Снижение травмирования зерна на уборке: монография / В.И. Оробинский, И.В. Баскаков, А.В. Чернышов. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – 161 с.

190. Павлюк, Р.В. Повышение эффективности работы зерноуборочных комбайнов / Р.В. Павлюк, А.Т. Лебедев // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 1. – С. 4-5.

191. Палапин, А.В. Оптимизация энергосберегающей технологии уборки зерновых культур методом очеса многофункциональным агрегатом / А.В. Палапин // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 37. – С. 264-270.

192. Пат. № 2278498 РФ, МПК А01F 7/00, 7/06, 12/18. Молотильное устройство / В.Н. Ожерельев, М.В. Ожерельева, П.В. Ожерельев. – Заявка № 2004106845/12 от 09.03.2004; опубл. 27.06.06, бюл. № 18.

193. Пат. № 2278499 РФ, МПК А01F 7/06, 12/18. Аксиально-роторное молотильно-сепарирующее устройство / В.Н. Ожерельев, М.В. Ожерельева. – Заявка № 2004107077/12 от 09.03.2004; опубл. 27.06.06, бюл. № 18.

194. Пат. № 2379878 РФ, МПК А01F 7/00, 7/06, 12/18. Молотильное устройство / В.Н. Ожерельев, Н.В. Ожерельева, М.В. Ожерельева. – Заявка № 2009100538/12 от 11.01.2009; опубл. 27.01.10, бюл. № 3.



195. Пат. № 2483525 РФ, МПК А01F7/00, А01F11/00, А01F12/18. Устройство для выделения зерна из колоса / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2012101889/13 от 19.01.2012; опубл. 10.06.2013, бюл. № 16.

196. Пат. № 2482656 РФ, МПК А01F7/00, А01F7/06, А01F12/18. Молотильное устройство / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2012105877/13 от 17.02.2012; опубл. 27.05.2013, бюл. № 15.

197. Пат. № 2534265 РФ, МПК А01F7/06, А01F12/18. Молотильное устройство / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2013137025/13 от 06.08.2013; опубл. 27.11.2014, бюл. № 33.

198. Пат. № 2566015 РФ, МПК А01D41/12. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2014135980/13 от 03.09.2014; опубл. 20.10.2015, бюл. № 29.

199. Пат. № 2566017 РФ, МПК А01D41/08. Устройство для обмолота растений на корню / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2014130712/13 от 24.07.2014; опубл. 20.10.2015, бюл. № 29.

200. Пат. № 2577892 РФ, МПК А01D41/12. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2014145875/13 от 14.11.2014; опубл. 20.03.2016, бюл. № 8.

201. Пат. № 2631344 РФ, МПК А01D41/02. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2016113476 от 07.04.2016; опубл. 21.09.2017, бюл. № 27.

202. Пат. № 2653011 РФ, МПК А01F12/24, А01F12/18. Молотильное устройство / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин, В.Б. Попов. – Заявка № 2016148099 от 07.12.2016; опубл. 04.05.2018, бюл. № 13.

203. Пат. № 2655749 РФ, МПК А01D41/12. Зерноуборочный комбайн / В.В. Никитин, В.Н. Ожерельев, А.М. Гринь, Н.В. Синяя. – Заявка № 20171107427 от 06.03.2017; опубл. 29.05.2018, бюл. № 16.

204. Пат. № 2658389 РФ, МПК А01D41/00, А01D41/02, А01D41/12. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2017110312 от 28.03.2017; опубл. 21.06.2018, бюл. № 18.

205. Пат. № 2672399 РФ, МПК А01D41/00, А01F12/20. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2018102067 от 18.01.2018; опубл. 14.11.2018, бюл. № 32.

206. Пат. № 2677349 РФ, МПК А01D41/00. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин. – Заявка № 2018106422 от 20.02.2018; опубл. 16.01.2019, бюл. № 2.

207. Пат. № 2685735 РФ, МПК А01D41/12. Зерноуборочный комбайн / В.Н. Ожерельев, Э.В. Жалнин, В.Д. Игнатов, В.Д. Сулеев, А.Е. Кузнецов, В.В. Никитин. – Заявка № 2018126059 от 13.07.2018; опубл. 23.04.2019, бюл. № 12.

208. Пат. № 2725729 РФ, МПК А01D41/12. Наклонная камера зерноуборочного комбайна / В.Н. Ожерельев, В.В. Никитин, Н.В. Синяя. – Заявка № 2019128610 от 11.09.2019; опубл. 03.07.2020, бюл. № 19.

209. Пат. № 2479979 РФ, МПК А01D 41/08. Очесывающее устройство / В.П. Колинко, Г.Р. Озонов, В.А. Сабашкин, С.И. Чемоданов, Н.Ф. Гриценко и др. – Заявка № 2011113794/13 от 08.04.2010; опубл. 27.04.2013, бюл. № 12.

210. Пат. № 2202165 РФ, МПК А01D41/00, А01D41/02, А01D41/12, А01F12/18. Зерноуборочный комбайн / А.Н. Цепляев, А.И. Ряднов, О.А. Федорова. – Заявка № 2000109659/13 от 17.04.2000; опубл. 20.04.2003, бюл. № 11.

211. Пат. № 2340159 РФ, МПК А01F12/18, А01F7/04. Молотильно-сепарирующий аппарат зерноуборочного комбайна / Н.Е. Руденко, С.П. Горбачев. – Заявка 2007113763/13 от 12.04.2007; опубл. 10.12.2008, бюл. № 34.

212. Пат. № 2382542 РФ, МПК А01D41/00, А01D41/02. Устройство предварительного обмолота зерна, преимущественно для семенных целей / А.И. Ряднов, С.В. Тронев, Р.В. Шарипов, И.П. Скворцов, О.А. Федорова. – Заявка № 2008140812/12 от 14.10.2008; опубл. 27.02.2010, бюл. № 6.

213. Пат. №2672330 РФ, МПК А01D41/08. Комбайн для уборки зерновых культур на корню / Н.В. Бышов, А.И. Ряднов, О.А. Федорова. – Заявка № 2018103843 от 31.01.2018; опубл. 13.11.2018, бюл. 32.

214. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. Т. 1. / Н.С. Пискунов. – М.: Наука, 1976. – 456 с.

215. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. Т. 2. / Н.С. Пискунов. – М.: Наука, 1978. – 576 с.
216. Плис, А.И. Mathcad 2000. Математический практикум для экономистов и инженеров / А.И. Плис, Н.А. Сливина. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 656 с.
217. Практикум по общей теории статистики / Под ред. М.Р. Ефимовой. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 364 с.
218. Производство сельхозтехники в январе-декабре 2018 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://agrovesti.net/lib/industries/engineering/proizvodstvo-selkhoztekhniki-v-yanvare-dekabre-2018-goda.html>, свободный (Дата обращения 30.10.2019).
219. Протокол приемочных испытаний № 11-26-13 (1060032) от 22 ноября 2013 г.
220. Посыпанов, Г.С. Растениеводство / Г.С. Посыпанов, В.Е. Долгодворов, Г.В. Посыпанов. – М.: Колос, 1997. – 448 с.
221. Повышение урожайности и качества зерна: монография / Под ред. В.Е. Торикова. – Брянск: Изд-во БГАУ, 2018. – 172 с.
222. Поливаев, О.И. Испытание сельскохозяйственной техники и энергосиловых установок / О.И. Поливаев, О.М. Костиков. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 280 с.
223. Подъемно-транспортные машины / Под ред. М.Н. Ерохина и С.П. Казанцева. – М.: КолосС, 2010. – 335 с.
224. Причины порчи зерна и семян при хранении / А.В. Гречкин и др. // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 70-й студенческой науч. конф. – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 73-77.
225. Пугачев, А.Н. Повреждение зерна машинами / А.Н. Пугачев. – М.: Колос, 1976. – 230 с.
226. Пугачев, А.Н. Контроль качества уборки зерновых культур / А.Н. Пугачев. – М.: Колос, 1980. – 255 с.

227. Пустыгин, М.А. Теория и технологический расчет молотильных устройств / М.А. Пустыгин. – М.: ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. – 96 с.

228. Пьянов, В.С. Методы повышения производства зерна в хозяйствах России интенсификацией работы парка зерноуборочных комбайнов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Пьянов Виктор Сергеевич. – Волгоград, 2017. – 39 с.

229. Родимцев, С.А. Обоснование рабочих органов молотильно-сепарирующего устройства комбайна для зернобобовых культур: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Родимцев Сергей Александрович. – Орел, 2001. – 223 с.

230. Родимцев, С.А. Селекционная молотилка для дифференциального обмолота / С.А. Родимцев, В.П. Пьяных, В.М. Дринча // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 5. – С. 15-17.

231. Ряднов, А.И. Агротехнические решения проблемы уборки зерновых колосовых культур по комплексному критерию эффективности в условиях недостаточного увлажнения (на примере Нижнего Поволжья): дис. ... д-ра с.-х. наук: 05.20.01 / Ряднов Алексей Иванович. – Волгоград, 1995. – 334 с.

232. Ряднов, А.И. Технология уборки зерновых культур с выделением ценных семян / А.И. Ряднов // Аграрная наука. – 2004. – №6. – С. 15.

233. Ряднов, А.И. Оптимизация конструкции распределительного шнека зерноуборочного комбайна / А.И. Ряднов, С.В. Тронев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2017. – № 2 (26). – С. 185-194.

234. Ряднов, А.И. Методология оптимизации рабочих органов зерноуборочных комбайнов / А.И. Ряднов, С.В. Тронев, И.П. Скворцов // Научное обозрение. – 2017. – № 21. – С. 44-48.

235. Рынок сельскохозяйственных машин [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://dcenter.hse.ru/data/2019/12/18/1523096077\\_Рынок\\_сельскохозяйственных\\_машин.pdf](https://dcenter.hse.ru/data/2019/12/18/1523096077_Рынок_сельскохозяйственных_машин.pdf), свободный (Дата обращения 30.10.2019).

236. Савин, В.Ю. Обоснование рациональных параметров и режимов работы прицепного очесывающего устройства для уборки зерновых культур:

дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Савин Владимир Юрьевич. – Воронеж, 2011. – 136 с.

237. Савин, В.Ю. Определение состава очесанного вороха при уборке пшеницы с использованием прицепного очесывающего устройства / В.Ю. Савин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 4 (51). – С. 96-99.

238. Савин, В.Ю. Зависимость степени дробления зерна пшеницы от частоты вращения очесывающего устройства / В.Ю. Савин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – № 3 (58). – С. 98-102.

239. Савин, В.Ю. Определение усилий, необходимых для очеса колоса пшеницы / В.Ю. Савин // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29. – № 3. – С. 456-466.

240. Семенов, В.А. Нетрадиционные способы уборки зерновых / В.А. Семенов, Е.И. Семенова // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2013. – № 14 (19). – С. 12-135.

241. Сельское хозяйство в России. 2019: Стат. сб. / Росстат. – М., 2019. – 91 с.

242. Серый, Г.Ф. Научные основы повышения пропускной способности зерноуборочных комбайнов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Серый Георгий Федорович. – М., 1977. – 362 с.

243. Серый, Г.Ф. Зерноуборочные комбайны / Г.Ф. Серый, Н.И. Косилов, Ю.Н. Ярмашев, А.И. Русанов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 248 с.

244. Скворцов, А.К. Разработка ресурсосберегающих технологий и средств механизации уборки зерновых культур на основе использования инерционно-очесных молотильных аппаратов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Скворцов Алексей Константинович. – Волгоград, 2005. – 357 с.

245. Скрипкин, Д.В. Совершенствование молотильно-сепарирующего устройства и технологии обмолота зерновых колосовых культур на корню:

дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Скрипкин Дмитрий Владимирович. – Волгоград, 2005. – 143 с.

246. Славкин, В.И. Обзор конструкций современных зерноуборочных комбайнов / В.И. Славкин, С.В. Белов, В.Н. Романенко, И.В. Горбачев // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 12. – С. 26-28.

247. Снижение потерь и механических повреждений зерна при уборке урожая: рекомендации / А.И. Завражнов и др. – Мичуринск: Мичуринский гос. аг-рар. ун-т, 2014. – 82 с.

248. Создание виртуальных приборов в среде LabVIEW: метод. указания к лаб. работам / Владим. гос. ун-т; сост. Н.Ю. Макарова. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 59 с.

249. Солнцев, В.Н. Агробиологические и технологические аспекты снижения потерь семян люцерны при уборке: монография / В.Н. Солнцев. – Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2013. – 123 с.

250. Справочник по специальным функциям: пер. с англ. / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

251. Сравнительные испытания сельскохозяйственной техники: науч. издание / Под ред. В.М. Пронина. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. – 416 с.

252. Стратегия машинно-технологического обеспечения производства продукции животноводства на период до 2020 года. – ГНУ ВНИИМЖ Рос-сельхозакадемии. – Подольск, 2009. – 85 с.

253. Тарасенко, А.П. Оптимальная влажность семян и уровень травмирования их при обмолоте / А.П. Тарасенко, В.И. Оробинский, А.М. Долматов // Зерновое хозяйство. – 1983. – № 6. – С. 29-30.

254. Тарасенко, А.П. Снижение травмирования семян при уборке и послеуборочной обработке / А.П. Тарасенко. – Воронеж: ФГОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2003. – 332с.

255. Тарасенко, А.П. Роторные зерноуборочные комбайны. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 192 с.

256. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. – М.: Высш. шк., 2002. – 416 с.
257. Теоретическое и экспериментальное обоснование технологий и технических средств обмолота сельскохозяйственных культур // Под ред. В.Е. Бердышева. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2012. – 224 с.
258. Технология уборки зерновых культур методом очесывания на корню: состояние и перспективы / А.М. Леженкин, В.И. Кравчук, А.С. Кушнарев. – Дослідницьке, 2010. – 400 с.
259. Титенок, А.В. Совершенствование средств механизации сельскохозяйственного производства в России / А.В. Титенок. – Брянск: Издательство БГСХА, 1999. – 202 с.
260. Ториков, В.Е. Хлеб из зерна Нечерноземья / В.Е. Ториков // Зерновые культуры. – 1991. – № 4. – С. 21.
261. Труфляк, Е.В. Современные зерноуборочные комбайны / Е.В. Труфляк, Е.И. Трубилин. – Краснодар: Кубанский ГАУ, 2013. – 320 с.
262. Тюрин, Ю.Н. Статистический анализ данных на компьютере / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров, под ред. В.Э. Фигурнова. – М.: ИНФРА, 1998. – 528 с.
263. Уборка урожая комбайнами «Дон» / М.К. Комарова. – Москва: Росагропромиздат, 1989. – 220 с.
264. Улучшение качества зернового вороха при уборке и послеуборочной обработке / А.П. Тарасенко и др. // Техника и оборудование для села. – 2009. – № 5. – С. 23-26.
265. Ульянова, Н.Д. Статистическая обработка данных в интегрированной системе STATISTICA 6.0: учебно-метод. пособие / Н.Д. Ульянова, А.В. Кубышкина. – Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2008. – 60 с.
266. Урожайность и качество сортов нового поколения хлебопекарной озимой пшеницы / В.Е. Ториков, О.В. Мельникова, В.В. Мамеев, А.А. Осипов, А.Н. Локтев, С.Н. Куликович // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3 (61). – С. 9-14.

267. Урожайность и качество зерна современных сортов озимой пшеницы на Юго-западе центрального региона России / В.Е. Торицов, О.В. Мельникова, Н.С. Шпилев, В.В. Мамеев, А.А. Осипов // Плодоводство и ягодоводство России. – 2017. – Т. 48. – № 1. – С. 260-267.

268. Устройство и подготовка к работе зерноуборочных комбайнов // Под. ред. В.Е. Бердышева. – Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2018. – 108 с.

269. Фадеев, С.В. Словарь сокращений современного русского языка: ок. 15000 сокращений / С.В. Фадеев. – Спб.: Политехника, 1997. – 527 с.

270. Фирсов, М.М. Отечественному сельскому хозяйству – технику нового поколения / М.М. Фирсов, А.Н. Крикунов, В.И. Анискин, Н.В. Краснощеков, Л.С. Орстик, А.А. Ежевский // Экономика сельского хозяйства России. – 2004. – № 7. – С. 10-13.

271. Федин, М.А. Определение потерь зерна за очесывающей жаткой с ротором, оснащенный гребенкой с тангенциальным каналом / М.А. Федин, О.Н. Кухарев, И.Н. Семов // Нива Поволжья. – 2017. – № 4 (45). – С. 175-181.

272. Федин, М.А. Снижение потерь зерна за очесывающей жаткой комбайна, разработкой и применением ротора, оснащенного гребенками с тангенциальными каналами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Федин Михаил Андреевич. – Пенза, 2018. – 173 с.

273. Федорова, О.А. Снижение повреждаемости зерна при уборке зерновых культур за счет предварительного обмолота хлебной массы дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Федорова Ольга Алексеевна. – Волгоград, 2003. – 168 с.

274. Федорова, О.А. Эффективные технические решения повышения качества уборки зерновых культур: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Федорова Ольга Алексеевна. – Рязань, 2018. – 322 с.

275. Федорова, О.А. Устройство предварительного обмолота зерна / О.А. Федорова, А.А. Пеньков // Научная мысль. – 2017. – № 3. – С. 69-70.

276. Шабанов, П.А. Механико-технологические основы обмолота зерновых культур на корню: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Шабанов Петр Антонович. – Мелитополь, 1988. – 336 с.



277. Шабанов, П.А. Обмолот на корню полеглых зерновых культур / П.А. Шабанов, Н.К. Самофалов, В.В. Масленников // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – № 8. – С. 11-12.

278. Шабанов, П.А. Обмолот на корню – дальнейшее развитие двухфазного способа обмолота зерновых культур / П.А. Шабанов, Н.П. Шабанов // Достижения науки и техники в АПК. – 2006. – № 8. – С. 8-10.

279. Шабанов, Н.П. Разработка и обоснование устройства для сепарации очесанного зернового вороха в наклонной камере зерноуборочного комбайна: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Шабанов Николай Петрович. – Симферополь, 1997. – 26 с.

280. Шрейдер, Ю.М. Повышение эффективности работы зерноуборочных комбайнов / Ю.М. Шрейдер, И.В. Горбачев // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 8. – С. 20-22.

281. ЩигOLEв, С.В. Определение нагрузок на колеса зерноуборочного комбайна, находящегося на поперечном склоне / С.В. ЩигOLEв, С.Г. Ломакин // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный аграрный университет имени В.П. Горячкина». – 2017. – № 3 (79). – С. 24-30.

282. ЩигOLEв, С.В. Влияние деформации шин на поперечную статическую устойчивость зерноуборочного комбайна / С.В. ЩигOLEв, С.Г. Ломакин // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный аграрный университет имени В.П. Горячкина». – 2017. – № 5 (81). – С. 22-28.

283. Халанский, В.М. Сельскохозяйственные машины / В.М. Халанский, И.В. Горбачев. – М.: КолосС, 2003. – 624 с.

284. Халанский, В.М. Сельскохозяйственные машины / В.М. Халанский, И.В. Горбачев. – Санкт-Петербург: Квадро, 2014. – 624 с.

285. Червяков, И.В. Совершенствование процесса уборки зерновых культур комбайновым очесом: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Червяков Иван Владимирович. – Ростов-на-Дону, 2020. – 22 с.

286. Чудаков, Д.А. Основы теории расчета трактора и автомобиля / Д.А. Чудаков. – М.: Колос, 1972. – 384 с.
287. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Ч. 1. Статика. Кинематика. / А.А. Яблонский, В.М. Никифоров. – М.: Высш. шк., 1984. – 343 с.
288. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Ч. 2. Динамика / А.А. Яблонский, В.М. Никифоров. – М.: Высш. шк., 1984. – 423 с.
289. Ягельский, М.Ю. Исследование энергии разрушения стеблей растений сельскохозяйственных культур / М.Ю. Ягельский, С.А. Родимцев // Техника в сельском хозяйстве. – 2014. – № 5. – С. 21-23.
290. Яковлев, В.Б. Статистика. Расчеты в Microsoft Excel / В.Б. Яковлев. – М.: КолосС, 2005. – 352 с.
291. Яровые зерновые культуры: биология и технологии возделывания: монография / Под ред. Н.М. Белоуса. – Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2010. – 122 с.
292. Cherkasov, Yu. Differentiation of the sea-sonal loading of combine harvester depending on its technical readiness / Yu. Cherkasov, S. Shepelev, V. Shepelev // Procedia Engineering. – 2015. – No. 129. – P. 161-165.
293. Chuksin, P. Using value-engineering analysis + triz method for improving the stripping grain-harvesting machine/ P. Chuksin, A. Skuratovich, N. Shpakovsky // Minsk, Belarus. – 2001. – P. 12.
294. Fu, J. Review of grain threshing theory and technology / J. Fu, Zh. Chen, L. Han, L. Ren // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2018. – Vol. 11, Issue3. – P. 12-20.
295. Khodayari, A. On the thermo-flow behavior in a rectangular channel with skewed circular ribs / A. Khodayari, A. Babil, S. Razavi // Mechanics & Industry. – 2017. – No 18 (2). – P. 225-230.
296. Klinner, W.E. A new stripping header for combine harvesters. / W.E. Klinner, M.A. Neale, R.E. Arnold // Agricultural Engineer. – 1987. – No. 42 (1). – P. 9-14.

297. Kukharev, O.N. The technical solution for a laminated coating on a rounded surfaces / O.N. Kukharev, I.N. Semov E.G. Rylyakin // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – Т. 8. – No 9. – P. 481-484.

298. Kukharev, O.N. The technology of obtaining high-quality seeds of sugar beet / O.N. Kukharev, A.V. Polikanov, I.N. Semov // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. – 2017. – Т. 8. – No 1. – P. 1210-1213.

299. LabVIEW [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.labview.ru>. (Дата обращения 30.10.2019).

300. Ozherelyev, V.N. 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.

301. Patent EP 2203761. Crop harvesting apparatus and methods / Wilfred Erwin Klinner // Applicant and patent holder British Technology Group Limited. – № EP 19870303048; declared 09.04.1986; published 14.10.1987.

302. Patent US 5519989. Crop stripping apparatus / Keith H. Shelbourne, Paul J. McCredie // Applicant and patent holder Shelbourne Reynolds Engineering Ltd. – № US 19969325088; declared 19.05.1995; published 28.05.1996.

303. Patent US 4951451. Crop apparatus and method for harvesting crops by stripping / Wilfred E. Klinner; Klinner Wilfred E. // Applicant and patent holder. – № US 19887315083; declared 05.02.1987; published 28.08.1988.

304. Patent US 3448566. Threshing machines / Cornelis Van der Lely; declared 01.20.1966; published 10.06.1969.

305. Shelbourne Reynolds [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.techsystems.kft.com/shelbourne>. (Дата обращения 30.10.2019).

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение А

Копии дипломов агропромышленной выставки «Золотая осень»

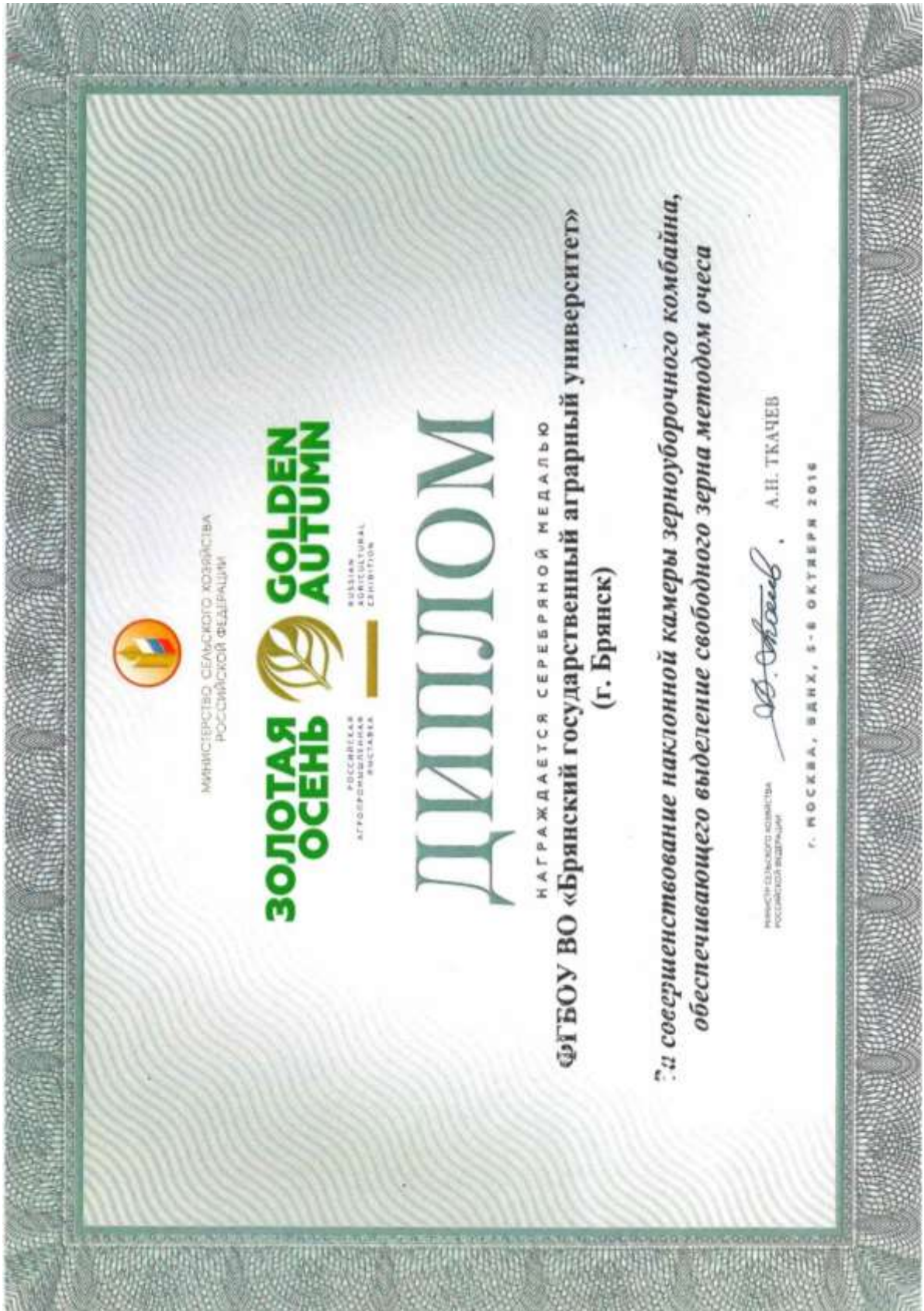


Рисунок А1 – Копия диплома к серебряной медали агропромышленной выставки «Золотая осень-2016»



Рисунок А2 – Копия диплома к серебряной медали агропромышленной выставки «Золотая осень-2018»

## Приложение Б

## Копии актов о внедрении научных исследований



# БРЯНСКсельмаш

Закрытое акционерное общество совместное предприятие «Брянсксельмаш»

Юр. адрес: 241020, РФ, г. Брянск, пр-т Московский, 86	ИНН 3254003201, КПП 325701001
Почт. адрес: 241004, РФ, г. Брянск, пер. Новозыбковский, стр. 4	р/счет 407028100005000000030
тел.: +7(4832) 74-77-07	р/счет 40702810503500000113
факс: +7(4832) 75-75-30	к/счет 30101810300000000600
info@bryanskseilmash.ru	ПАО «МинБанк», г. Москва
www.bryanskseilmash.ru	БИК 044525600 ОГРН 1053260546756

От \_\_\_\_\_ 2020г. исх. № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### Акт внедрения

Выдан к.т.н., доценту кафедры «Технический сервис» ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет» Никитину Виктору Васильевичу о том, что результаты его научных исследований и предлагаемые технические решения, направленные на реализацию поперечного колебательного воздействия на зерновки в колосе при обмолоте и предварительную сепарацию свободного зерна, полученного при очесе растений на корню, в наклонной камере зерноуборочного комбайна, обладают актуальностью и научной новизной. Они представляют практический интерес для ЗАО СП «Брянсксельмаш» и будут учтены конструкторским подразделением предприятия при разработке новой техники и адаптации выпускаемых серийно зерноуборочных комбайнов к работе с очесывающими адаптерами.

Главный инженер –  
Зам. генерального директора  
по производству  
ЗАО СП «Брянсксельмаш»

А.С. Шилин



Система менеджмента качества  
соответствует требованиям ИСО 9001-2015

Рисунок Б1 – Копия акта о внедрении научных исследований в ЗАО СП «Брянсксельмаш»



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАО «ПЕНЗМАШ»

440052, г. Пенза, ул. Баумана, 30

E-mail: penzmash@yandex.ru

[www.penzmash.ru](http://www.penzmash.ru)

АКТ

внедрения результатов научных исследований  
к.т.н., доцента Никитина Виктора Васильевича

Настоящим подтверждаем, что результаты научных исследований, представленные к.т.н., доцентом кафедры «Технический сервис» ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет» Никитиным Виктором Васильевичем, направленные на реализацию предварительной сепарации свободного зерна, полученного при очесе растений на корню, в наклонной камере зерноуборочного комбайна, обладают актуальностью и научной новизной.

Разработанные рекомендации по совершенствованию конструкции наклонной камеры зерноуборочного комбайна «Нива-Эффект» и обоснованию технологических параметров могут быть использованы в производстве нашим заводом.

Заместитель технического директора  
ПАО «Пензмаш» по развитию новых  
направлений, к.т.н.



М.А. Федин

Главный конструктор ПАО «Пензмаш»

П.П. Ильин

Рисунок Б2 – Копия акта о внедрении научных исследований в ПАО  
«Пензмаш»





**ДЕПАРТАМЕНТ  
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ**  
241050, г. Брянск, пр-кт Ленина, д. 37,  
тел./факс: (4832) 74-62-65  
e-mail: selcom@bk.ru  
ИНН/КПП 3234014082/325701001  
ОКПО 00099056, ОГРН 1023242735268

*25.02.19 № 01-1053*

**В диссертационный совет  
Д 220.010.04,**  
созданный на базе ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
аграрный университет им. Петра I»

Департамент сельского хозяйства Брянской области подтверждает, что для получения качественного продовольственного зерна сельскохозяйственными предприятиями области внедрена технология уборки методом очесывания растений на корню с предварительным выделением свободного зерна в наклонной камере зерноуборочного комбайна, разработанная кандидатом технических наук, доцентом Брянского государственного аграрного университета Никитиным Виктором Васильевичем.

Использование модернизированной наклонной камеры зерноуборочного комбайна при очесе растений на корню позволяет получать высококачественное товарное зерно при минимальном его дроблении рабочими органами молотилки.

Учитывая важность проблемы получения качественного товарного зерна и его сохранности в послеуборочный период, считаем необходимым дальнейшее внедрение в производство результатов научных исследований по вопросам совершенствования технологии уборки зерновых культур методом очеса растений на корню, опубликованные кандидатом технических наук, доцентом Никитиным В.В. в различных научных изданиях, включая патенты, приведенные в его диссертационной работе.

Заместитель директора  
департамента сельского хозяйства  
Брянской области



*[Signature]*  
В.В. Ториков

ДЕПАРТАМЕНТ  
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ  
241050, г.Брянск, пр-т Ленина,37

Рисунок БЗ – Копия акта о внедрении научных исследований в Брянской области

## Приложение В

Копия акта о внедрении научных исследований в учебный процесс  
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ

МИНСЕЛЬХОЗ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
"Брянский государственный аграрный университет"  
(ФГБОУ ВО Брянский ГАУ)  
ул. Советская 2-а, с. Кошино, р-н Выгоничский, обл. Брянская, 243365  
Тел.: (48341) 24-721 Факс: (48341) 24-721 E-mail: bgsha@bgsha.com

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ

д. с. – х. н., профессор

Г. П. Малявко

«24» августа 2020 г.



## АКТ

внедрения результатов научных исследований в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, директор инженерно-технологического института ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, д.т.н., профессор Купреенко Алексей Иванович и заведующий кафедрой ТСвАБПиДС, к.э.н., доцент Гринь Александр Михайлович составили настоящий акт о том, что результаты научных исследований к.т.н., доцента кафедры «Технический сервис» Никитина Виктора Васильевича на тему: «Совершенствование технологической схемы зерноуборочного комбайна и параметров его рабочих органов» используются в учебном процессе при обучении бакалавров и магистрантов по направлению подготовки «Агроинженерия» в инженерно-технологическом институте Брянского ГАУ.

Директор ИТИ,  
д.т.н., профессор

А.И. Купреенко

Зав. кафедрой ТСвАБПиДС,  
к.э.н., доцент

А.М. Гринь

Рисунок В1 – Копия акта о внедрении научных исследований в учебный процесс ФГБОУ ВО Брянский ГАУ

## Приложение Г

## Теоретические исследования качения полного и обрезанного цилиндра по наклонной поверхности

Mathcad - [время обрез цилиндр с начала]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

$$\beta := \frac{\pi}{(180 + 41.08)} = 0.717 \quad R := \frac{1.95}{10^3} \quad \alpha := \frac{\pi}{(180 + 40)} = 0.698$$

$$\mu := \tan(\alpha) = 0.839 \quad \alpha_2 := \text{atan}(3 \cdot \mu) \cdot \frac{180}{\pi} = 68.334 \quad g := 9.81$$

**1 этап - вращение вокруг угловой точки А**

$$M_1 := \frac{2}{3} \cdot \sin(\beta)^3 = 0.189 \quad M_2 := \pi - \beta + \cos(\beta) \cdot \sin(\beta) = 2.92$$

$$M_3 := 3 \cdot (\pi - \beta) + \cos(\beta) \cdot \sin(\beta) \cdot (3 + 2 \cdot \sin(\beta)^2) = 9.188$$

$$M_4 := \frac{(\pi - \beta + \cos(\beta) \cdot \sin(\beta)) \cdot \sin(\alpha)}{\frac{3 \cdot (\pi - \beta)}{2} + \cos(\beta) \cdot \sin(\beta) \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \sin(\beta)^2 + \frac{1}{2} \cdot \cos(\beta)^2\right)} = 0.436$$

$$M_5 := \sqrt{\frac{M_1}{M_3} \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \beta)) + \frac{M_2}{M_3} \cdot (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha))} = 0.295$$

Нажмите F1 для справки. АВТО NUM Страница 1

Рисунок Г1 – Скриншот рабочего окна программы «Mathcad» при исследовании качения полного и обрезанного цилиндра по наклонной поверхности

Mathcad - [время обрез цилиндр с начала]

Файл Плавка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

$$f(\varphi) := \frac{1}{\sqrt{\frac{M_1}{M_3} \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \varphi)) + \frac{M_2}{M_3} \cdot (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha - \beta + \varphi))}}$$

$$a_2 := \int_0^\beta f(\varphi) d\varphi \rightarrow 10.360470539685549798$$

$$t_{21} := \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot a_2 = 0.034 \quad \text{время 1 этапа}$$

$$\omega_2 := 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_3} \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \beta)) + \frac{M_2}{M_3} \cdot (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha))} = 41.812 \quad \text{угловая скорость к концу 1 этапа}$$

**1 этап - энергетический баланс**

$$h_2 := \frac{5.331}{10 \cdot 10^3} = 5.331 \times 10^{-4} \quad \text{высота центров} \quad \frac{m}{m_w} := \frac{40}{10^6} \quad \text{масса}$$

$$S_w := (\pi - \beta + \cos(\beta) \cdot \sin(\beta)) \cdot R^2 = 1.11 \times 10^{-5} \quad \text{площадь обрезанного цилиндра}$$

Нажмите F1 для справки. АВТО NUM Страница 1

Mathcad - [время обреза цилиндр с начала]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

$\rho := \frac{m}{S} = 3.603$  поверхностная плотность

---

$J_2 := \frac{\rho \cdot R^4}{2} \left[ 3 \cdot (\pi - \beta) + \cos(\beta) \cdot \sin(\beta) \cdot (3 + 2 \cdot \sin(\beta)^2) \right] = 2.393 \times 10^{-10}$  момент инерции при вращении вокруг точки А

$\omega_2 := \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot h_2}{J_2}} = 41.814$  угловая скорость к концу 1 этапа

$\omega_0 := 0$  начальное условие

$t_2 := \frac{(\beta)}{\left( \frac{\omega_0 + \omega_2}{2} \right)} = 0.034$  время 1 этапа

**2 этап - качение цилиндра по дуге**

$a_3 := 4 \cdot \frac{\sqrt{(M_5)^2 + M_4 \cdot (\pi - \beta)} - M_5}{M_4} = 7.111$

$t_3 := \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \cdot a_3 = 0.05$  время 2 этапа

Нажмите F1 для справки. АВТО NUM Страница 1

Mathcad - [время обрез цилиндр с начала]

Файл Плавка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

$$\omega_3 := 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R} \cdot \sqrt{(M_5)^2 + M_4 \cdot (\pi - \beta)}} = 151.665 \quad \text{угловая скорость к концу 2 этапа}$$


---

**энергетический баланс**

$$h_3 := \frac{60.782}{10 \cdot 10^3} = 6.078 \times 10^{-3} \quad \text{высота центров}$$

$$J_1 := \frac{\rho \cdot R^4}{2} \cdot \left[ \pi - \beta + \cos(\beta) \cdot \sin(\beta) \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot \sin(\beta)^2 + \cos(\beta)^2 \right) \right] = 7.234 \times 10^{-11} \quad \text{момент инерции при качении обрезанного цилиндра}$$

$$\omega_{31} := \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot h_3}{m \cdot R^2 + J_1}} = 145.788$$

$$\omega_3 := \sqrt{[(\omega_2)^2 + (\omega_{31})^2]} = 151.665 \quad \text{угловая скорость к концу 2 этапа}$$

$$t_3 := \frac{2 \cdot (2 \cdot \pi - 2 \cdot \beta)}{\omega_2 + \omega_3} = 0.05 \quad \text{время 2 этапа}$$

**3 этап - вращение вокруг угловой точки A1**

Нажмите F1 для справки. АВТО NUM Страница 1

Mathcad - [время обреза цилиндр с начала]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

**3 этап - вращение вокруг угловой точки A1**

$$t_4 := \frac{\beta}{\omega_3} = 4.727 \times 10^{-3} \quad \text{время 3 этапа}$$

$$\omega_4 := 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{(M_5)^2 + M_4 \cdot (\pi - \beta) + \frac{M_2}{M_3} \cdot (\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \beta)) + \frac{M_1}{M_3} \cdot (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha))} = 164.337 \quad \text{угловая скорость к концу 3 этапа}$$


---

**энергетический баланс**

$$h_4 := \frac{12.209}{10 \cdot 10^3} = 1.221 \times 10^{-3} \quad \text{высота центров}$$

$$\omega_{41} := \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot h_4}{J_2}} = 63.279$$

$$\omega_4 := \sqrt{(\omega_3)^2 + (\omega_{41})^2} = 164.337 \quad \text{угловая скорость к концу 3 этапа}$$

$$t_4 := \frac{(\beta)}{\left(\frac{\omega_3 + \omega_4}{2}\right)} = 4.538 \times 10^{-3} \quad \text{время 3 этапа}$$

Нажмите F1 для справки. АВТО NUM Страница 1

Mathcad - [время обреза цилиндра с начала]

Файл Плавка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

$$t_4 := \frac{\beta}{\omega_4} = 4.363 \times 10^{-3} \quad \text{время 3 этапа}$$

$$t := t_2 + (t_3) + (t_4) = 0.089$$

$$\frac{0.089}{0.076} = 1.171$$


---

**Проверка для цилиндра**

$$J_0 := \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2 = 7.605 \times 10^{-11} \quad \text{момент инерции для цилиндра}$$

$$\omega_5 := 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{R}} \cdot \sqrt{\left[ \frac{(2 \cdot \pi \cdot \sin(\alpha))}{3} \right]} = 164.593 \quad \text{угловая скорость}$$

$$t_{\omega} := \sqrt{\frac{6 \cdot \pi}{\sin(\alpha)}} \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} = 0.076 \quad \text{время 1 оборота}$$

Нажмите F1 для справки. АВТО NUM Страница 1



Mathcad - [время обреза цилиндр с начала]

Файл Плавка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

### Энергетический баланс

$$h := \frac{78.75}{10 \cdot 10^3} = 7.875 \times 10^{-3} \quad \text{высота центров}$$

$$\omega_5 := \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot h}{m \cdot R^2 + J_0}} = 164.587 \quad \text{угловая скорость}$$

$$\omega_5 := \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot h}{3 \cdot R^2}} = 164.587 \quad \text{угловая скорость}$$


---


$$t := \sqrt{\frac{3 \cdot (h)}{g \cdot \sin(\alpha)^2}} = 0.076$$

$$\omega_0 := 0 \quad \text{начальное условие}$$

$$t_w := \frac{(2 \cdot \pi)}{\left(\frac{\omega_0 + \omega_5}{2}\right)} = 0.076$$

Нажмите F1 для справки. АВТО NUM Страница 1

## Приложение Д

## Копия протокола испытаний зерен пшеницы

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Брянский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО «Брянский ГАУ»)

**ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ БРЯНСКОГО ГАУ**  
243365 Россия, с. Козино, Выгоничский р-он, Брянская обл., тел. (4833)41-24-374, тел/факс (4833)41-24-721

**ПРОТОКОЛ № 96**

от 17 октября 2017г.

Лист 1 из 1

1. Заказчик: к.т.н., доцент кафедры технического сервиса Никитин В.В.
2. Место отбора пробы: отобрано заказчиком
3. Характеристика пробы: зерно пшеницы.
4. Дата поступления образца: 11.10.2017г.
5. Приборы и оборудование: Анализатор инфракрасный ИнфраЛИОМ ФТ – 12 с программным обеспечением «СпектраЛИОМ/Про». Заводской номер 53237-13, свидетельство о поверке №446684, поверен до 18.05.2018г. Весы лабораторные DL – 1200, заводской номер 92, свидетельство о поверке № 439637, поверен до 14.03.2018г.
6. Нормативные документы: М 04-43-2006

## Результаты испытаний

Номер пробы	Влажность, %	Масса 1000 зерен, грамм.
1	13,02	44,49

Заведующая лабораторией



Е.А. Кротова

Протокол не может быть воспроизведен полностью или частично без письменного разрешения ИЛ  
Результаты испытаний распространяются только на данные пробы

## Приложение Е

## Определение теоретических частот распределения длины колоса

Параметр распределения Вейбулла  $b_B$  находим по приложению 5 [57] по известному коэффициенту вариации. Из этого же приложения находим необходимые для дальнейшего расчета коэффициенты  $K_b$  и  $C_b$ . Так при коэффициенте вариации для колоса  $V=40,85\%$  указанные величины будут равны:  $b_B=2,60$ ;  $K_b=0,89$  и  $C_b=0,37$ .

Параметр распределения Вейбулла  $a_B$  необходимо вычислить по следующему уравнению

$$a_B = \frac{\sigma}{C_b}. \quad (1)$$

Построим теоретическую и эмпирическую кривые распределения. Для этого данные эксперимента обработаем по методике В.Е. Гмурмана [57]. Для наглядности расчетов составим таблицу Е.1.

Дифференциальную функцию определяют по приложению 6 [57], используя для этого следующее выражение

$$f(l_{кол}) = \frac{A}{a_B} \cdot f\left(\frac{l_{ci} - C}{a_B}\right), \quad (2)$$

где  $A$  – длина интервала статистического ряда, мм;

$l_{ci}$  – середина интервала статистического ряда, мм;

$C$  – смещение рассеивания, мм.

Величина смещения рассеивания может быть найдена как

$$C = l_{n1} - 0,5 \cdot A, \quad (2)$$

где  $l_{n1}$  – начало первого интервала статистического ряда, мм;

$A$  – длина интервала, мм.

Интегральная функция распределения Вейбулла имеет вид

$$F(l_{кол}) = F\left(\frac{l_{ki} - C}{a_B}\right), \quad (4)$$

где  $l_{ki}$  – значение конца  $i$ -го интервала статистического ряда, мм.

Тогда, теоретическая частота  $i$ -го интервала  $n_{mi}$  (число колосков в  $i$ -м интервале, если предположить что их длина подчиняется закону распределения Вейбулла) может быть вычислена как

$$n_{mi} = f(l_{кол}) \cdot N_{кол}. \quad (5)$$

Результаты расчетов формул (1-5) представим в виде таблицы Е1.

Таблица Е1 – Результаты расчетов для длины колоса

№ интервала	Интервал, мм	Середина $i$ -го интервала $l_{ci}$ , мм	Эмпирическая частота $i$ -го интервала $n_i$	$f(l_{кол})$	$F(l_{кол})$	Теоретическая частота $i$ -го интервала $n_{mi}$
1	10-30	20	155	0,146	0,146	149
2	30-50	40	317	0,304	0,450	309
3	50-70	60	304	0,311	0,761	318
4	70-90	80	167	0,175	0,936	178
5	90-110	100	69	0,054	0,990	56
6	110-130	120	7	0,009	0,999	9
7	130-150	140	1	0,001	1,000	1
Сумма			1020			1020

Выполним проверку гипотезы о том, что данные наблюдений подчиняются закону распределения Вейбулла. Для этого воспользуемся методикой В.Е. Гмурмана [57]. Для этого необходимо вычислить  $\chi^2_{набл}$  и составить расчетную таблицу Е2. Внесем в нее параметры, полученные в предыдущей таблице Е.1. К этим параметрам относится эмпирическая  $n_i$  и теоретическая  $n_{mi}$  частоты  $i$ -го интервала.

Таблица Е2 – Результаты расчетов

№ инт-ла	$n_i$	$n_{mi}$	$n_i - n_{mi}$	$(n_i - n_{mi})^2$	$(n_i - n_{mi})^2 / n_{mi}$	$n_i^2$	$n_i^2 / n_{mi}$
1	155	149	6	36	0,24	24025	161,24
2	317	309	8	64	0,21	100489	325,21
3	304	318	-14	196	0,62	92416	290,62
4	167	178	-11	121	0,68	27889	156,68
5	69	56	13	169	3,02	4761	85,02
6	7	9	-2	4	0,44	49	5,44
7	1	1	0	0	0,00	1	1,00
Сумма	1020	1020			$\chi^2_{набл} = 5,21$		1025,21

Критерий согласия  $\chi^2_{набл}$  имеет следующий вид [57]

$$\chi^2_{набл} = \sum \left( \frac{n_i^2}{n_{mi}} \right) - N_{кол} = 1025,21 - 1020 = 5,21. \quad (6)$$

По таблице критических точек распределения  $\chi^2$  [57], при уровне значимости  $\alpha=0,05$  и числу степеней свободы  $k=i-3=7-3=4$  находим  $\chi^2_{кр}(0,05; 4) = 9,5$ .

Поскольку фактическое (расчетное) значение критерия Пирсона меньше его табличной величины  $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$  ( $5,21 < 9,5$ ), то расхождение эмпирических и теоретических частот незначимо. Следовательно, данные наблюдений согласуются с гипотезой о том, что распределение величины длины колоса происходит по закону Вейбулла.

## Приложение Ж

## Исследование количества невыделенных зерен по длине колоса

Mathcad - [1]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

$$N(L) := 39.499 \cdot e^{-0.032 \cdot L}$$

$$\int N(L) dL \rightarrow -1234.34375 \cdot e^{-0.032 \cdot L}$$

$$\int_0^{100} 39.499 \cdot e^{-0.032 \cdot L} dL \rightarrow 1184.029$$

$$1184.029 \cdot 0.70 = 828.82$$

$$\int_0^b N(L) dL \rightarrow \int_0^b 39.499 \cdot e^{-0.032 \cdot L} dL \rightarrow -1234.34375 \cdot e^{-0.032 \cdot b} + 1234.34375$$

$$-1234.34375 \cdot e^{-0.032 \cdot b} + 1234.34375 = 828.82 \text{ solve } b \rightarrow 34.785$$

Проверка  $b := 34.785$

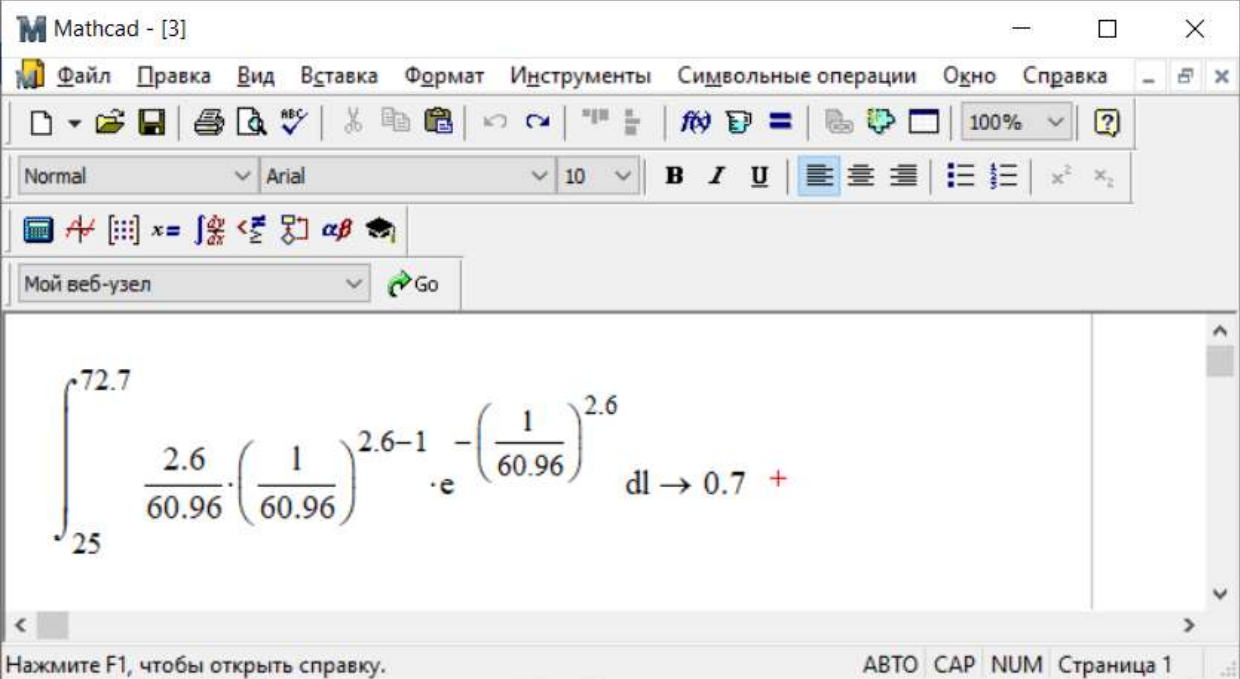
$$\int_0^b N(L) dL \rightarrow 828.82$$

Для получения справки нажмите клавишу F1 АВТО CAP NUM Страница 1

Рисунок Ж1 – Скриншот рабочего окна программы «Mathcad» при исследовании количества невыделенных зерен по длине колоса

## Приложение 3

## Исследование длины колоса



The screenshot shows the Mathcad software interface. The title bar reads "Mathcad - [3]". The menu bar includes "Файл", "Правка", "Вид", "Вставка", "Формат", "Инструменты", "Символьные операции", "Окно", and "Справка". The toolbar contains various icons for file operations, editing, and mathematical functions. The main workspace displays the following integral equation:

$$\int_{25}^{72.7} \frac{2.6}{60.96} \cdot \left(\frac{1}{60.96}\right)^{2.6-1} \cdot e^{-\left(\frac{1}{60.96}\right)^{2.6}} dl \rightarrow 0.7 +$$

The status bar at the bottom indicates "Нажмите F1, чтобы открыть справку." (Press F1 to open help.) and "АВТО САР NUM Страница 1".

Рисунок 31 – Скриншот рабочего окна программы «Mathcad» при исследовании длины колоса

## Приложение И

## Исследование длины стебля пшеницы

Mathcad - [2]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

$$N(L) := 754.6 \cdot e^{-0.0101 \cdot L}$$

$$\int N(L) dL \rightarrow -74712.8713 \cdot e^{-0.0101 \cdot L}$$

$$\int_{15}^{480} 754.6 \cdot e^{-0.0101 \cdot L} dL \rightarrow 63623.526$$

$$63623.526 \cdot 0.70 = 44536.468$$

$$\int_{15}^b N(L) dL \rightarrow \int_{15}^b 754.6 \cdot e^{-0.0101 \cdot L} dL \rightarrow -74712.8713 \cdot e^{-0.0101 \cdot b} + 64209.5776$$

$$-74712.8713 \cdot e^{-0.0101 \cdot b} + 64209.5776 = 44536.468 \text{ solve } b \rightarrow 132.11878$$

Проверка  $b := 132.11878$

$$\int_{15}^b N(L) dL \rightarrow 44536.468$$

Нажмите F1, чтобы открыть справку. АВТО САР NUM Страница 1

Рисунок И1 – Скриншот рабочего окна программы «Mathcad» при определении длины стебля пшеницы



## Приложение К

Регрессионный анализ исследования выделения зерна из колоса от количества нагружения связей и зазора в молотильной камере

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

МОЛОТИЛКА						
Вывод итогов						
Регрессионная статистика						
Множественный R	0,984244853					
R-квадрат	0,96873793					
Нормированный R-квад	0,964474921					
Стандартная ошибка	1,970448549					
Наблюдения	26					
Дисперсионный анализ						
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>	
Регрессия	3	2646,923922	882,3079741	227,242734	1,06268E-16	
Остаток	22	85,41868462	3,882667483			
Итого	25	2732,342607				
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	152,7902492	7,355509518	20,77221826	6,02743E-16	137,5358561	168,0446422
X1	-24,95283838	2,540691082	-9,82127995	1,67427E-09	-30,22190919	-19,68376757
X2	3,420888889	0,143901216	23,77248079	3,49906E-17	3,122456033	3,719321745
X1^2	1,710291246	0,206567479	8,279576498	3,32199E-08	1,281896514	2,138685978

Рисунок К1 – Скриншот рабочего окна программы «Excel» при исследовании количества выделенных зерен от количества нагружения связей и зазора в молотильной камере

Значимость полученного уравнения регрессии проверяли по критерию Фишера, определяемому согласно зависимости

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2} \leq F_{табл},$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности (остаточная дисперсия), определяемая по формуле

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-C} \cdot \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_n - \hat{Y}_n)^2 \leq F_{табл},$$

где  $N$  – число опытов;

$m$  – количество повторностей;

$C$  – количество значимых коэффициентов регрессии;

$\bar{Y}_n$  – среднееарифметическое значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_n$  – расчетное значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$F_{табл}$  – табличное значение критерия Фишера под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости  $\alpha$ ;

$S^2$  – дисперсия воспроизводимости (общая дисперсия):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_n^2}{N},$$

где  $S_n^2$  – построчная дисперсия параметра оптимизации;

$i$  – номер повторности опыта;

$N$  – число опытов.

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{Y}_{on} - \hat{Y}_{on})^2}{m-1},$$

где  $\bar{Y}_{on}$  – среднееарифметическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_{on}$  – фактическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$m$  – количество повторностей в опыте.

Если неравенство соблюдается, то полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс, причем расчетное значение критерия Фишера устанавливается в зависимости от числа степеней свободы ( $\gamma_1 = (m-1) \cdot N$  и  $\gamma_2 = N-C$ ).

По результатам обработки получены следующие исходные данные:

$N=26$ ;  $m=3$ ;  $C=4$ ;  $S_{ad}^2 = 11,65$ ;  $\gamma_1 = (3-1) \cdot 26 = 52$ ;  $\gamma_2 = N-C = 26-4 = 22$ ;  $S^2 = 13,83$ .

Тогда расчетное значение критерия Фишера составит

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2} = \frac{11,65}{13,83} = 0,84.$$

Табличный критерий Фишера равен  $F_{табл}(0,05; 22; 52)=1,75$ .

Поскольку  $F_{расч} < F_{табл}$ , то полученное уравнение регрессии является значимым.

Таблица К1 – Результаты исследований и обработки данных при выделении зерна из колоса от количества нагружения связей и зазора в молотильной камере

X1	X2	№ повторности			Уср	Дисперсия	Y(формула)	Разница	Квадрат разницы
		1	2	3					
4	1	86,2	76,7	83,5	82,13	23,96	83,76	-1,63	2,66
4	2	92,6	83,3	87,9	87,93	21,62	87,19	0,75	0,56
4	3	94,9	86,8	92,4	91,37	17,20	90,61	0,76	0,58
4	4	98,8	90,3	94,6	94,57	18,06	94,03	0,54	0,29
4	5	100	97,3	96,4	97,90	3,51	97,45	0,45	0,20
4	6	100	100	100	100,00	0,00	100,87	-0,87	0,75
6	1	73,6	62,2	68,3	68,03	32,54	68,06	-0,03	0,00
6	2	74,7	63,8	70,9	69,80	30,61	71,49	-1,69	2,84
6	3	78,4	68,2	73,5	73,37	26,02	74,91	-1,54	2,37
6	4	80,3	71,6	76,2	76,03	18,94	78,33	-2,29	5,26
6	5	84,8	76,1	84,3	81,73	23,86	81,75	-0,01	0,00
6	6	88,4	79,8	86,1	84,77	19,82	85,17	-0,40	0,16
6	7	92,5	82,1	88,2	87,60	27,31	88,59	-0,99	0,98
6	8	97,2	90,2	95,8	94,40	13,72	92,01	2,39	5,71
6	9	100	100	100	100,00	0,00	95,43	4,57	20,87
8	1	71,7	66,5	69,3	69,17	6,77	66,05	3,12	9,73
8	2	72,6	66,2	70,1	69,63	10,40	69,47	0,17	0,03
8	3	77,1	71,9	74,5	74,50	6,76	72,89	1,61	2,60
8	4	78,9	73,2	76,3	76,13	8,14	76,31	-0,18	0,03
8	5	85,1	78,9	82,3	82,10	9,64	79,73	2,37	5,61
8	6	85,4	79,8	83,4	82,87	8,05	83,15	-0,28	0,08
8	7	87,6	81,2	84,6	84,47	10,25	86,57	-2,11	4,43
8	8	89,9	82,9	86,8	86,53	12,30	89,99	-3,46	11,97
8	9	93,4	88,4	91,3	91,03	6,30	93,41	-2,38	5,67
8	10	100	96,2	98,5	98,23	3,66	96,84	1,40	1,96
8	11	100	100	100	100,00	0,00	100,26	-0,26	0,07
<b>Дисперсия воспроизводимости</b>						<b>13,83</b>	<b>Дисперсия адекватности</b>		<b>11,65</b>

## Приложение Л

Регрессионный анализ исследования выделения зерна из колоса от количества нагружения связей и угла наклона рифов

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

Регрессионная статистика						
Множественный R		0,913181225				
R-квадрат		0,833899949				
Нормированный R-квад		0,816103515				
Стандартная ошибка		3,472814963				
Наблюдения		32				

Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	Значимость F	
Регрессия	3	1695,373929	565,1246429	46,85769892	4,84699E-11	
Остаток	28	337,6924255	12,06044377			
Итого	31	2033,066354				

	Коэффициенты	стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%
Y-пересечение	78,5541455	1,776042341	44,2298833	1,86692E-27	74,91608768	82,19220332
X1	0,257583256	0,104190267	2,472239145	0,019768514	0,04415917	0,471007343
X2	3,699826026	0,327120945	11,31026943	5,94087E-12	3,029749146	4,369902907
X1^2	-0,006274215	0,001635011	-3,837414935	0,000648698	-0,009623382	-0,002925047

Рисунок Л1 – Скриншот рабочего окна программы «Excel» при исследовании количества выделенных зерен от количества нагружения связей и угла наклона рифов

Значимость полученного уравнения регрессии проверяли по критерию Фишера, определяемому согласно зависимости

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2} \leq F_{табл},$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности (остаточная дисперсия), определяемая по формуле

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-C} \cdot \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_n - \hat{Y}_n)^2 \leq F_{табл},$$

где  $N$  – число опытов;

$m$  – количество повторностей;

$C$  – количество значимых коэффициентов регрессии;

$\bar{Y}_n$  – среднеарифметическое значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_n$  – расчетное значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$F_{табл}$  – табличное значение критерия Фишера под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости  $\alpha$ ;

$S^2$  – дисперсия воспроизводимости (общая дисперсия):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_n^2}{N},$$

где  $S_n^2$  – построчная дисперсия параметра оптимизации;

$i$  – номер повторности опыта;

$N$  – число опытов.

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{Y}_{on} - \hat{Y}_{on})^2}{m-1},$$

где  $\bar{Y}_{on}$  – среднеарифметическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_{on}$  – фактическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$m$  – количество повторностей в опыте.

Если неравенство соблюдается, то полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс, причем расчетное значение критерия Фишера устанавливается в зависимости от числа степеней свободы ( $\gamma_1 = (m-1) \cdot N$  и  $\gamma_2 = N-C$ ).

По результатам обработки получены следующие исходные данные:  $N=32$ ;  $m=3$ ;  $C=4$ ;  $S_{ad}^2 = 36,18$ ;  $\gamma_1 = (3-1) \cdot 32 = 64$ ;  $\gamma_2 = N-C = 32-4 = 28$ ;  $S^2 = 27,40$ .

Тогда расчетное значение критерия Фишера составит

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2} = \frac{36,18}{27,40} = 1,32.$$

Табличный критерий Фишера равен  $F_{табл}(0,05; 28; 64)=1,65$ .

Поскольку  $F_{расч} < F_{табл}$ , то полученное уравнение регрессии является значимым.

Таблица Л1 – Результаты исследований и обработки данных при выделении зерна из колоса от количества нагружения связей и угла наклона рифов

X1	X2	№ повторности			Уср	Дисперсия	Y(формула)	Разница	Квадрат разницы
		1	2	3					
0	1	88,2	74,7	83,5	82,13	46,96	82,25	-0,12	0,01
0	2	94,6	81,3	87,9	87,93	44,22	85,95	1,98	3,92
0	3	97,9	83,8	92,4	91,37	50,50	89,65	1,71	2,93
0	4	98,8	90,3	94,6	94,57	18,06	93,35	1,21	1,47
0	5	100	97,3	96,4	97,90	3,51	97,05	0,85	0,72
0	6	100	100	100	100,00	0,00	100,75	-0,75	0,57
15	1	90,2	76,1	85,5	83,93	51,54	84,71	-0,77	0,60
15	2	94,8	83,6	89,4	89,27	31,37	88,41	0,86	0,74
15	3	98,6	85,8	92,8	92,40	41,08	92,11	0,29	0,09
15	4	97,4	92,7	95,5	95,20	5,59	95,81	-0,61	0,37
15	5	98,4	96,5	98,4	97,77	1,20	99,51	-1,74	3,02
15	6	100	100	100	100,00	0,00	103,21	-3,21	10,27
30	1	86,8	68,8	78,9	78,17	81,40	84,33	-6,17	38,04
30	2	96,2	80,8	92,2	89,73	63,85	88,03	1,70	2,89
30	3	92,6	76,5	87,5	85,53	67,70	91,73	-6,20	38,45
30	4	98,5	93,5	95,4	95,80	6,37	95,43	0,37	0,13
30	5	100	97,2	98,3	98,50	1,99	99,13	-0,63	0,40
30	6	100	100	100	100,00	0,00	102,83	-2,83	8,03
45	1	96,6	80,6	86,4	87,87	65,61	81,14	6,73	45,25
45	2	99,3	82,9	92,2	91,47	67,64	84,84	6,63	43,92
45	3	98,2	87,1	95,5	93,60	33,51	88,54	5,06	25,61
45	4	99,1	91,9	96,4	95,80	13,23	92,24	3,56	12,68
45	5	99,5	93,5	98,4	97,13	10,20	95,94	1,19	1,43
45	6	100	100	100	100,00	0,00	99,64	0,36	0,13
60	1	74,3	60,7	65,6	66,87	47,44	75,12	-8,26	68,15
60	2	78,5	70,9	73,4	74,27	15,00	78,82	-4,55	20,75
60	3	91,1	76,1	82,4	83,20	56,73	82,52	0,68	0,46
60	4	92,3	81,4	85,9	86,53	30,00	86,22	0,31	0,10
60	5	94,6	89,5	91,3	91,80	6,69	89,92	1,88	3,53
60	6	97,6	90,3	93,2	93,70	13,51	93,62	0,08	0,01
60	7	100	97,4	98,8	98,73	1,69	97,32	1,41	2,00
60	8	100	100	100	100,00	0,00	101,02	-1,02	1,04
<b>Дисперсия воспроизводимости</b>						<b>27,40</b>	<b>Дисперсия адекватности</b>		<b>36,18</b>

## Приложение М

Регрессионный анализ исследования прохода свободного зерна сквозь сепарирующую решетку от размеров ее отверстий

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

Дисперсионный анализ						
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>	
Регрессия	4	310,686358	77,67158951	14,2387257	0,012353676	
Остаток	4	21,81981481	5,454953704			
Итого	8	332,5061728				

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	-110,7333333	31,93863401	-3,467065413	0,025652068	-199,4091974	-22,05746926
X1	0,199305556	0,119187284	1,672204864	0,016980113	-0,131611395	0,530222506
X2	37,19722222	7,022953301	5,296521367	0,006101506	17,69837791	56,69606654
X2^2	-1,926388889	0,412876862	-4,665770998	0,009548368	-3,072718832	-0,780058946
X1*X2	-0,022916667	0,014597401	-1,569914121	0,019152174	-0,06344555	0,017612217

Рисунок М1 – Скриншот рабочего окна программы «Excel» при исследовании прохода свободного зерна сквозь сепарирующую решетку от размеров ее отверстий

Значимость полученного уравнения регрессии проверяли по критерию Фишера, определяемому согласно зависимости

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2} \leq F_{табл},$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности (остаточная дисперсия), определяемая по формуле

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-C} \cdot \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_n - \hat{Y}_n)^2 \leq F_{табл},$$

где  $N$  – число опытов;

$m$  – количество повторностей;

$C$  – количество значимых коэффициентов регрессии;

$\bar{Y}_n$  – среднеарифметическое значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_n$  – расчетное значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$F_{табл}$  – табличное значение критерия Фишера под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости  $\alpha$ ;

$S^2$  – дисперсия воспроизводимости (общая дисперсия):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_n^2}{N},$$

где  $S_n^2$  – построчная дисперсия параметра оптимизации;

$i$  – номер повторности опыта;

$N$  – число опытов.

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{Y}_{on} - \hat{Y}_{on})^2}{m-1},$$

где  $\bar{Y}_{on}$  – среднеарифметическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_{on}$  – фактическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$m$  – количество повторностей в опыте.

Если неравенство соблюдается, то полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс, причем расчетное значение критерия Фишера устанавливается в зависимости от числа степеней свободы ( $\gamma_1 = (m-1) \cdot N$  и  $\gamma_2 = N-C$ ).

По результатам обработки получены следующие исходные данные:  $N=9$ ;  $m=3$ ;  $C=5$ ;  $S_{ad}^2 = 19,59$ ;  $\gamma_1 = (3-1) \cdot 9 = 18$ ;  $\gamma_2 = N-C = 9-5 = 4$ ;  $S^2 = 10,59$ .



Тогда расчетное значение критерия Фишера составит

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2} = \frac{19,59}{10,59} = 1,85.$$

Табличный критерий Фишера равен  $F_{табл}(0,05; 4; 18)=2,93$ .

Поскольку  $F_{расч} < F_{табл}$ , то полученное уравнение регрессии является значимым.

Таблица М1 – Результаты исследований и обработки данных прохода свободного зерна сквозь сепарирующую решетку от размеров ее отверстий

X1	X2	№ повторности			Уср	Дисперсия	Y(формула)	Разница	Квадрат разницы
		1	2	3					
120	6	51,3	43,8	48,5	47,87	14,36	50,52	-2,65	7,02
120	8	67,8	63,2	65,8	65,60	5,32	65,47	0,13	0,02
120	10	68,2	61,4	64,1	64,57	11,72	65,02	-0,45	0,20
160	6	58,4	50,8	55,4	54,87	14,65	52,99	1,88	3,53
160	8	71,5	65,4	69,2	68,70	9,49	66,11	2,59	6,70
160	10	67,0	59,4	63,5	63,30	14,47	63,82	-0,52	0,27
200	6	57,8	52,1	55,8	55,23	8,36	55,46	-0,23	0,05
200	8	67	60,6	64,5	64,03	10,40	66,75	-2,72	7,38
200	10	65,8	60,8	64,2	63,60	6,52	62,63	0,97	0,95
<b>Дисперсия воспроизводимости</b>						<b>10,59</b>	<b>Дисперсия адекватности</b>		<b>19,59</b>

## Приложение Н

Регрессионный анализ исследования прохода половы сквозь  
сепарирующую решетку от размеров ее отверстий

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

Дисперсионный анализ						
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>	
Регрессия	4	215,551358	53,88783951	7,900155653	0,035035826	
Остаток	4	27,28444444	6,821111111			
<b>Итого</b>	<b>8</b>	<b>242,8358025</b>				

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	-129,9777778	35,71481174	-3,639324175	0,021977784	-229,137992	-30,81756353
X1	1,793055556	0,392664656	4,566378782	0,010288971	0,702843692	2,883267419
X2	9,322222222	2,665581376	3,49725666	0,024958107	1,921381857	16,72306259
X1^2	-0,004277778	0,001154231	-3,70617258	0,020723239	-0,007482436	-0,00107312
X1*X2	-0,049166667	0,016323286	-3,012057001	0,039470365	-0,094487373	-0,00384596

Рисунок Н1 – Скриншот рабочего окна программы «Excel» при исследовании прохода половы сквозь сепарирующую решетку от размеров ее отверстий

Значимость полученного уравнения регрессии проверяли по критерию Фишера, определяемому согласно зависимости

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2} \leq F_{табл},$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности (остаточная дисперсия), определяемая по формуле

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-C} \cdot \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_n - \hat{Y}_n)^2 \leq F_{табл},$$

где  $N$  – число опытов;

$m$  – количество повторностей;

$C$  – количество значимых коэффициентов регрессии;

$\bar{Y}_n$  – среднеарифметическое значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_n$  – расчетное значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;

$F_{табл}$  – табличное значение критерия Фишера под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости  $\alpha$ ;

$S^2$  – дисперсия воспроизводимости (общая дисперсия):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_n^2}{N},$$

где  $S_n^2$  – построчная дисперсия параметра оптимизации;

$i$  – номер повторности опыта;

$N$  – число опытов.

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{Y}_{on} - \hat{Y}_{on})^2}{m-1},$$

где  $\bar{Y}_{on}$  – среднеарифметическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$\hat{Y}_{on}$  – фактическое значение параметра в  $i$ -том опыте;

$m$  – количество повторностей в опыте.

Если неравенство соблюдается, то полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс, причем расчетное значение критерия Фишера устанавливается в зависимости от числа степеней свободы ( $\gamma_1 = (m-1) \cdot N$  и  $\gamma_2 = N-C$ ).

По результатам обработки получены следующие исходные данные:  $N=9$ ;  $m=3$ ;  $C=5$ ;  $S_{ad}^2 = 20,46$ ;  $\gamma_1 = (3-1) \cdot 9=18$ ;  $\gamma_2 = N-C=9-5=4$ ;  $S^2=11,53$ .

Тогда расчетное значение критерия Фишера составит

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2} = \frac{20,46}{11,53} = 1,78.$$

Табличный критерий Фишера равен  $F_{табл}(0,05; 4; 18)=2,93$ .

Поскольку  $F_{расч} < F_{табл}$ , то полученное уравнение регрессии является значимым.

Таблица Н1 – Результаты исследований и обработки данных прохода половы сквозь сепарирующую решетку от размеров ее отверстий

X1	X2	№ повторности			У <sub>ср</sub>	Дисперсия	Y(формула)	Разница	Квадрат разницы
		1	2	3					
120	6	47	38,2	43,1	42,77	19,44	44,12	-1,36	1,84
120	8	52,2	47,8	53,2	51,07	8,25	50,97	0,10	0,01
120	10	61,6	56,4	59,2	59,07	6,77	57,81	1,26	1,58
160	6	61,8	54,8	58,4	58,33	12,25	56,13	2,20	4,84
160	8	62,5	56,8	60,3	59,87	8,26	59,04	0,82	0,68
160	10	61,6	56,4	58,8	58,93	6,77	61,96	-3,02	9,13
200	6	58	50,1	54,3	54,13	15,62	54,46	-0,32	0,10
200	8	54,2	48,6	51,6	51,47	7,85	53,43	-1,97	3,87
200	10	58,9	50,3	54,9	54,70	18,52	52,41	2,29	5,24
<b>Дисперсия воспроизводимости</b>						<b>11,53</b>	<b>Дисперсия адекватности</b>		<b>20,46</b>

## Приложение О

## Определение длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от скорости плавающего транспортера

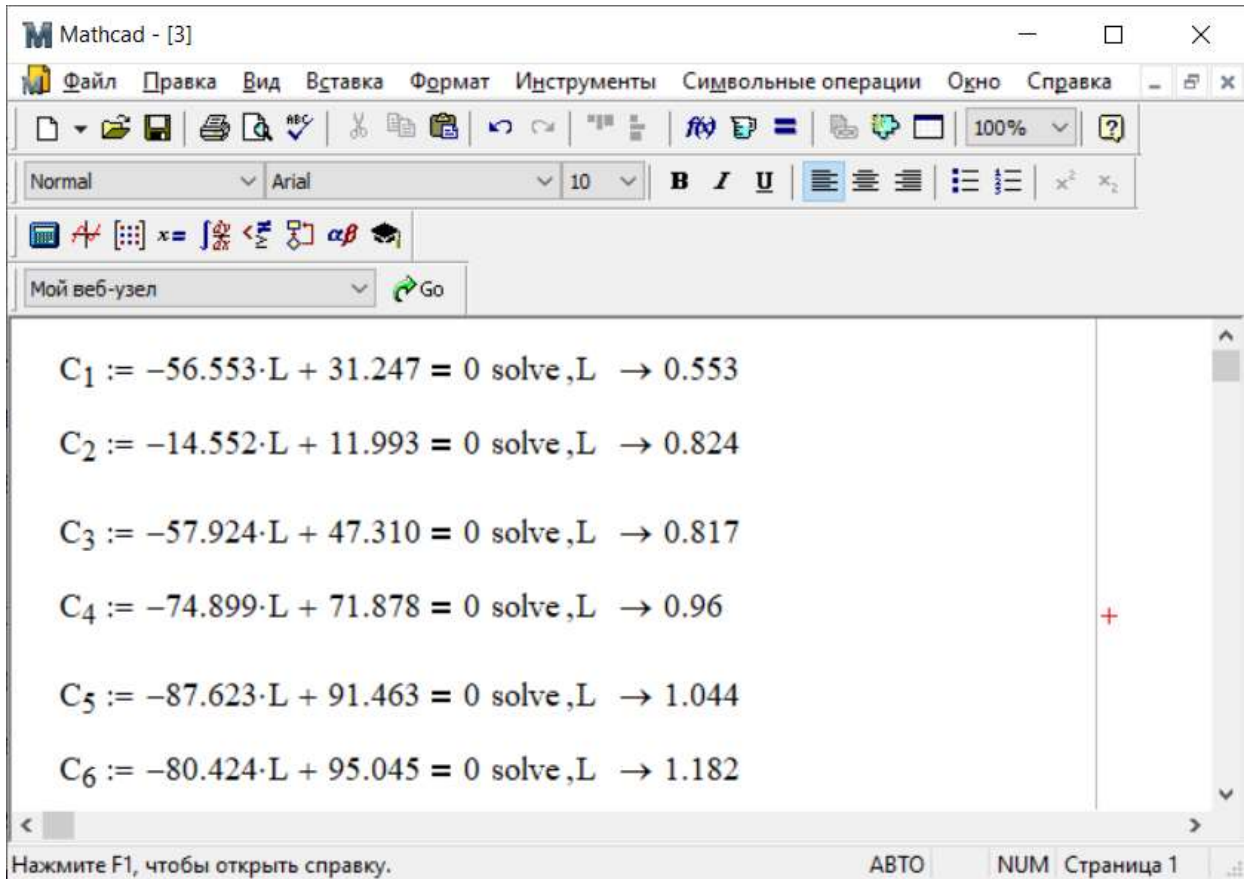


Рисунок О1 – Скриншот рабочего окна программы «Mathcad» при определении длины сепарирующей поверхности экспериментальной установки от скорости плавающего транспортера

## Приложение П

К расчету мощности привода дополнительного оборудования

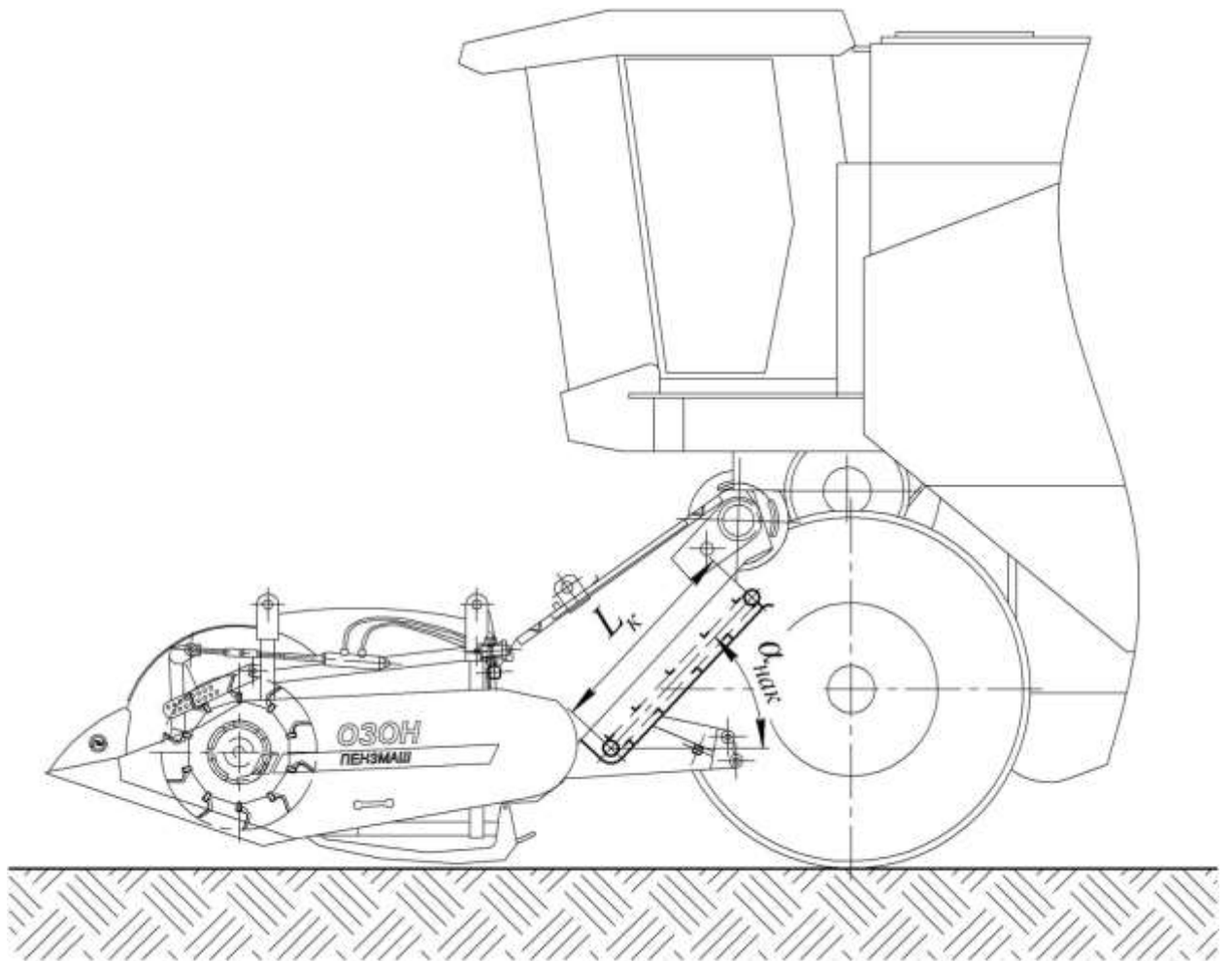


Рисунок П1 – К расчету мощности привода дополнительного оборудования